

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Bethania Machado Correa

**ANÁLISE DE RIGIDEZ E DANIFICAÇÃO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE COM DIFERENTES
TIPOS E TEORES DE RAP**

Santa Maria, RS
2020

Bethania Machado Correa

**ANÁLISE DE RIGIDEZ E DANIFICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS
RECICLADAS A QUENTE COM DIFERENTES TIPOS E TEORES DE RAP**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

**Santa Maria, RS
2020**

Correa, Bethania Machado
ANÁLISE DE RIGIDEZ E DANIFICAÇÃO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE COM DIFERENTES TIPOS E
TEORES DE RAP / Bethania Machado Correa.- 2020.
149 p.; 30 cm

Orientador: Luciano Pivoto Specht
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2020

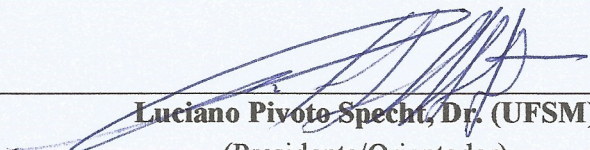
1. Misturas asfálticas recicladas 2. RAP 3.
Comportamento Mecânico 4. Rigidez 5. Fadiga I. Pivoto
Specht, Luciano II. Título.

Bethania Machado Correa

**ANÁLISE DE RIGIDEZ E DANIFICAÇÃO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE COM DIFERENTES
TIPOS E TEORES DE RAP**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

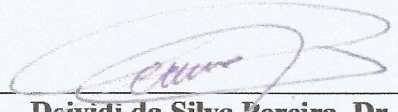
Aprovado em 16 de abril de 2020



Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Lélío Antônio Teixeira Brito, PhD. (UFRGS)



Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2020

AGRADECIMENTOS

À toda minha família, em especial aos meus pais, Tamara e Paulo, que sempre me incentivaram a seguir estudando e me apoiando incondicionalmente nessa etapa do mestrado. Vocês me mostraram que o caminho é árduo, porém gratificante e compensatório. Ao meu irmão Túlio Righi, pela amizade e carinho. A realização desse trabalho só foi possível devido ao amor que recebi de vocês. Obrigada por estarem sempre junto comigo!

Ao meu companheiro Thales Mânica, toda gratidão pela tua companhia ao longo desses anos juntos, principalmente durante esses dois anos no mestrado. Obrigada por sempre estar ao meu lado, me apoiar e me incentivar a seguir minhas escolhas.

Ao meu orientador, Professor Luciano, pela oportunidade de desenvolver essa pesquisa, por todo ensinamento e suporte ao longo do meu período no GEPPASV. Também agradeço aos demais professores do grupo, em especial à professora Tatiana e ao professor Deividi. Que todo carinho e dedicação de vocês com o grupo continuem inspirando estudantes a seguirem no caminho da pesquisa.

Agradeço ao meu colega Felipe Luzzi pela disponibilização dos seus dados de ensaios e ajuda e aos meus colegas e amigos de grupo Fernando Boeira, Pedro Orlando e Silvio Schuster, por toda ajuda e paciência na realização dos ensaios, na análise de resultados e pela amizade durante esses anos de convivência no grupo. Aos demais colegas e amigos, integrantes e ex-integrantes, do GEPPASV, em especial a Andressa, Chaveli, Débora, Gustavo, Rossano, Bruno Gonçalves, Jonathan, Lucas Bueno, Evelyn, Pablo e aos funcionários do LMCC, Fernando e Eduardo Druzian. Muito obrigada pela amizade e carinho, desejo muito sucesso na vida de vocês! Agradeço também a todos alunos de iniciação científica e voluntários que passaram pelo grupo, em especial a Ketrily, Gabriela, Gabriel, Victória, Pedro Ilha, Jennifer, Karine, Lorenzo, Manoela e Luan. A ajuda de vocês foi fundamental na realização desse trabalho.

A todos amigos que a vida me presenteou, em especial a Aline, Desirre e Marina. Minha gratidão pela amizade e por me permitirem a companhia de vocês em mais uma conquista.

Agradeço à ANP/Petrobras pelo investimento e bolsa de estudos recebidos durante o mestrado, e à Universidade Federal de Santa Maria, por me proporcionar um ensino público com excelência e qualidade, que eu tive o prazer de usufruir durante a graduação e o mestrado.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da ANP- Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis/PETROBRAS, Brasil, associado ao investimento de recursos oriundos das Cláusulas de P,D&I.

RESUMO

ANÁLISE DE RIGIDEZ E DANIFICAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS A QUENTE COM DIFERENTES TIPOS E TEORES DE RAP

AUTORA: Bethania Machado Correa
ORIENTADOR: PROF. DR. Luciano Pivoto Specht

A constante busca por alternativas sustentáveis que visam a redução do impacto ambiental deu visibilidade para que pesquisas acerca do assunto fossem desenvolvidas. Nesse contexto, o material fresado, denominado RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*), surgiu como objeto de estudo de pesquisas que buscam aprofundar o conhecimento sobre o comportamento deste material quando incorporado a novas misturas asfálticas, a fim de proporcionar a reutilização dele. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento mecânico de misturas recicladas com diferentes fontes de RAP e teores de incorporação. Para alcançar o objetivo proposto, foram avaliadas em laboratório oito misturas, divididas em dois grandes grupos: quatro misturas contendo ligante virgem 50/70 e RAP oriundo de uma fonte 1; quatro misturas contendo ligante virgem 60/85 e RAP da fonte 2. Os teores de incorporação de RAP foram de 0%, 10%, 20% e 30%. O agregado virgem utilizado foi do tipo granítico, proveniente de uma pedreira do município de Eldorado do Sul – RS. A fonte 1 de RAP contém ligante 50/70 em sua composição e a fonte 2 de RAP contém ligante 60/85. As misturas seguiram a metodologia Marshall de dosagem, e os teores de projeto encontrados confirmaram uma redução do ligante virgem adicionado, indicando que uma parcela do ligante presente no RAP foi reativado. Foram realizados os ensaios de: módulo de resiliência (MR) e módulo dinâmico (MD) para a avaliação da rigidez; danificação por umidade induzida (DUI); uniaxial de carga repetida (*flow number*); resistência à tração por compressão diametral (RT) e fadiga à tração-compressão. Os resultados de MR indicaram que o aumento de teor de ligante nas misturas contendo ligante 50/70 diminuiu a rigidez, sendo este fator mais importante que o teor de RAP inserido, já para o ligante 60/85 a inserção de RAP teve significativa influência na rigidez. Os resultados de MD corroboraram os resultados de MR, sendo os maiores valores de rigidez encontrado para as misturas com ligante 50/70, e a adição de 30% RAP nas misturas com ligante 60/85 elevou a rigidez. Quanto aos resultados de DUI, as misturas não apresentaram danificação pela ação da água. Para o ensaio de FN e RT, a adição de RAP elevou os valores para ambos tipos de ligante. Na análise da fadiga, as misturas com ligante 60/85 apresentaram melhor desempenho, e adição de RAP diminuiu levemente os valores. Porém, na análise de área trincada, as misturas contendo ligante 60/85 com adição de 10% e 20% de RAP apresentaram dano quase nulo. Por fim, a pesquisa mostrou que o teor de ligante final das misturas e o tipo de ligante virgem adicionado também são fatores que influenciam diretamente no desempenho das misturas recicladas. Misturas com adição de RAP podem apresentar comportamento semelhante, ou até melhor, que misturas sem adição desse material, tornando viável projetos futuros sustentáveis que utilizem esse material em camadas de revestimentos asfálticos.

Palavras-chave: RAP. Comportamento Mecânico. Rigidez. Fadiga.

ABSTRACT

ANALYSIS OF STIFFNESS AND DAMAGE OF ASPHALT MIXTURES HOT RECYCLED WITH DIFFERENT TYPES AND RAP CONTENTS

AUTHOR: BETHANIA MACHADO CORREA
ADVISOR: PROF. DR. LUCIANO PIVOTO SPECHT

The constant search for sustainable alternatives intending to reduce the environmental impact gave research visibility for the developed subject. In this context, the paving milled material, known as RAP (Reclaimed Asphalt Pavement), emerged as a study object for researches. In order to provide its reuse, they seek to deepen the material behavior knowledge when incorporated into new asphalt mixtures. Thus, this work aims to study the mechanical behavior of recycled mixtures with different sources of RAP and incorporation levels. To achieve the proposed objective, eight mixtures were compound, divided into two large groups: four mixtures containing 50/70 virgin binder and RAP from a source 1; four mixtures containing virgin binder 60/85 and RAP from source 2, following Marshall Dosage methodology. For each of this groups, the RAP incorporation levels were 0%, 10%, 20% and 30%. The virgin aggregate used was a granitic type, from a quarry from the city of Eldorado do Sul - RS. Source 1 of RAP contains 50/70 neat binder in its composition and source 2 of RAP contains 60/85 polymer modified binder. From previous results, the design bitumen contents found confirmed a reduction in the added virgin binder, indicating that a portion of the RAP binder was reactivated. At the laboratory, resilience module (MR) and dynamic module (MD) tests were performed for stiffness evaluation. Moreover, moisture-induced damage (DUI); uniaxial repeated load (flow number); tensile strength by diametrical compression (RT) and tensile-compression fatigue were also conducted. The MR results indicated that, for 50/70 mixtures, the increase in binder content decreased the stiffness, being more important than the inserted RAP content. Whereas for the 60/85 mixtures, the insertion of RAP increased the stiffness. Dynamic Module results corroborated with the previous analysis, the highest values of stiffness found were for mixtures with binder 50/70. In 60/85 scenario, the addition of 30% RAP in mixtures increased the stiffness. DUI results showed that water did not damaged any of analyzed mixtures. For the FN and RT tests, the addition of RAP increased the values results for both types of binder. In the fatigue analysis, mixtures with 60/85 binder presented better performance than 50/70, and the addition of RAP slightly decreased the performance. However, using the cracked area shift function, the mixtures containing 60/85 binder with addition of 10% and 20% of RAP showed almost zero damage. Finally, this research has shown that the final binder content of the mixtures and the type of virgin binder added are also factors that directly influence recycled mixtures performance. Mixtures with the addition of RAP can behave similarly, or even better, than virgin mixtures, making viable sustainable future projects that use this material in layers of asphalt coatings.

Keywords: RAP. Mechanical Behavior. Stiffness. Fatigue.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Resposta de um material viscoelástico sob tensão controlada | 24 |
| Figura 2 - Limites de deformação de acordo com o comportamento das misturas asfálticas para temperatura constante | 25 |
| Figura 3 - Defasagem entre as ondas de tensão e de deformação durante aplicação | 27 |
| Figura 4 - Ilustração da diferença de falha por coesão e falha por adesão..... | 31 |
| Figura 5 - Percolação da água no interior das misturas asfálticas | 31 |
| Figura 6 - Ilustração do comportamento do pavimento asfáltico ao longo do tempo | 33 |
| Figura 7 - Análise econômica da utilização do RAP | 37 |
| Figura 8 - Esquema do protocolo de caracterização do RAP | 38 |
| Figura 9 - Cenários de mistura nula (a), mistura parcial (b) e mistura completa (c)..... | 40 |
| Figura 10 - Exemplo de Blending Charts utilizando o PG do ligante | 41 |
| Figura 11 - Framework para projeto de mistura baseado em desempenho | 42 |
| Figura 12 - Ilustração da usina volumétrica para inserção do material RAP | 50 |
| Figura 13 - Fluxograma do programa experimental | 51 |
| Figura 14 - Detalhe do trecho de Candelária e processo de fresagem | 52 |
| Figura 15 - Detalhes do RAP originário da fresagem do trecho da RS-400 | 53 |
| Figura 16 - Equipamento utilizado na fresagem e detalhe do tambor de fresagem..... | 54 |
| Figura 17 - Detalhes do RAP originário da fresagem do trecho BR-290/RS e BR-116/RS | 54 |
| Figura 18 - Mapa do Rio Grande do Sul com a localização dos trechos onde ocorreu a fresagem | 55 |
| Figura 19 - Curvas granulométricas dos materiais que serão utilizados nesta pesquisa..... | 57 |
| Figura 20 - Composição granulométrica das misturas..... | 60 |
| Figura 21 - Processo de mistura e compactação no compactador Marshall..... | 61 |
| Figura 22 - Prensa UTM 25 utilizada no ensaio de MR | 65 |
| Figura 23 - Detalhe do ensaio de MR | 66 |
| Figura 24 - Detalhe da realização do ensaio de módulo dinâmico | 67 |
| Figura 25 - Etapas de saturação dos corpos de prova (a) congelamento a -18° (b) e banho-maria a 60°C..... | 69 |
| Figura 26 - Curva deformação permanente <i>versus</i> número de ciclos..... | 70 |
| Figura 27 - Exemplo de amostra sofrendo deformação (a) e amostra ao término do ensaio (b) | 71 |
| Figura 28 - Ensaio de RT | 72 |
| Figura 29 - Processo de fixação das chapas nas amostras e realização do ensaio na prensa ... | 73 |
| Figura 30 - Gráfico típico da Curva Característica de Dano (C versus S)..... | 74 |
| Figura 31 - Estrutura de pavimento utilizada nas simulações no software LVECD | 75 |
| Figura 32 - Resultados de todas as misturas obtidos no ensaio de MR | 78 |
| Figura 33 - Espaço Cole Cole para as misturas com ligante 50/70 | 81 |
| Figura 34 - Espaço Cole Cole para as misturas com ligante 60/85 | 81 |
| Figura 35 - Espaço Cole Cole para todas misturas | 82 |
| Figura 36 - Diagrama Black para as misturas com ligante 50/70..... | 83 |
| Figura 37 - Diagrama Black para as misturas com ligante 60/85..... | 84 |
| Figura 38 - Diagrama Black para todas misturas..... | 85 |
| Figura 39 - Curvas mestras de módulo dinâmico para as misturas com ligante 50/70..... | 86 |
| Figura 40 - Curvas mestras de módulo dinâmico para as misturas com ligante 60/85 | 86 |
| Figura 41 - Curvas mestras de módulo dinâmico para as oito misturas | 87 |
| Figura 42 - Comparação das curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas nas baixas frequências (@ 21°C)..... | 88 |

| | |
|--|-----|
| Figura 43 - Comparação das curvas mestras de módulo dinâmico das misturas com ligante 60/85 com as curvas obtidas por Luzzi (2019) (@ 21°C)..... | 89 |
| Figura 44 - Comparação das curvas mestras de ângulo de fase para todas as misturas com ligante 50/70 (@ 21°C)..... | 90 |
| Figura 45 - Comparação das curvas mestras de ângulo de fase para as misturas com ligante 60/85 (@ 21°C)..... | 91 |
| Figura 46 - Comparação das curvas mestras de ângulo de fase para todas as misturas (@ 21°C)..... | 91 |
| Figura 47 - Resultados de Resistência Retida a Tração | 94 |
| Figura 48 - Resultados de Resistência Retida a Tração | 95 |
| Figura 49 - Resultados de FN para as oito misturas | 97 |
| Figura 50 - Comparação entre Resultados de FN das misturas com ligante 60/85 | 98 |
| Figura 51 - Relação entre teor de ligante total e resultados de FN..... | 99 |
| Figura 52 - Resultados encontrados para RT em função do teor de RAP incorporado | 101 |
| Figura 53 - Comparação entre os valores de RT em função do teor de RAP entre esta pesquisa, Centofante (2016), Bohn (2017), Luzzi (2019) e Suzuki (2019) | 102 |
| Figura 54 - Curvas de Wöhler através dos dados experimentais..... | 104 |
| Figura 55 - Curva C vs. S da mistura 20 RAP 50/70 | 105 |
| Figura 56 - Curvas características de dano das misturas com ligante 50/70..... | 106 |
| Figura 57 - Curvas característica de danos das misturas com ligante 60/85..... | 107 |
| Figura 58 - Curvas características de dano das oito misturas..... | 107 |
| Figura 59 - Envoltória de ruptura G^R vs. N_f | 109 |
| Figura 60 - Envoltória de ruptura G^R vs. N_f para as misturas com ligante 60/85 e as de Luzzi (2019)..... | 110 |
| Figura 61 - Simulação da vida de fadiga a partir do critério de ruptura G^R | 111 |
| Figura 62 - Dano acumulado de 120 meses para todas as misturas com tráfego de 1×10^7 | 114 |
| Figura 63 - Dano acumulado de 120 meses as misturas com ligante 60/85 e as de Luzzi (2019) com de tráfego de 1×10^7 | 115 |
| Figura 64 - Dano representado em gráfico térmico para a mistura 20 RAP 50/70 | 116 |
| Figura 65 - Dano representado em gráfico térmico para a mistura REF 60/85..... | 116 |
| Figura 66 - Percentual de área trincada para todas as misturas | 117 |
| Figura 67 - Percentual de área trincada para as misturas com ligante 60/85 e as misturas de Luzzi (2019) | 118 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Resumo das misturas que serão utilizadas na pesquisa | 51 |
| Tabela 2 - Teor de ligante presente no “RAP 50/70” e massa específica | 53 |
| Tabela 3 - Teor de ligante e massa específica máxima medida das amostras de “RAP 60/85” | 55 |
| Tabela 4 - Características do ligante presente no “RAP 60/85” após extração pelo método Abson | 55 |
| Tabela 5 - Resultado da granulometria dos materiais fresados que serão utilizados nesta pesquisa | 56 |
| Tabela 6 - Resultado da granulometria dos materiais que serão utilizados nesta pesquisa | 57 |
| Tabela 7 - Ensaio de caracterização do agregado britado..... | 57 |
| Tabela 8 - Propriedades do CAP 50/70..... | 58 |
| Tabela 9 - Propriedades do AMP 60/85E..... | 58 |
| Tabela 10 - Nomenclatura adotada para as misturas estudadas nesta pesquisa | 59 |
| Tabela 11 - Escolha de teores para a determinação do teor ótimo de ligante a inserir nas misturas | 62 |
| Tabela 12 - Teores de projeto para as misturas com ligante 50/70 | 62 |
| Tabela 13 - Comparação entre os teores de projeto encontrados nesta pesquisa para as misturas com ligante 60/85, e os teores encontrados por Luzzi (2019)..... | 63 |
| Tabela 14 - Tempo mínimo recomendado de estabilização da temperatura das amostras ensaiadas..... | 67 |
| Tabela 15 - Valores encontrados para o ensaio de MR a 25°C | 77 |
| Tabela 16 - Parâmetros da modelagem 2S2P1D e valores de C1 e C2 | 80 |
| Tabela 17 - Tabela de comparação dos valores de teor de ligante das misturas desta pesquisa e os de Luzzi (2019) | 89 |
| Tabela 18 - Valores de RT, desvio padrão e coeficiente de variação encontrados para as amostras com condicionamento e sem condicionamento | 93 |
| Tabela 19 - Valores encontrados para FN, desvio padrão, coeficiente de variação e parâmetros do modelo de Francken | 96 |
| Tabela 20 - Valores médios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, a 25°C.... | 100 |
| Tabela 21 - Dados de deformação e ciclo de ruptura para cada amostra..... | 103 |
| Tabela 22 - Parâmetros A, B e R ² | 104 |
| Tabela 23 - Coeficientes C11 e C12 do <i>fitting</i> das curvas C vs. S e coeficientes Y, Δ e α ... | 108 |
| Tabela 24 - Equações das curvas GR e R ² | 110 |
| Tabela 25 - Fator de Fadiga das Misturas | 111 |
| Tabela 26 - Classificação destas misturas através do FFM com as misturas de Boeira (2018), Schuster (2018) e Luzzi (2019) | 112 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|--|-----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 19 |
| 1.1 | OBJETIVO GERAL..... | 20 |
| 1.1.1 | Objetivos Específicos | 20 |
| 1.1.2 | Organização do Trabalho..... | 21 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 23 |
| 2.1 | COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS | 23 |
| 2.1.1 | Rigidez | 23 |
| 2.1.2 | Deformação Permanente..... | 29 |
| 2.1.3 | Efeito da ação da água em misturas asfálticas | 30 |
| 2.1.4 | Dano por fadiga em misturas asfálticas | 32 |
| 2.2 | RECICLAGEM DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS | 35 |
| 3 | METODOLOGIA..... | 49 |
| 3.1 | PLANEJAMENTO DA PESQUISA..... | 49 |
| 3.2 | MATERIAIS UTILIZADOS | 52 |
| 3.2.1 | RAP | 52 |
| 3.2.2 | Agregado Mineral..... | 56 |
| 3.2.3 | Ligantes Asfálticos | 58 |
| 3.3 | PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS..... | 59 |
| 3.3.1 | Misturas asfálticas | 59 |
| 3.3.2 | Ensaio de deformabilidade | 64 |
| 3.3.3 | Ensaio de dano por umidade induzida..... | 68 |
| 3.3.4 | Ensaio para a avaliação do dano nas misturas..... | 69 |
| 4 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 77 |
| 4.1 | ENSAIOS DE DEFORMABILIDADE..... | 77 |
| 4.1.1 | Módulo de Resiliência | 77 |
| 4.1.2 | Módulo Complexo..... | 80 |
| 4.2 | ENSAIO PARA A AVALIAÇÃO DA PROPRIEDADE DE ADESÃO/COESÃO ... | 92 |
| 4.2.1 | Dano por umidade induzida (DUI)..... | 93 |
| 4.3 | ENSAIOS PARA A AVALIAÇÃO DO DANO NAS MISTURAS | 95 |
| 4.3.1 | Ensaio uniaxial de carga repetida (<i>Flow Number</i>) | 95 |
| 4.3.2 | Resistência à Tração por Compressão Diametral..... | 100 |
| 4.3.3 | Fadiga à Tração-Compressão Uniaxial..... | 102 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 119 |
| 5.1 | CONCLUSÃO | 119 |
| 5.2 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 121 |
| | REFERÊNCIAS | 123 |
| | APÊNDICE A..... | 131 |
| | APÊNDICE B..... | 140 |
| | APÊNDICE C..... | 145 |

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente é cada vez mais evidente em todos os setores da sociedade. Novas alternativas que propõem a redução do consumo de recursos naturais esgotáveis estão em destaque e apresentam constante crescimento de espaço no mercado. Isso se dá por meio da inserção e utilização de produtos sustentáveis e a reutilização de diferentes tipos de materiais na cadeia produtiva das indústrias, promovendo assim um menor impacto ao meio ambiente. Não diferente, a indústria da pavimentação, em escala mundial, vem abordando técnicas para redução destes impactos há alguns anos, como, por exemplo, a reciclagem de pavimentos, a utilização de misturas mornas e, ainda, a incorporação de resíduos em misturas asfálticas e em outras camadas do pavimento. Estas alternativas visam reduzir a emissão de gases poluentes, assim como a extração de materiais virgens e de fontes não renováveis.

Neste contexto, a reciclagem de pavimentos, que consiste na reutilização de material proveniente da fresagem de revestimentos asfálticos deteriorados, também chamado de RAP (do inglês *Reclaimed Asphalt Pavement*), é economicamente vantajosa, além de ter se mostrado uma opção favorável ambientalmente. Em alguns países, a reutilização do RAP já alcançou números satisfatoriamente elevados, como é o caso do Estados Unidos, onde este material possui a maior taxa de reciclagem entre os materiais recicláveis (COPELAND, 2011). Conforme a pesquisa publicada em 2017 pela NAPA (*National Asphalt Pavement Association*), cerca de 99% das misturas de asfalto recuperadas de antigos pavimentos foram reutilizadas em novos pavimentos. Ainda, estima-se que o uso de RAP no ano de 2017 tenha reduzido a necessidade de 3,8 milhões de toneladas (21,5 milhões de barris) de ligante asfáltico e mais de 72 milhões de toneladas de agregado (WILLIAMS *et al.*, 2018), dados estes que reforçam a importância e a economia da reutilização destes materiais.

Na Europa, conforme estudos realizados pela EAPA (*European Asphalt Pavement Association*) em 2018, a Bélgica reutilizou 100% de seu material reciclado disponível para a produção de misturas asfálticas usinadas a quente, cerca de 1.687.000 toneladas de material. A Finlândia também apresenta uma taxa de reutilização de 100% para o mesmo tipo de mistura. Em países que apresentam maior quantidade de material disponível, a Alemanha reutilizou 82% para esse fim, dentre seus 13 milhões de toneladas de RAP.

O Brasil tem um alto potencial de geração do material RAP uma vez que apresenta uma malha com níveis elevados de danificação por fadiga e deformação permanente. Porém a utilização do RAP no meio prático ainda encontra barreiras, como a adaptação de usinas para

sua introdução e a carência de resultados concisos sobre o comportamento deste material em campo.

Assim, pesquisas acerca desse assunto são promissoras no país e a utilização do RAP vem se destacando no meio acadêmico com estudos que demonstram os benefícios de incorporação deste material, principalmente em camadas de base para pavimentos e em novas misturas asfálticas (MANGIAFICO, 2014; GENESSAUX, 2015; HOY *et al.*, 2017). Porém, apesar da existência de diversos trabalhos sobre o RAP, a abordagem acerca do desempenho deste material é pouco estudada, não existindo um consenso sobre a sua influência no comportamento mecânico das misturas recicladas.

Tendo em vista a variabilidade e, conseqüentemente, as diferentes propriedades dos RAPs em relação ao ligante presente no material, que atingem diferentes estados de envelhecimento, torna-se necessário avaliar sua qualidade e seu impacto no comportamento mecânico resultante nas misturas asfálticas. Uma vez que mais estudos avançarem, a utilização do RAP terá maior visibilidade, trazendo benefícios ambientais e econômicos para o país e incentivando a indústria a se adaptar. Portanto, a presente pesquisa buscou estudar a influência que a qualidade do RAP incorporado, proveniente de duas fontes distintas, apresenta no comportamento mecânico das misturas asfálticas recicladas, dando continuidade a pesquisa de Luzzi (2019), onde o autor estudou misturas asfálticas recicladas produzidas em uma usina volumétrica e avaliou o comportamento mecânico destas em laboratório.

1.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a rigidez e a danificação de misturas asfálticas recicladas com diferentes fontes e porcentagens de RAP e ligantes asfálticos virgens.

1.1.1 Objetivos Específicos

Para a realização da proposta desta pesquisa, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Avaliar a influência do RAP em relação ao tipo de ligante no comportamento mecânico das misturas asfálticas;
- Avaliar a influência do teor de RAP incorporado no comportamento mecânico das misturas asfálticas;

- Analisar a influência do teor e do tipo de ligante virgem adicionado à mistura no comportamento mecânico das misturas asfálticas;
- Propor uma equação para estimar a quantidade de ligante ativo no RAP através da comparação dos teores de projeto das misturas com diferentes porcentagens de RAP;
- Analisar as diferenças no comportamento das misturas recicladas reproduzidas em laboratório com misturas asfálticas usinadas semelhantes (Luzzi, 2019).

1.1.2 Organização do Trabalho

A presente pesquisa possui 5 capítulos organizados conforme descrito a seguir.

O Capítulo 1 apresenta uma introdução com o objetivo de contextualizar o leitor sobre o trabalho, logo em seguida é abordado os objetivos da pesquisa e a estruturação do trabalho.

No Capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica, onde os principais temas de objeto desse estudo são conceituados. É feita uma breve discussão sobre a reciclagem dos pavimentos, apresentando um contexto histórico e mundial e alguns conceitos importantes acerca do tema. Também são abordadas pesquisas recentes sobre o comportamento mecânico de misturas recicladas e assuntos pertinentes sobre o comportamento mecânico dos materiais asfálticos em geral.

O Capítulo 3 apresenta os materiais utilizados na pesquisa, bem como a metodologia realizada para atingir os objetivos propostos. São descritas as misturas que serão estudadas nesta pesquisa, os locais de coleta de material e RAP, a caracterização dos materiais utilizados, a dosagem das misturas e os ensaios mecânicos realizados.

O Capítulo 4 contempla os resultados encontrados para cada ensaio mecânica, bem como suas análises e discussões.

O Capítulo 5 apresenta as considerações finais deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, a dissertação apresenta um apêndice com resultados de ensaios.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda a revisão de literatura sobre o comportamento mecânico de misturas asfálticas, a reciclagem de pavimentos e misturas asfálticas recicladas com o intuito de estudar, compreender e consolidar os conceitos necessários para o desenvolvimento da pesquisa e análise dos resultados. Primeiramente é dissertado sobre o comportamento mecânico das misturas em geral com base na rigidez, deformação permanente, efeito deletério da água e dano por fadiga. Posteriormente é feita uma abordagem sobre as misturas asfálticas recicladas no qual traz o histórico, tipo e limitações a cerca desta técnica e são apresentados estudos e resultados de diversos autores sobre o comportamento das misturas recicladas pertinentes à pesquisa.

2.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Bernucci *et al.* (2010) definem o pavimento asfáltico como sendo uma estrutura de múltiplas camadas, sendo a camada de revestimento mais solicitada diretamente pelas cargas. O revestimento é responsável pela distribuição uniforme das cargas às camadas inferiores, pela impermeabilização do pavimento e pelas condições de conforto e segurança às quais devem ser proporcionadas ao usuário da via. Conforme Mangiafico (2014), pode-se considerar que o concreto asfáltico é um material contínuo, homogêneo e isotrópico, e seu comportamento é influenciado por três fatores, em nível macroscópico: temperatura, amplitude das deformações, e ao número de ciclos de carga solicitados.

Desta forma, o estudo das propriedades mecânicas das misturas asfálticas é de suma importância para a compreensão dos diversos fenômenos que ocorrem e suas mais variadas causas. As propriedades mecânicas abordadas nesta pesquisa serão: rigidez, deformação permanente, efeito deletério da água e dano por fadiga.

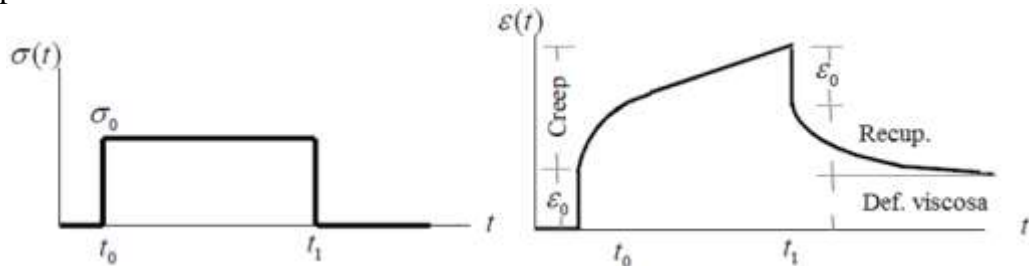
2.1.1 Rigidez

A rigidez, no concreto asfáltico, é definida como um parâmetro do material que indica a capacidade de resistir às deformações e é dada pela inclinação da curva tensão-deformação. Sabe-se que o concreto asfáltico, quando submetido a pequenas deformações, apresenta comportamento viscoelástico linear, pois o revestimento asfáltico herda as propriedades

viscoelásticas contidas no ligante, o qual é um material viscoelástico e termosuscetível. Assim, quando são aplicadas cargas com maiores velocidades, apresenta um comportamento quase elástico, já, quando as cargas aplicadas apresentam velocidades reduzidas, apresenta um comportamento predominantemente viscoso (RENAUD,1996).

Um material viscoelástico possui características de materiais elásticos e também de viscosos e, como tal, exibe comportamento de deformação dependente do tempo, manifestado por meio da fluência e relaxação. Quando uma tensão constante é aplicada sobre um material viscoelástico, uma resposta de deformação instantânea é observada. Em seguida, ocorre um aumento da deformação (*creep*). Ao remover o carregamento, um processo inverso ocorre: um certo nível de recuperação instantânea é seguido por uma recuperação da deformação que se estende por um certo tempo. A deformação viscosa do material, durante a aplicação do carregamento, resulta em uma deformação irreversível quando o carregamento é removido, conforme pode ser observado na Figura 1 (WOLDEKIDAN, 2011).

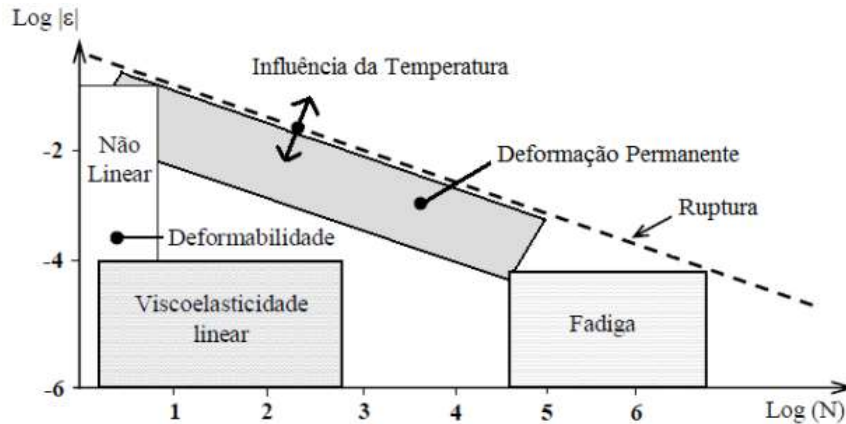
Figura 1 - Resposta de um material viscoelástico sob tensão controlada



Fonte: Woldekidan (2011).

A caracterização viscoelástica deve estar incorporada dentro do limite de viscoelasticidade linear para níveis de deformações inferiores que 100 microdeformações, diminuindo a probabilidade de induzir dano no material ou não culminando o comportamento não linear, para que não ocorra a deformabilidade plástica ou dano (DI BENEDETTO *et al.*, 2013). A Figura 2 mostra os diferentes tipos de comportamento das misturas asfálticas de acordo com as deformações e a quantidade de ciclo de carga.

Figura 2 - Limites de deformação de acordo com o comportamento das misturas asfálticas para temperatura constante



Fonte: Adaptado de Di Benedetto & Corté (2005).

Em 1930, Francis Hveem, iniciou pesquisas sobre o comportamento resiliente de materiais empregados em pavimentação. A denominação resiliência foi utilizada pelo autor para distinguir do módulo de Young que é determinado estaticamente. Hveem foi o primeiro pesquisador a relacionar as deformações recuperáveis com fissuras que se manifestam nos revestimentos asfálticos. A resiliência é denominada como energia armazenada em um corpo deformado elasticamente, que é restituído quando param as tensões causadoras da deformação (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Segundo Kim (2009), a rigidez é afetada por diversos fatores, como a taxa de deformação, temperatura, estado de tensão, as partículas dos agregados, o tipo de ligante, os vazios na mistura, a idade da mistura asfáltica, os finos no mástique, a água em forma líquida ou vapor e sua localização na mistura, entre outros.

A determinação da rigidez das misturas, na prática, é realizada pelo ensaio de Módulo de Resiliência (MR), onde o MR é adquirido de modo semelhante ao módulo de elasticidade, relação tensão (σ) e deformação (ϵ), porém, é obtido por meio de aplicação de carga repetida, avaliando, assim, um comportamento elástico linear. Contudo, vale ressaltar que o MR não representa um parâmetro puramente elástico para misturas asfálticas, uma vez que, no seu cálculo associado a um dado pulso de carregamento, desenvolvem-se deformações viscoelásticas, que são parcialmente contabilizadas como deformações elásticas (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Apesar do ensaio de MR ser comumente utilizado para avaliar o parâmetro de rigidez no Brasil e ser utilizado frequentemente no dimensionamento dos pavimentos asfálticos, outros países e o meio acadêmico já utilizam o ensaio de Módulo Complexo $|E^*|$ para avaliar a rigidez.

O ensaio de módulo complexo permite contabilizar os efeitos da temperatura e, principalmente, o tempo de carregamento nas propriedades dos materiais asfálticos. A importância de se considerar a esses efeitos faz com que este ensaio venha a ser o principal para a melhor compreensão acerca da rigidez das misturas asfálticas. Portanto, é considerado um ensaio que apresenta resultados mais próximos das reais propriedades do material.

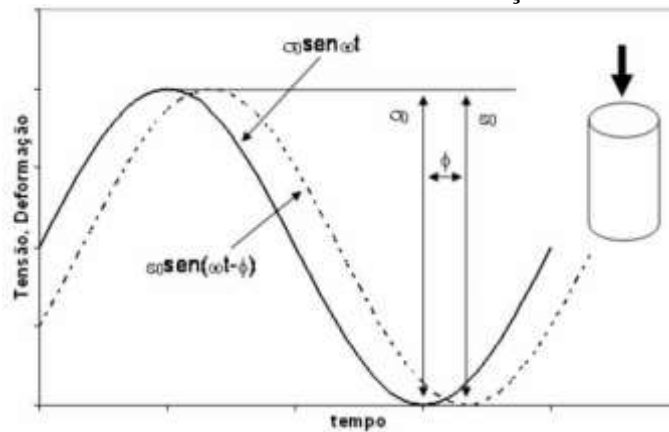
Babadopulos (2013) afirma que, apesar dos ensaios de MR e $|E^*|$ medirem a rigidez das misturas asfálticas, eles não representam as mesmas propriedades, visto que o MR é geralmente obtido apenas para uma condição de carregamento e temperatura. Assim, o ensaio de módulo complexo se aproxima mais de uma propriedade fundamental do material porque é avaliado em diferentes frequências e temperaturas, sendo a curva mestra construída e os modelos mecânicos ajustados a ela.

Características viscoelásticas lineares podem ser obtidas por meio do ensaio de $|E^*|$ que consiste na aplicação de um carregamento de compressão axial senoidal em Corpos de Prova (CPs) cilíndricos, na medição dos deslocamentos verticais correspondentes. Conforme Nascimento (2008), a relação tensão-deformação durante o carregamento senoidal contínuo é definida por um número complexo chamado de Módulo Complexo (E^*) e o seu valor absoluto $|E^*|$ é definido como módulo dinâmico. Se os níveis de deslocamentos medidos ficarem no domínio das pequenas deformações, espera-se um comportamento viscoelástico linear da mistura asfáltica. De acordo com Medina e Motta (2015) a parte real deste número complexo representa a componente elástica e a imaginária representa a componente viscosa.

Para a realização do ensaio de módulo complexo AASHTO T 342- 11 – *Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt* (HMA). A norma da AASHTO T 342/2011 estabelece um procedimento de ensaio com frequências que variam de 0,1Hz a 25Hz em temperaturas de -10°C a $54,4^{\circ}\text{C}$, e as amostras devem apresentar dimensões de 100mm de diâmetro e 150mm de altura.

No módulo complexo para cada temperatura, há uma curva de frequência ou tempo, por módulo dinâmico ou ângulo de fase. O módulo complexo é dado pela razão entre a amplitude da tensão aplicada e a amplitude da deformação (Figura 3) correspondente a cada mistura, e, quanto maior for o módulo dinâmico da mistura, mais rígida tende a ser.

Figura 3 - Defasagem entre as ondas de tensão e de deformação durante aplicação



Fonte: Nascimento (2008).

O módulo complexo pode ser definido, matematicamente, conforme a Equação 1.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Onde:

σ_0 = Tensão dinâmica máxima;

ϵ_0 = Deformação axial recuperável.

Define-se as porções real e imaginária do módulo complexo ($|E^*|$), descritas na Equação 2. E_1 é definida como módulo elástico real: é a parte real do módulo e está ligada ao comportamento elástico do material. A mesma avalia a parte recuperável da energia armazenada. E_2 é chamada de módulo de perda: consiste na parte imaginária do módulo e está ligada ao comportamento viscoso irreversível do material devido a uma dissipação de energia. Este valor retrata a energia gerada pelo atrito interno no material.

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (2)$$

O ângulo de fase pode ser obtido através da seguinte relação expressa na Equação 3:

$$\varphi = \frac{t_i}{t_p} \times 360 \quad (3)$$

Onde:

t_i = fração de tempo entre os picos de tensão e deformação;

t_p = tempo de um ciclo de carga.

Conforme Almeida Júnior (2016), o valor do Módulo Complexo varia em função dos parâmetros de ensaio, da temperatura e velocidade de carregamento, além da formulação do material betuminoso, natureza e teor do ligante, porcentual granular e de finos e a forma de compactação.

Di Benedetto *et al.* (2004) desenvolveram uma campanha experimental sobre a caracterização do comportamento viscoelástico linear de diferentes materiais betuminosos, onde o principal objetivo era estabelecer as ligações entre as propriedades viscoelásticas lineares das misturas betuminosas. Assim, o comportamento viscoelástico linear de ligantes e misturas foi estudado através da realização de testes de módulo complexo a diferentes temperaturas e frequências, utilizando o estudo de modelagem desenvolvido pelos próprios autores em 2003, o chamado modelo 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot). Tal modelo foi desenvolvido para modelagem de propriedades viscoelásticas lineares tanto de ligantes quanto de misturas asfálticas.

A uma dada temperatura, o modelo possui parâmetros de calibração para representação correta desse comportamento em termos de módulo, ângulo de fase e coeficiente de Poisson para temperatura e frequência de carregamento variado. O módulo e o coeficiente de Poisson complexos são expressos pela Equação 4 e 5, respectivamente, de acordo com o modelo 2S2P1D:

$$E^*(\omega) = E_{00} \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(j\omega\tau)^{-k} + (j\omega\tau)^{-h} + (j\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (4)$$

$$\nu^*(\omega) = \nu_{00} + (\nu_0 - \nu_{00}) \frac{E^*(\omega) - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad (5)$$

Onde:

ω = pulsação, $\omega=2\pi f$ (sendo f a frequência);

k, h = expoentes, $0 < k < h < 1$, β = constante;

E_{00} = módulo estático $\omega \rightarrow 0$;

E_0 = módulo em transição vítrea $\omega \rightarrow \infty$;

η = viscosidade Newtoniana, $\eta = (E_0 - E_{00}) \beta \tau$;

τ = tempo característico, o qual varia com a temperatura T , $\tau(T) = a_T(T) \tau_0$ onde $\tau_0 = \tau(T_{ref})$ é determinado na temperatura de referência;

ν_{00} = coeficiente de Poisson estático, $\omega \rightarrow 0$;

ν_0 = coeficiente de Poisson estático em transição vítrea, $\omega \rightarrow \infty$.

A modelagem bidimensional utiliza sete parâmetros de calibração, enquanto a tridimensional utiliza nove ao acrescentar o coeficiente de Poisson. Há também as constantes $(C1)_{WLF}$ e $(C2)_{WLF}$, responsáveis pela translação, como é demonstrado na Equação 6.

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (6)$$

Conforme Olard & Di Benedetto (2003), as quatro constantes presentes na Equação 6 definem completamente o comportamento viscoelástico linear das misturas betuminosas. O modelo 2S2P1D permite melhorar a aproximação das simulações com as curvas reais, encontradas através dos dados colhidos durante a realização de testes em laboratório. Após a inserção dos resultados no 2S2P1D são geradas e ajustadas as curvas no plano Cole-Cole, diagrama de Black, curva mestra de módulo dinâmico e ângulo de fase.

No cenário das misturas recicladas, apesar de algumas evidências apontarem para misturas com 25% de RAP com valores de módulos dinâmicos semelhantes às misturas virgens, o Relatório 752 do Programa Nacional de Pesquisa Rodoviária Cooperativa (NCHRP) (WEST *et al.*, 2013) mostra que o conteúdo RAP e a fonte agregada afetam significativamente os valores de módulo dinâmico das misturas e desempenho de pavimentos. Porém, conforme as pesquisas citadas no item 2.1.1, as misturas com algum teor de RAP tendem a apresentar valores de rigidez maiores devido ao ligante envelhecido presente neste material.

2.1.2 Deformação Permanente

A deformação permanente, juntamente com a fadiga, são os defeitos mais comuns que o revestimento asfáltico pode apresentar. É definida como o acúmulo irreversível de pequenas quantidades de deformações, provocando uma distorção na superfície do pavimento pela aplicação de carga com a passagem dos veículos, principalmente quando exposta a temperaturas elevadas (MURAYA, 2007). Ocorre devido a uma combinação do fluxo de material (viscoelástico ou viscoplástico) e do dano nesse material, representado pela formação e pela propagação de microtrincas (BERNUCCI *et al.*, 2010). Pode ser atribuída ao revestimento, ou às subcamadas ou ainda a uma combinação de efeitos (ONOFRE, 2012; BERNUCCI *et al.*

2010). Também conhecido como Afundamento de Trilha de Roda (ATR), se manifesta, principalmente, nos meses mais quentes do ano no Brasil, quando, além do alto volume de tráfego com excesso de cargas, a temperatura do pavimento está elevada.

Nascimento (2008) cita fatores que influenciam na deformação permanente, entre eles: a granulometria dos agregados, absorção dos agregados, afinidade entre asfalto e agregado mineral, teor de asfalto, Grau de Desempenho do asfalto (PG – *Performance Grade*). Barros (2017) cita que o efeito de deformação permanente nas misturas asfálticas, além de estar vinculada à ação das cargas, é fortemente dependente das características do seu material constituinte: agregados e ligante asfáltico.

Os principais ensaios para avaliar a deformação permanente em misturas asfálticas são os por simuladores e o ensaio uniaxial de carga repetida, que fornece o *Flow Number* (FN), e, de mais recente, o ensaio *Triaxial Stress Sweep* (TSS).

Almeida Jr. (2016) constatou que o fator que mais alterou a rigidez e a resistência à deformação permanente das misturas foi o tipo de ligante asfáltico, no qual o ligante modificado por polímero aumentou tanto a rigidez quanto a resistência ao dano. Além disso, o autor comprovou que o menor teor de ligante confere maior resistência à deformação permanente.

No âmbito das misturas recicladas, os trabalhos apresentados anteriormente já analisaram o comportamento destas quanto a resistência à deformação permanente e concluíram que, no geral, à medida que ocorre o aumento do teor de fresado, a resistência aumenta.

2.1.3 Efeito da ação da água em misturas asfálticas

A identificação da sensibilidade à ação deletéria da água em misturas asfálticas é um passo importante no processo de seleção de materiais e dosagem de misturas asfálticas. A seleção inadequada de materiais e a falha na correta determinação da sensibilidade à umidade podem resultar em defeitos prematuros no pavimento, bem como em custos excessivos com manutenção e reabilitação (VASCONCELOS *et al.*, 2006). O dano por umidade é definido como o fenômeno relacionado à perda de força e de durabilidade nas misturas asfálticas pela ação da água. Ele ocorre de duas formas: (i) falha na adesão (entre CAP e agregados) e (ii) falha na coesão (dentro do próprio filme de CAP) (KIGGUNDU E ROBERTS, 1988). A Figura 4 ilustra a diferença entre estas falhas.

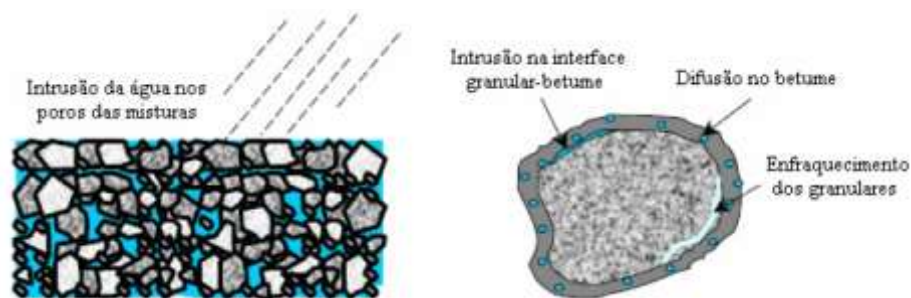
Figura 4 - Ilustração da diferença de falha por coesão e falha por adesão



Fonte: Adaptado de Kringos (2007).

A resposta das misturas asfálticas a diferentes patologias é influenciada pela interação entre agregado-ligante, esta interação pode ser afetada pelo dano causado pela umidade presente no revestimento asfáltico (MORAES *et al.*, 2011). A principal variável que potencializa o dano causado pela presença de água na mistura asfáltica é o volume de vazios. A água, ao penetrar no interior dos poros das misturas asfálticas (Figura 5) altera o equilíbrio das forças existentes podendo atuar de várias maneiras: agindo sobre a película do ligante asfáltico que recobre a superfície do agregado, ao ponto da resistência coesiva do revestimento se deteriorar pela presença da água na interface granular-ligante; ou, através da difusão da película de ligante asfáltico sob a forma de emulsão inversa, por meio da formação de gotículas de água no interior da película do ligante, diminuindo a coesão do ligante asfáltico e resultando no enfraquecimento da resistência coesiva do agregado (TERREL E AI-SWAILMI, 1994).

Figura 5 - Percolação da água no interior das misturas asfálticas



Fonte: CASTAÑEDA (2004) apud BARRA (2009).

O fenômeno da adesão de um filme de CAP, sobre a superfície de um agregado mineral, envolve o desenvolvimento de interações eletrostáticas que dependem fundamentalmente da natureza química do par CAP/agregados (LIBERATORI e CONSTANTINO, 2006). A formação dessas interações eletrostáticas na adesão está relacionada à natureza química das mesmas, pois o CAP é formado por compostos apolares (hidrocarbonetos) enquanto que a

superfície dos agregados é de natureza polar podendo possuir cargas positivas ou negativas. Quanto maior a compatibilidade entre estes materiais, maior será a resistência do filme de CAP à ação deslocadora da água. Dependendo da natureza química entre os constituintes, podendo ocorrer deslocamento do filme de CAP caso não haja uma ligação química efetiva para melhorar essa interação, são utilizados aditivos ou agentes melhoradores de adesividade (CARO, 2009).

No Brasil, o ensaio para a avaliação da ação deletéria da água segue os procedimentos descritos nas normas AASHTO T 283- 14 - *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture - Induced Damage* e a norma brasileira ABNT/NBR 15617:2011 – Misturas Asfálticas - Determinação do Dano por Umidade Induzida. O objetivo do ensaio é avaliar, a longo prazo (4 a 12 anos), a durabilidade das misturas asfálticas, em relação à propriedade da adesividade ligante/agregado.

A norma americana AASHTO T 283 - 14 descreve os procedimentos para a realização deste ensaio, onde os corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas com teores de vazios definidos são parcialmente saturados com água destilada e sujeitados a baixas temperaturas para congelamento do mesmo, durante um período de horas definido em norma, buscando simular a presença de água na mistura e as tensões internas oriundas das cargas do tráfego (BERNUCCI *et al.*, 2010).

O ensaio *Lottman* Modificado avalia o dano causado pela umidade através da relação de Resistência Retida à Tração (RRT), a qual é definida pela razão da resistência à tração da amostra condicionada pela resistência à tração de amostras sem condicionamento, para obter a porcentagem de perda de força e assim avaliar o potencial de susceptibilidade à umidade. Esta relação indica a perda de resistência por umidade induzida, que não deve ser inferior a 0,70, ou seja, ter perda maior ou igual a 30%.

2.1.4 Dano por fadiga em misturas asfálticas

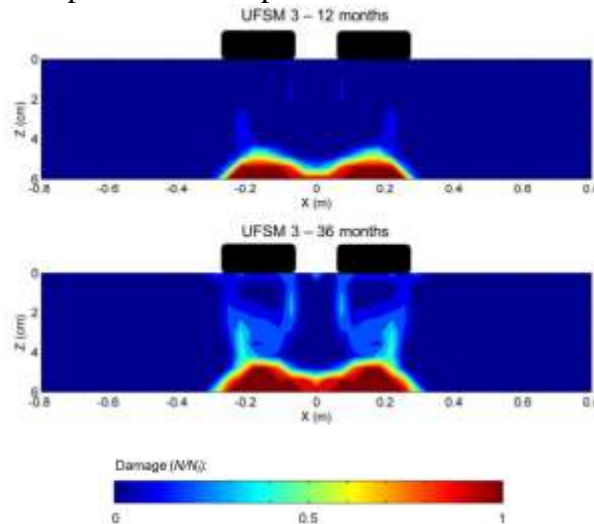
A fadiga é definida como o enfraquecimento das propriedades do material, resultando em falhas, causadas por cargas repetidas sem exceder a resistência do material (DI BENEDETTO & CORTÉ, 2005).

Balbo (2007) define o fenômeno da fadiga como o processo pelo qual muitos materiais passam quando são solicitados por tensões inferiores às de ruptura sucessivas vezes, desenvolvendo, paulatinamente, alterações na estrutura interna, levando a perda de suas

características estruturais originais. Ocorre então um processo de microfissuração sucessiva que leva à formação de fraturas e, posteriormente, ao rompimento do material.

Estas microfissurações iniciam nas regiões de máximas tensões ou deformações de tração, uma vez que os materiais são mais resistentes à compressão do que de tração. A Figura 6 ilustra como o dano por fadiga no revestimento asfáltico se comporta ao longo do tempo.

Figura 6 - Ilustração do comportamento do pavimento asfáltico ao longo do tempo



Fonte: Nascimento (2015).

Segundo Bastos (2010), a vida de fadiga de uma mistura asfáltica é influenciada por distintos fatores, como as características do ensaio, condições ambientais e características do material e do corpo de prova. Pode-se destacar três grupos principais que compreendem esses fatores:

- Fatores da mistura asfáltica: características do ligante asfáltico (teor, penetração, viscosidade etc.) e dos agregados (origem, forma e granulometria), compactação da mistura, rigidez, volume de vazios e temperatura;
- Fatores do ensaio mecânico: carregamento (intervalo entre aplicações de carga, magnitude, frequência, forma do carregamento, duração, tipo, entre outros);
- Fatores ambientais: temperatura e umidade.

A análise do trincamento por fadiga pode ser realizada por diversos modelos, sendo aqueles que buscam uma interpretação do fenômeno através de ensaios de laboratório os mais utilizados. Os dados obtidos desta forma são ajustados para se chegar a uma correlação que

forneça uma previsão da vida de fadiga do material. Dentre os ensaios de laboratório para avaliar a resistência à fadiga das misturas asfálticas, o de resistência à tração por compressão diametral é o recomendado pela prática vigente no país, resultando em uma medida indireta da resistência à tração (MEDINA E MOTTA, 2015).

Ainda, outros ensaios utilizados para a determinação do desempenho à fadiga são os: flexão em corpos de prova trapezoidais, flexão em barras prismáticas ou vigas e o tração-compressão uniaxial.

A caracterização do dano por fadiga e o processo de trincamento são abordados por duas teorias: a mecânica de fratura e a mecânica do dano contínuo. A primeira relaciona o fenômeno de formação de trincas para representar o comportamento do material. Por outro lado, a mecânica do dano contínuo, conhecida como *Viscoelastic Continuum Damage* – VECD, representa os fenômenos da microescala globalmente, utilizando propriedades fundamentais das misturas asfálticas para caracterizar efetivamente o comportamento do concreto asfáltico quando submetido a diferentes carregamentos e temperatura. O principal recurso do modelo VECD é a curva característica de dano, que é uma propriedade do material que independe das condições de teste. Essa propriedade, com a implementação adequada na estrutura de análise do pavimento, pode ser usada para prever o dano por fadiga das camadas de asfalto ao longo da faixa de condições encontradas no campo (HOU *et al.*, 2010; UNDERWOOD, 2011; KIM, 2009).

Para a aplicação do VECD, é necessário quantificar dois parâmetros, a pseudo-rigidez (C), ou integridade do material, e o dano (S). Conforme Nascimento *et al.* (2014), por se tratar de uma propriedade, pode-se realizar o ensaio em diferentes temperaturas, frequências, amplitudes ou deformações, que as curvas obtidas serão as mesmas para uma dada temperatura reduzida de referência.

Entretanto, conforme comenta Nascimento (2015), aplicar a teoria do VECD em ensaios cíclicos, que podem chegar a 10 milhões de pontos de dados, torna-se difícil, pois exige que a pseudo-tensão, a pseudo-rigidez e o dano sejam calculados para todo o histórico de carregamento. Assim, Underwood *et al.* (2009a) propuseram uma nova versão simplificada do modelo de dano contínuo (S-VECD), onde simplificações foram feitas nos cálculos da pseudo-deformação.

Conforme Kim (2009), o S-VECD foi proposto com a finalidade de economia de tempo para caracterização de danos por meio de ensaios cíclicos e, posteriormente, a obtenção do critério de falha por fadiga. A principal vantagem do modelo S-VECD é a derivação rigorosa do modelo VECD, como uma estrutura mecanicamente fechada, o que possibilita implementar

as funções do modelo em uma análise experimental sem fazer ajustes empíricos. Assim, a simulação torna-se mais próximo da realidade. A estrutura do modelo S-VECD pode identificar os efeitos de fatores de mistura, como o teor de asfalto, tamanho do agregado, conteúdo de vazios do ar e fragilização devido ao material reciclado como o RAP. (UNDERWOOD *et al.*, 2009, 2012; SCHUSTER, 2018)

Com a nova abordagem do modelo S-VECD, surgiu a necessidade de se estudar um novo critério de falha por fadiga. Dessa forma, Zhang et al (2013) propuseram um novo cálculo para a previsão de falha por fadiga, que mais tarde, Sabouri e Kim (2014) atualizaram este critério para que toda a história do carregamento fosse considerada. Assim, o G^R é definido como a taxa de mudança da média da energia de pseudo-deformação liberada, por ciclo, através de toda a história do carregamento.

2.2 RECICLAGEM DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

A reciclagem de pavimentos começou a ser explorada no início dos anos 1970, quando ocorreu o embargo do petróleo árabe e os preços dos ligantes asfálticos dispararam, obrigando a indústria da pavimentação a encontrar uma solução para esse aumento de custo. A indústria reagiu a essa situação desenvolvendo tecnologias de reciclagem que possibilitaram a redução da demanda por ligantes asfálticos e dos custos em geral. Algumas das práticas desenvolvidas durante aqueles tempos ainda são utilizadas atualmente e passaram a fazer parte das operações rotineiras de construção e reabilitação de pavimentos no mundo (COPELAND, 2011; ZAUMANIS *et al.*, 2016).

Quando um pavimento em concreto asfáltico perde sua capacidade de suporte e apresenta um estado avançado de danificação, principalmente por fadiga e deformação permanente, é necessário um processo de intervenção e manutenção. O primeiro passo é a retirada deste material danificado, por meio da técnica denominada fresagem, que segundo Bonfim (2007), consiste no “corte ou desbaste” de uma ou mais camadas do pavimento, com espessura pré-determinada visando à restauração de pavimentos. Em se tratando da camada final do revestimento asfáltico, o material também é denominado *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP).

Este material oriundo do processo da fresagem pode ser reaproveitado para diversas finalidades, desde sua incorporação em camadas de bases ou sub-bases como para a produção de novos revestimentos. Ambas as soluções empregadas proporcionam ganhos ambientais e

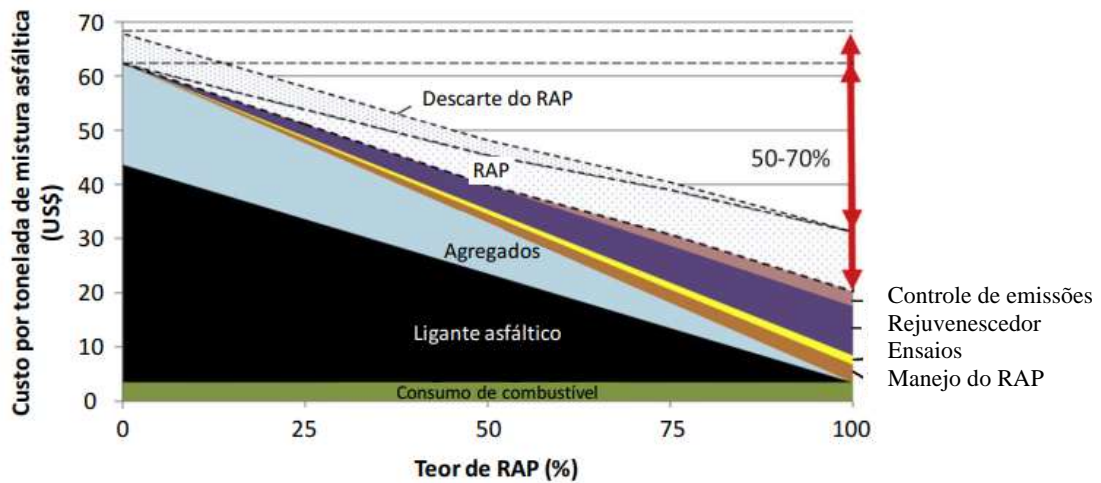
econômicos, pois são uma alternativa sustentável que promovem a redução do consumo de energia, de agregados, ligantes virgens e de gases do efeito estufa (HOY *et al.*, 2017).

Apesar da técnica de reciclagem estar consolidada principalmente nos EUA e nos países Europeus, a quantidade média utilizada no mundo ainda é baixa em revestimentos asfálticos (20,3%), e a utilização de porcentagens mais altas ainda é um desafio (WILLIAMS *et al.*, 2017). Em 2017, na Europa, após aprovação em Assembleia do Conselho Geral, a EAPA (*European Asphalt Pavement Association*) recomendou que a prioridade número 1 de reutilização de asfalto recuperado seja em misturas quentes ou mornas, pois representa um enorme potencial de economia no consumo de novos materiais e energia (EAPA, 2017). A utilização deste material em novos revestimentos é tão promissora que a União Europeia tem por objetivo atingir um mínimo de 50% de RAP em pavimentos de concretos asfálticos até 2020, a partir da recuperação do ligante envelhecido constituinte do resíduo (BONICELLI *et al.*, 2017).

Nos Estados Unidos, em 2017, utilizou-se 76,6 milhões de toneladas de RAP em novos revestimentos, representando um aumento de 36% a mais do que em 2009 (WILLIAMS *et al.*, 2018). A EAPA e a *Federal Highway Administration* (FHWA) do Departamento de Transporte dos Estados Unidos têm trabalhado com a possibilidade de adição de até 100% de RAP em misturas asfálticas “novas” (OSMARI, 2016).

Zaumanis *et al.* (2014) apresentam uma análise econômica e ambiental (Figura 7) que corrobora vantagem econômica da utilização deste material. Foi constatado uma redução de pelo menos 50% em despesas relacionadas a materiais, visto que a maioria dos custos foram provenientes do gasto com ligantes asfálticos. Nos efeitos ambientais, indicou uma economia de 35% de CO₂eq de uma mistura de asfalto 100% RAP em comparação com a mistura nova. Estes dados demonstram o grande benefício de empregar o RAP no lugar de misturas asfálticas compostas exclusivamente de materiais novos.

Figura 7 - Análise econômica da utilização do RAP



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

No Brasil, a reciclagem foi empregada pela primeira vez em 1960 pela Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro, onde o material asfáltico era removido das vias urbanas com marteletes e transportado até usinas para serem misturados novamente (CASTRO, 2003). Trichês *et al.* (2010) afirmam ainda que a técnica da reciclagem dos pavimentos começou a ganhar destaque apenas no início de 1990, os quais relatam indícios de reciclagem a quente in situ do revestimento na rodovia Dutra, e também para recuperar segmentos de malha que necessitavam de acréscimos na sua capacidade estrutural. No entanto, não há dados atuais da utilização deste material tanto em camadas estruturais como em novos revestimentos.

A utilização do RAP em misturas asfálticas apresenta algumas limitações. O primeiro fator se relaciona a variabilidade do material, a nível de ligante e de agregado. De acordo com Genesseeux (2015), sabe-se que a distribuição do ligante em misturas asfálticas é proporcional a superfície específica dos grãos, sendo a maior parte destinada a fração mais fina da mistura quando comparada à fração graúda.

Dessa forma, boas práticas de gerenciamento podem permitir um tratamento adequado do material não homogêneo, que consiste em três etapas: fresagem e processamento, estocagem e amostragem, que permitirão uma maior flexibilidade no projeto de mistura, com relação a granulometria e o teor de ligante. A primeira etapa compreende a escolha do equipamento, da profundidade e da velocidade de fresagem, que podem influenciar na qualidade do RAP, e também o processamento, no qual refere-se à trituração e triagem do material para flexibilização da granulometria (KERKHOF, 2012; ZAUMANIS e MALLICK, 2015).

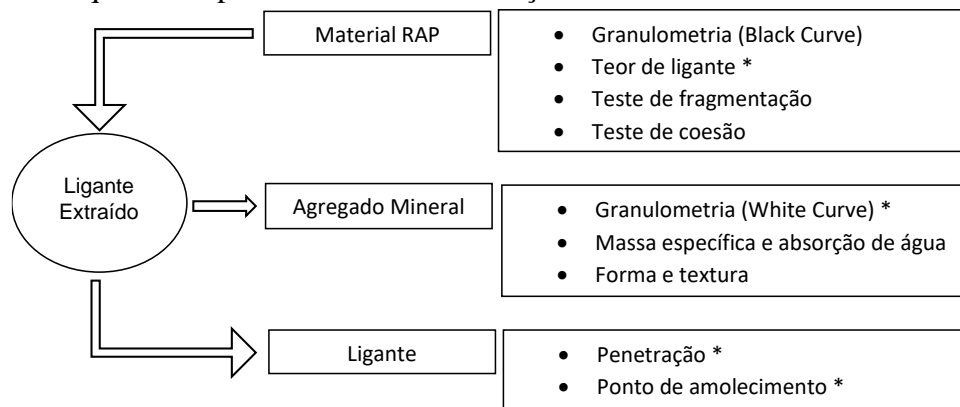
A segunda etapa, que compreende o manuseio e a estocagem do material, é um fator imprescindível para conferir um maior controle tecnológico na dosagem da mistura reciclada

e, conseqüentemente, um comportamento homogêneo do material, uma vez que influenciam na granulometria e no teor de ligante final da mistura. O manuseio deve ser realizado de modo que o material não seja contaminado. Os caminhões responsáveis pelo transporte do material devem estar limpos, e o local onde será realizado a estocagem deve estar livre de sujeiras ou vegetação, sempre cuidando para que não ocorra contato com agentes externos, e de forma a evitar que as pilhas de RAP se misturem com outros materiais (GENESSEAU, 2015; BOHN, 2017; LUZZI, 2019; SUZUKI, 2019).

O bom manejo e organização das pilhas de estocagem do RAP podem produzir uma graduação mais consistente até mesmo que pilhas de estocagem de agregados virgens. Neste caso, o RAP de diferentes fontes pode ser misturado para aumentar a homogeneidade antes do processamento (ESTAKHRI *et al.*, 1999; WEST, 2010).

Por fim, a amostragem do material refere-se à caracterização a fim de projeto e controle de qualidade, devendo ser realizada em vários locais ao redor da pilha com a técnica de retrocesso para determinar suas propriedades e variabilidade (WEST *et al.*, 2013). Essas análises referem-se ao material RAP, o ligante extraído e o agregado resultante, como exemplo o RILEM TC237-SIB “*Protocol for characterization of recycled asphalt (RA) materials for pavement applications*”, proposto por Tebaldi *et al.* (2018) e apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Esquema do protocolo de caracterização do RAP



* Estes testes são realizados em várias amostras (pelo menos 3) para determinar a homogeneidade do RAP

Fonte: Adaptado de Tebaldi *et al.* (2018).

Além da heterogeneidade do material RAP, outro fator que limita o uso deste é relacionado à usinagem das misturas asfálticas recicladas, como a capacidade de produção e a correta inserção deste material na mistura, principalmente em teores elevados de incorporação. Ao utilizar baixos teores de RAP na mistura, até 25%, o aquecimento do RAP é feito por meio

da transferência de calor do contato com o agregado virgem. Para introduzir altas taxas desse material nas misturas é necessário que a usina seja adaptada, pois a alta temperatura do agregado virgem em contato com o RAP pode ocasionar alterações nas propriedades do ligante RAP (GENESSAUX, 2015; LUZZI, 2019).

O último fator limitante refere-se ao ligante RAP, como suas propriedades, ativação e interação com outros materiais. O concreto asfáltico ao longo de sua vida útil passa, além de efeitos relacionados ao tráfego, por um processo de envelhecimento devido à diferentes fatores, como a irradiação solar, ao oxigênio do ar, umidade, entre outros, que promovem diferentes tipos de reações de oxidação. Estes, promovem alterações químicas no ligante, como a perda dos voláteis e a aglomeração dos asfaltenos, resultando em uma maior rigidez e recuperação elástica. Essas características são conferidas às misturas asfálticas à medida que se aumenta o teor de incorporação do RAP, sendo necessário a utilização de ligantes de menor consistência, agentes rejuvenescedores, entre outros (ZAUMANIS, 2014; CRAVO, 2016).

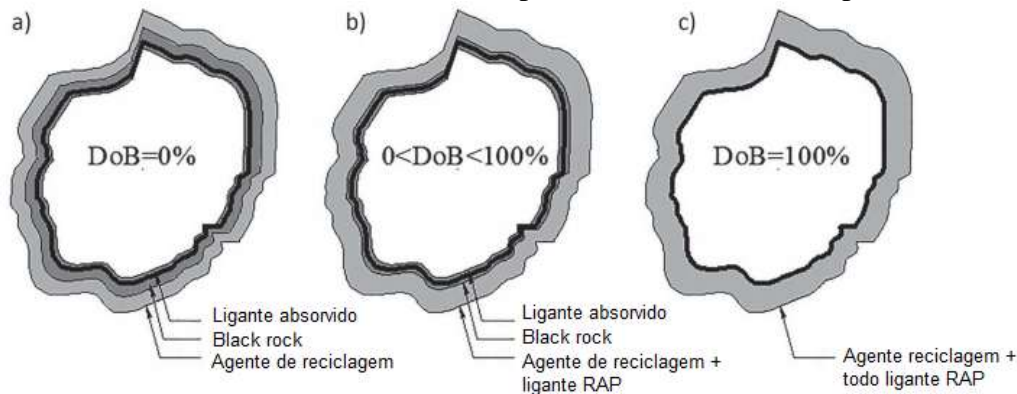
Já a ativação do ligante presente no RAP, chamado de *Degree of binder Activity* (DoA), refere-se a um procedimento de quantificação, ou seja, o quanto do teor de ligante RAP não precisa ser substituído por um ligante virgem. Uma correta previsão desta variável evita um teor de ligante acima ou abaixo do projetado, que resultariam em dano por deformação permanente e fadiga, respectivamente. Este parâmetro é uma propriedade intrínseca do RAP, dependente das condições de processamento (temperatura e tempo de mistura). Recentemente, uma metodologia para quantificar o DoA foi proposta por Pires, Lo Presti e Airey (2019).

Por fim, a interação, chamada *Degree of binder Blending* (DoB), está relacionada a um fenômeno de mistura entre o ligante do RAP e novos componentes, como ligante e agregado virgem, agentes rejuvenescedores, entre outros. Esta variável representa até que ponto as propriedades do ligante RAP contribuem para as propriedades finais da mistura reciclada (LO PRESTI et al 2019; ORESKOVIC et al, 2020). Doyle & Howard (2010) e Lo Presti *et al.* (2019) citam três situações para o DoB, e exemplificadas na Figura 9:

- I. *Agregado negro ou “Black Rock”*: considera que todo o RAP atua como um agregado normal dentro da mistura reciclada, e que 0,0% do ligante é remobilizado;
- II. *Mistura completa*: considera que ocorre uma mistura completa entre o ligante do RAP e o ligante asfáltico virgem adicionado, ou seja, todo o ligante contido no RAP se torna fluido, sendo remobilizado durante a reciclagem;

- III. *Parcialmente utilizado*: uma parte do ligante proveniente do RAP é reutilizado na nova mistura asfáltica, levando-se em consideração diversos fatores, como as propriedades de envelhecimento do ligante, a temperatura, o tempo de envelhecimento e os aditivos.

Figura 9 - Cenários de mistura nula (a), mistura parcial (b) e mistura completa (c)

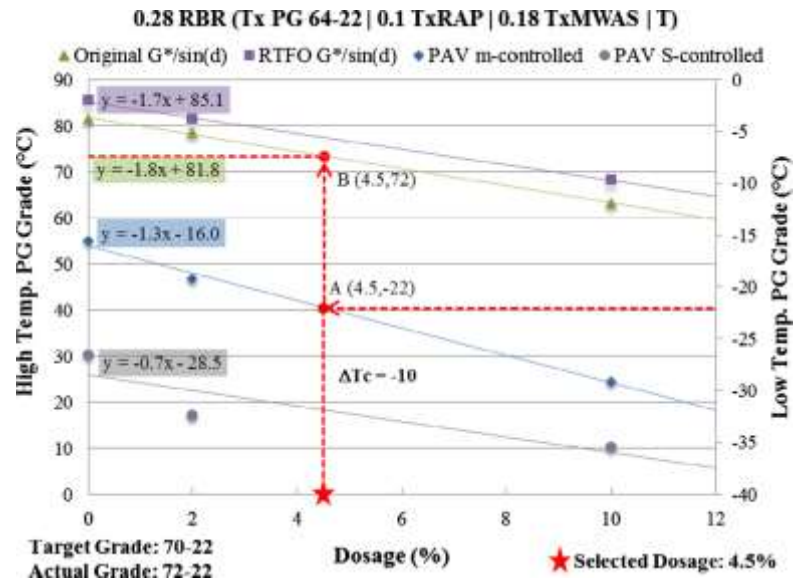


Fonte: Adaptado de Lo Presti *et al.* (2019).

Quando incorporado no concreto asfáltico, a reciclagem pode ser efetuada a quente (HMA, do inglês *Hot Mix Asphalt*), morna (WMA, do inglês *Warm Mix Asphalt*) ou a frio. A escolha da técnica dependerá da natureza do material a ser reutilizado, do seu modo de tratamento (possíveis ofertas de material), e da destinação final do produto (BROSSEAUD, 2011). À quente pode ser realizada utilizando ligante virgem, agente rejuvenescedor (AR) e agregados fresados; à frio utiliza-se EAP (Emulsão Asfáltica de Petróleo), agente rejuvenescedor emulsionado (ARE) e agregados fresados à temperatura ambiente (BERNUCCI *et al.*, 2010). Nas misturas mornas se utilizam aditivos químicos a fim de reduzir a temperatura de mistura e compactação, e ao se combinar com a utilização do RAP evita-se a oxidação do ligante envelhecido em altas temperaturas.

A nível de projeto existem diferentes diretrizes tanto a nível de ligante quanto à mistura. A especificação Superpave, de acordo com a norma AASHTO M 323- 13 - *Superpave Volumetric Mix Design*, não recomenda modificações para projetos de misturas com menos de 15% de RAP. Entre teores de 15% e 25% de RAP incorporado, a especificação aconselha o uso de um ligante virgem com baixa viscosidade. Para a incorporação de RAP em quantidades superiores a 25%, a norma sugere o uso de gráficos de mistura (*blending charts*), como apresentado na Figura 10, com o objetivo de indicar o grau 46 de desempenho (PG) que o ligante virgem deve apresentar para ser utilizado na mistura reciclada.

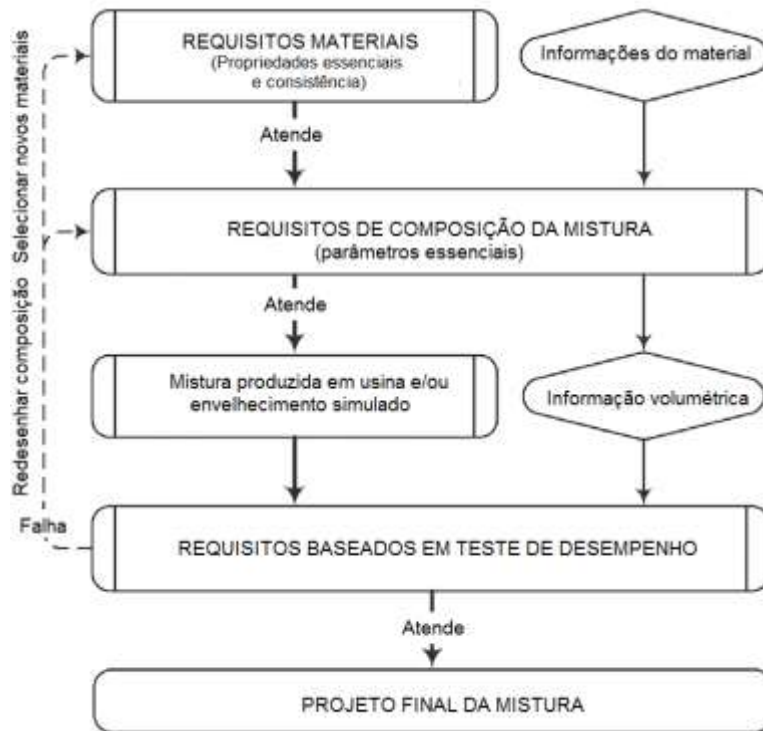
Figura 10 - Exemplo de Blending Charts utilizando o PG do ligante



Fonte: Arambula *et al.* (2018).

A nível de mistura, os métodos de projetos tradicionais baseado em volumetria, adequados aos materiais convencionais, podem não ser aplicados para as misturas recicladas devido aos fatores limitantes citados anteriormente. Diante disso, os princípios de projeto de mistura baseado em desempenho podem ser aplicados para garantir um maior nível de confiabilidade quanto a resistência à danificação destas misturas recicladas, principalmente em relação ao desempenho à fissuração, devido ao efeito das propriedades, ativação e interação do ligante RAP. Esses métodos de teste devem ser escolhidos com base em condições climáticas e de tráfego local, e um exemplo, Figura 11, pode ser encontrado em maiores detalhes em Zaumanis, Poulidakos e Partl (2018).

Figura 11 - Framework para projeto de mistura baseado em desempenho



Fonte: Adaptado de Zaumanis *et al.* (2018).

Para que a utilização de RAP em novas misturas asfálticas seja uma prática corriqueira, estudos e pesquisas estão sendo realizadas a fim de conhecer o comportamento e o desempenho destas misturas em campo. A seguir serão apresentados alguns estudos relevantes sobre essas misturas para este trabalho.

Valdés *et al.* (2011) apresentaram um estudo experimental para caracterizar o comportamento mecânico de misturas betuminosas contendo altas taxas de RAP. No estudo, foram avaliadas duas misturas semi-densas de tamanho máximo de agregado de 12 e 20 mm e contendo 40% e 60% de RAP, respectivamente, usadas para a reabilitação de uma seção de rodovia. Suas propriedades mecânicas foram então estudadas determinando-se o módulo de rigidez e resistência à tração indireta e comportamento de rachaduras e fadiga. Os resultados mostraram que altas taxas de material reciclado levam ao aumento da rigidez e que as leis de fadiga de misturas recicladas e mistura de alto módulo são muito semelhantes.

Gennesseaux (2015) comparou misturas morna e quente com 50% de adição de RAP com misturas morna e quente sem adição de RAP, utilizando CAP 35/50, além de passarem ou não por um processo de envelhecimento. A autora concluiu que é possível considerar uma remobilização do RAP igual ou próxima a 100% nestas misturas, pois ainda possui

propriedades viscoelásticas de ligante asfáltico. Além disso, quanto à rigidez, as misturas contendo 50% de RAP, tanto a quente quanto a morna, obtiveram uma maior rigidez que as demais, fato esse atribuído ao ligante envelhecido contido no material RAP.

Norouzi, Sabouri e Kim (2014) concluíram em seu trabalho que a adição de RAP a uma mistura virgem aumenta a rigidez da mistura porque o ligante envelhecido presente no RAP, torna as misturas mais rígidas e mais frágeis do que as misturas sem RAP. Misturas mais rígidas e mais frágeis podem resultar em fissuras prematuras devido a cargas de tráfego e tensões térmicas em pavimentos flexíveis que contêm altos percentuais de RAP.

Centofante (2016) realizou um estudo com misturas recicladas a quente com o objetivo de avaliar as propriedades mecânicas e de adesividade das misturas. A autora utilizou teores de 10% de adição de fresado, 20% e 30% e comparou os resultados com uma mistura de referência sem adição de agregado reciclado. Para avaliar o comportamento das misturas frente à deformação permanente a autora realizou o ensaio uniaxial de carga repetida, e concluiu que à medida que o teor de fresado incorporado às misturas aumenta, a resistência à deformação permanente também aumenta. Para a avaliação da adesividade, a autora realizou o ensaio *Lottman* Modificado e constatou que apenas a mistura com maior teor de fresado ficou acima dos limites estabelecidos pela metodologia e que a inserção do RAP, que contém ligante envelhecido, não foi favorável à resistência retida à tração (RRT).

Bohn (2017) realizou um estudo com misturas mornas recicladas e diferentes ligantes asfálticos, onde dois teores de RAP (25% e 50%) foram incorporados nas misturas mornas e os dois tipos de ligantes utilizados foram um CAP 50/70 e um AMP 60/85, além de um aditivo químico redutor de temperatura, o Evotherm. Após os ensaios de MR e E^* , a autora concluiu que:

- I. As misturas convencionais e mornas são muito semelhantes;
- II. Que os maiores valores de rigidez foram obtidos para as misturas com maiores taxas de RAP incorporado, onde o RAP diminuiu a parcela viscosa;
- III. Altos teores de RAP combinados com AMP 60/85 aumentam a rigidez das misturas asfálticas estudadas, tanto nas baixas como nas altas temperatura.

Todos estes resultados encontrados pela autora para a rigidez das misturas corroboram com os já citados anteriormente. Em relação a resistência à deformação permanente das misturas, após realizar o ensaio uniaxial de carga repetida, a autora constatou que a incorporação de RAP nas misturas apresentou grande influência nos resultados de FN, o que indica o benefício de incorporar fresado com ligante antigo modificado por polímero para aumentar as propriedades de resistência das misturas asfálticas recicladas mornas. Ainda, a

autora realizou o ensaio de *Lottman* Modificado para avaliar a adesividade, e os resultados encontrados demonstraram com clareza que o efeito do polímero contido no RAP proporcionou melhor desempenho quanto à adesividade, e é perceptível que a combinação com ligante CAP 50/70 apresenta resultados superiores que as misturas com CAP 60/85.

Zubaran e Motta (2015) realizaram uma pesquisa para avaliar o comportamento de misturas recicladas a quente em laboratório e misturas recicladas mornas em uma usina de asfalto preparada para processar o RAP. Os autores desenvolveram cinco projetos de misturas, sendo a primeira constituída apenas de materiais virgens e ligante 30/45. No segundo projeto foi incorporado aproximadamente 30% de RAP na mistura. Os projetos 3, 4 e 5 continham aproximadamente 50% de RAP nas misturas. Dentre as propriedades das misturas analisadas, quanto à deformação permanente os autores concluíram que a inserção do RAP aumentou a resistência ao cisalhamento das misturas asfálticas, principalmente quando se introduziu 50% de RAP, mesmo utilizando um ligante novo com 80% de agente rejuvenescedor.

Sabouri *et al.* (2015) avaliaram o desempenho de misturas RAP a partir da observação do comportamento quanto à porcentagem do RAP inserido e às alterações do teor de ligante e do tipo de ligante e concluíram que, para incorporar altas porcentagens de RAP nas misturas de asfalto, uma possível estratégia seria incluir o uso de um ligante de base macia e controlar o teor ótimo de ligante, ou aumentar a espessura da camada de asfalto. No estudo os autores produziram nove misturas asfálticas em laboratório, dosadas pela metodologia Superpave, sendo utilizados dois tipos de ligantes (PG 58-28; PG 64-28) e teores de RAP de 0%, 20% e 40%. Além disso, os autores variaram o teor ótimo de ligante em -0,5% e +0,5% do teor de projeto ótimo encontrado. Os autores realizaram ensaio de módulo complexo e fadiga, utilizaram o modelo de dano contínuo viscoelástico simplificado (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model - S-VECD*) para avaliar as propriedades de fadiga e o software *Layered ViscoElastic analysis for Critical Distresses - LVECD* para a previsão desta última prever o desempenho de fadiga a longo prazo. Quanto à rigidez, o uso do ligante menos consistente se mostrou como um tratamento promissor entre os diferentes fatores, pois as previsões do software LVECD mostraram uma melhora notável na resistência à fadiga. As previsões do programa LVECD de trincas por fadiga para os pavimentos finos e grossos mostraram claramente que altas porcentagens de RAP podem ser toleradas facilmente depois que a espessura da camada é aumentada.

Norouzi *et al.* (2017) examinaram os efeitos do conteúdo do RAP, e do grau de ligante na rigidez e na resistência à fadiga das misturas de concreto asfáltico. As misturas foram compostas por agregado de tamanho máximo nominal de 12,5 mm e três ligantes asfálticos (PG

64-22, PG 67-22 e PG 76-22). No geral, o valor do módulo dinâmico aumentou à medida que a porcentagem de RAP foi aumentada. O uso de misturas Superpave com um ligante de PG alto e alto teor de RAP elevou a valores de módulo dinâmico à medida que as misturas se tornaram mais rígidas. Ainda, os autores concluíram com seu estudo que as misturas contendo até 30% de RAP melhoraram significativamente a resistência à fadiga das misturas, especialmente para as misturas com graus de ligante de PG 64-22 e PG 67-22. Na pesquisa, foi utilizado o modelo S-VECD, que foi caracterizado para cada mistura usando os resultados dos testes de módulo dinâmico e fadiga. O programa de análise de pavimentos LVECD foi usado para investigar os efeitos do teor de RAP e do grau de ligante no desempenho de fadiga de pavimentos. O modelo S-VECD e as análises do programa LVECD mostraram que a adição de RAP até 30% usando o método do teor ótimo de asfalto corrigido (COAC) melhorou significativamente a resistência à fadiga das misturas, especialmente para as misturas com PG 64-22 e PG 67-22.

Wang, Keshavarzi e Kim (2018) apresentam um estudo para avaliar o desempenho à fadiga de pavimentos contendo RAP por meio de dois testes de carregamento acelerado nos Estados Unidos. O primeiro teste foi realizado na pista de teste da *National center for Asphalt Technology* – NCAT, sendo uma seção de controle e outra com 50% RAP. O segundo teste foi realizado nas pistas da *Federal Highway Administration Accelerated Loading Facility* – FHWA ALF, com uma faixa de controle, uma com 20% de RAP e outra faixa com 40% de RAP. No estudo, ambos projetos possuíam pavimentos correspondentes com e sem misturas RAP que foram construídas sobre a mesma base e subleito e sujeitas às mesmas condições de carga de tráfego e ambiente. As misturas asfálticas nos pavimentos de teste foram caracterizadas usando o modelo simplificado de dano contínuo viscoelástico. O desempenho de trincas por fadiga dos pavimentos foi modelado usando as propriedades do material, estruturas in situ, cargas de tráfego e condições climáticas no FlexPAVE™, um programa tridimensional de elementos finitos viscoelásticos em camadas com análise de carga móvel. As previsões de desempenho resultantes da quebra por fadiga combinaram bem com as observações de campo, sendo que a seção da NCAT com RAP apresentou menor dano por fadiga que à seção de controle. Já para a pista da FHWA ALF, foi observado o comportamento oposto, pois a faixa de controle apresentou menor danificação por fadiga que as faixas contendo RAP. Assim, os autores concluíram que as misturas RAP podem ter um desempenho melhor ou pior que as misturas de asfalto virgem, dependendo do design da mistura e da estrutura do pavimento. E ainda, para entender completamente o comportamento à fadiga de uma mistura de asfalto com RAP, é necessário caracterizar as propriedades do material e realizar análises de pavimentos.

Suzuki (2019) apresenta um estudo da avaliação de diferentes teores de RAP na dosagem e no comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas a quente, para aplicação em camadas de revestimento asfálticos. Inicialmente, a autora avaliou em laboratório misturas, dosadas pela metodologia Marshall, com a incorporação de 0%, 10%, 20%, 25%, 35%, 50% e 65% de RAP sem adição de agente rejuvenescedor, através da realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), dano por umidade induzida (DUI), MR, módulo dinâmico, uniaxial de carga repetida e fadiga na flexão de quatro pontos. O RAP utilizado no estudo foi proveniente da fresagem do revestimento asfáltico da Rodovia Raposo Tavares. No projeto inicial, a camada de revestimento original era composta por 4 cm de concreto asfáltico com graduação descontínua e com asfalto borracha, e 8 cm de concreto asfáltico com faixa granulométrica denominada “Faixa 1 (19 mm)” e ligante asfáltico não modificado. Segundo a autora, o conhecimento da presença de um ligante asfáltico modificado com borracha foi fundamental na interpretação dos resultados obtidos. Ainda, a autora considerou em seu estudo que todo o ligante remanescente no RAP seria ativado e estaria disponível para se misturar com o ligante novo.

Em relação à RT e ao DUI, todas as misturas atenderam aos parâmetros estabelecidos nas especificações do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e do Departamento de Estradas de Rodagem do estado de São Paulo (DER/SP). Observou-se um aumento dos módulos de resiliência (a 25°C) para as misturas com altos teores de RAP, assim como um aumento dos módulos dinâmicos nas zonas de baixas frequências (ou elevadas temperaturas), indicando boa resistência à deformação permanente, o que foi corroborado pelos resultados de flow number. Além disso, com relação à vida de fadiga é possível produzir misturas com altos teores de RAP com propriedades similares a uma mistura convencional, ou até melhor, porém com a adição de um agente rejuvenescedor. Também constatou a importância da qualidade do RAP, pois o aumento de RAP com a presença de ligante modificado com borracha melhorou o desempenho da mistura, conforme aumentou-se o teor de RAP na mistura.

Luzzi (2019) implementou uma usina volumétrica para a incorporação de RAP e avaliou em laboratório as misturas produzidas pela usina. O autor avaliou quatro misturas com 0%, 10%, 20% e 30% de incorporação de RAP, com adição de ligante virgem 60/85 e agregado virgem de origem granítica. O material RAP continha agregados de origem basáltica e ligante modificado por polímero. A avaliação mecânica foi realizada através dos ensaios de MR Módulo Complexo, RT, FN e Fadiga a Tração-Compressão. Além destes, também foram determinadas as características de adesão/coesão através de Dano por Umidade Induzida (DUI) e do Desgaste Cântabro.

Os resultados do ensaio de MR demonstraram que há um aumento de rigidez com o aumento de RAP nas misturas, mas o teor de ligante final encontrado se sobressai, ao se verificar a diminuição de rigidez entre as misturas com 20% e 30% de adição de RAP. No Módulo Complexo, pela modelagem 2S2P1D, não foi possível atribuir o comportamento elástico ou viscoso ao percentual de RAP inserido nas misturas, o que já era esperado pelos baixos teores incorporados. Na RT, foi observado um aumento de resistência com o aumento do percentual de RAP. Já, na análise de deformação permanente, os valores para o FN diminuíram com o aumento do RAP. Nos ensaios de DUI e desgaste não se verificou um comportamento específico de acordo com a incorporação de fresado, mas as misturas recicladas têm resultados semelhantes à convencional. Nos resultados de fadiga, avaliou-se a mistura com 10% de RAP como tendo o melhor comportamento e, a mistura com 30% de RAP, o pior.

De maneira geral, segundo os autores aqui estudados, quanto à rigidez, o aumento do teor de RAP nas misturas foi favorável ao aumento deste parâmetro, tanto nos ensaios de MR como nos ensaios de Módulo Complexo. Os autores afirmam que o aumento da rigidez ocorre devido ao ligante envelhecido presente no RAP.

A resistência à deformação permanente também aumentou com o teor de RAP, ainda que os autores tenham utilizados ensaios e técnicas diferentes. O dano por umidade induzida também foi beneficiado com a incorporação do RAP nas misturas.

Por fim, quanto a resistência à fadiga das misturas recicladas é possível produzir misturas com desempenho à fadiga muito próximo ao de misturas convencionais, ainda que alguns autores tenham encontrado uma piora nesse parâmetro com o aumento do teor de RAP. Cuidados como o controle do tipo de RAP, adição de agentes rejuvenescedores, controle do teor de ligante presente na mistura, o tipo de ligante virgem utilizado na mistura e a estrutura das camadas do pavimento se mostraram fatores preponderantes para a determinação do desempenho à fadiga.

3 METODOLOGIA

O presente capítulo aborda o planejamento da pesquisa, os materiais que foram utilizados, bem como o programa experimental e os métodos de testes.

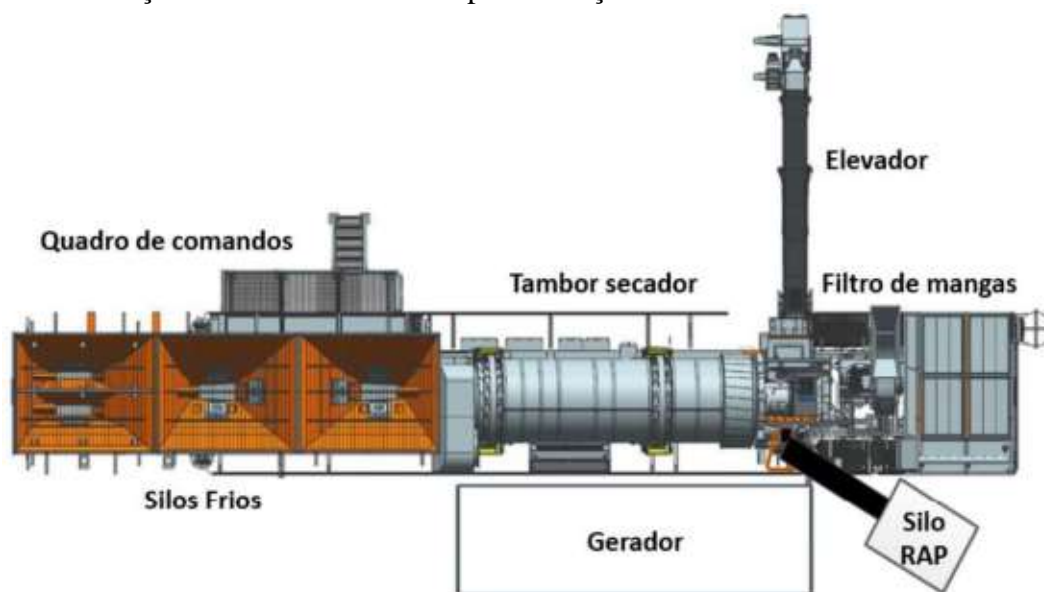
3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

O planejamento da pesquisa foi dividido nas seguintes etapas:

- I. Caracterização dos materiais: escolha e coleta dos agregados, do material RAP e dos ligantes asfálticos;
- II. Dosagem das misturas
- III. Moldagem dos corpos de prova;
- IV. Ensaios laboratoriais: módulo de resiliência, módulo complexo, *flow number*, dano por umidade induzida e fadiga a tração-compressão;
- V. Análise e discussão dos resultados.

Tendo em vista as diferentes problemáticas que envolvem as misturas asfálticas recicladas, este trabalho busca analisar a influência de diferentes fontes de RAP e ligante adicionado no comportamento mecânico destas misturas com diferentes teores de incorporação de RAP. Diante disto, esta pesquisa deu continuidade ao trabalho de Luzzi (2019), onde o autor avaliou quatro misturas com 0%, 10%, 20% e 30% de incorporação de uma fonte de RAP (denominada RAP 60/85), um ligante virgem AMP 60/85 e agregados com origem granítica de Eldorado do Sul. As quatro misturas asfálticas foram produzidas em uma usina volumétrica, com tambor secador e misturador externo, adaptada para que a incorporação do RAP ocorresse diretamente no misturador, conforme Figura 12. Com isso, as misturas usinadas foram conduzidas ao laboratório para fabricação dos corpos de prova para a realização dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR), Módulo Complexo, Resistência a Tração (RT), *Flow Number* (FN), Fadiga a Tração-Compressão, Dano por Umidade Induzida (DUI) e o Desgaste Cântabro.

Figura 12 - Ilustração da usina volumétrica para inserção do material RAP

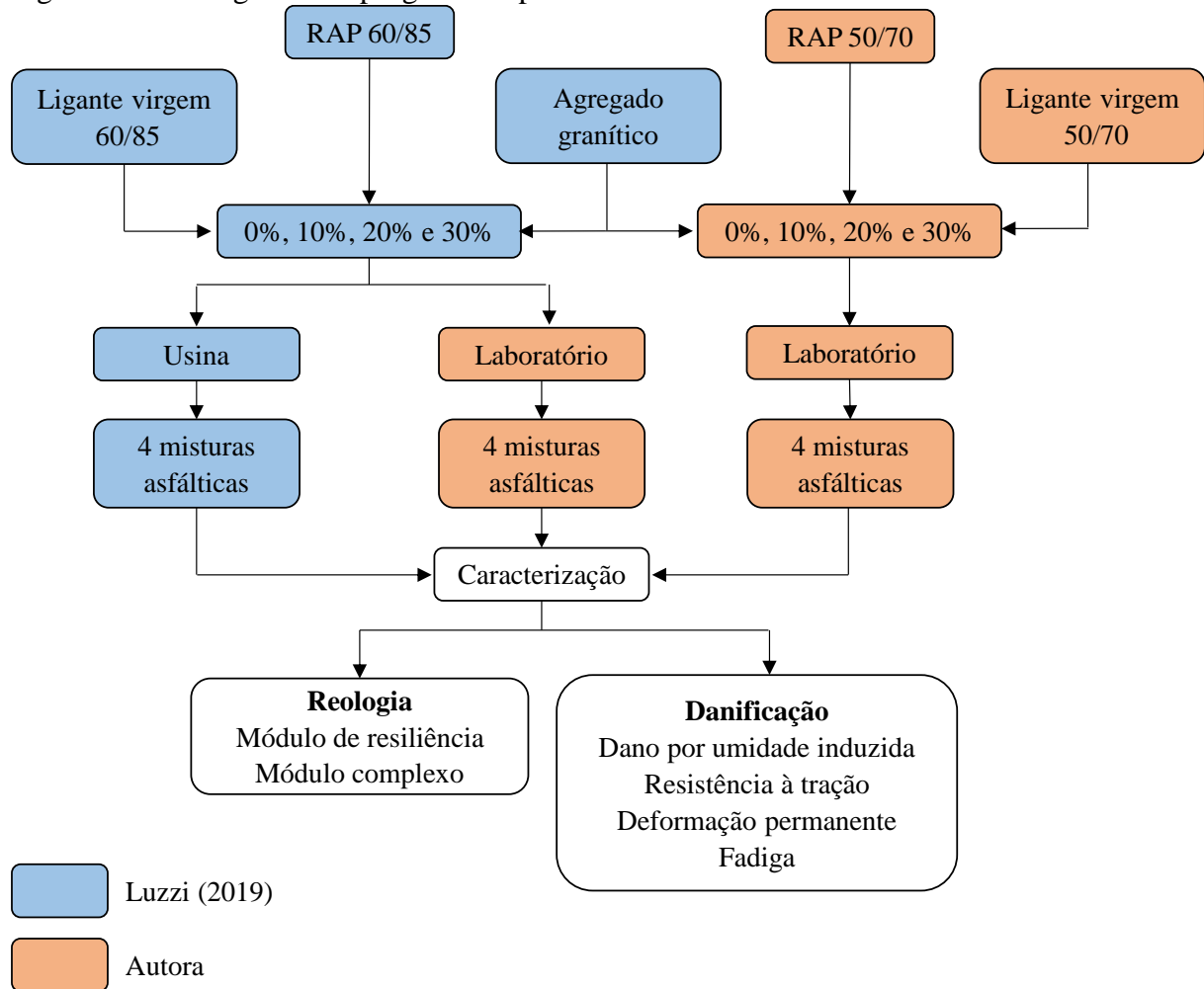


Fonte: Luzzi (2019).

A partir disso, também foram coletados os agregados minerais, o ligante AMP 60/85 e o material RAP 60/85, para a reprodução destas mesmas quatro misturas do autor em laboratório, visando uma comparação do controle de produção campo e laboratório, uma vez que a eficiência de mistura na usina é diferente da mistura em laboratório.

Adicionalmente, foram incorporadas mais quatro misturas no programa experimental, com uma outra fonte de RAP nos mesmos teores de incorporação (0%, 10%, 20% e 30%), denominado RAP 50/70, com um ligante virgem 50/70 e agregados virgens de mesma origem, granítico. Desta forma, além da verificação do controle de produção campo e laboratório, foi possível analisar a influência do tipo e teor de incorporação de RAP e dois ligantes base, nas propriedades reológicas e de dano por deformação permanente, fadiga e umidade. O fluxograma do programa experimental está apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autora.

Tabela 1 - Resumo das misturas que serão utilizadas na pesquisa

| Mistura | Número de amostras por ensaio | | | | | | Total |
|---|-------------------------------|----------------------------|-----------------|-------------|--------------------|--------------------------|------------|
| | Dosagem | Módulo de Resiliência e RT | Módulo Complexo | Flow Number | Lottman Modificado | Fadiga tração-compressão | |
| Referência 50/70 | 15 | 3 | 3 | 3 | 8 | 5 | 37 |
| 10% RAP 50/70 | 15 | 3 | 3 | 3 | 8 | 5 | 37 |
| 20% RAP 50/70 | 15 | 3 | 3 | 3 | 8 | 5 | 37 |
| 30% RAP 50/70 | 15 | 3 | 3 | 3 | 8 | 5 | 37 |
| Referência 60/85 | - | 3 | 3 | 3 | 8 | 5 | 22 |
| 10% RAP 60/85 | - | 3 | 3 | 3 | 8 | 5 | 22 |
| 20% RAP 60/85 | - | 3 | 3 | 3 | 8 | 5 | 22 |
| 30% RAP 60/85 | - | 3 | 3 | 3 | 8 | 5 | 22 |
| Total de amostras para toda a pesquisa = | | | | | | | 236 |

Fonte: Autora.

A seguir, são apresentados e detalhados os materiais utilizados, os métodos de teste, a análise de resultados, bem como as discussões.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais que foram utilizados nesta pesquisa e deram origem às misturas propostas neste trabalho consistem em: duas fontes de material RAP, agregado mineral e dois tipos de ligante asfáltico. Estes materiais estão descritos a seguir.

3.2.1 RAP

Para a presente pesquisa foram utilizadas duas fontes de RAP com o objetivo de estudar a influência do tipo de ligante do RAP nas misturas recicladas.

A primeira fonte do material RAP é originária de um trecho fresado da RS-400, localizado entre os municípios de Candelária e Sobradinho/RS. Esse revestimento possui em sua composição CAP 50/70, de acordo com o Departamento de Estradas e Rodagens do Estado (DAER-RS), e o processo de fresagem ocorreu no mês de maio de 2018. A Figura 14 apresenta imagem do processo de fresagem deste trecho e a condição do pavimento e a Figura 15 apresenta o material em detalhe. A determinação do teor de ligante do RAP 50/70 foi realizada a partir do ensaio de Rotarex (Tabela 2). Não foi possível realizar a recuperação do ligante presente nesse RAP, devido à disponibilidade, até o momento, do equipamento necessário para a realização do procedimento.

Figura 14 - Detalhe do trecho de Candelária e processo de fresagem



Fonte: Autora.

Figura 15 - Detalhes do RAP originário da fresagem do trecho da RS-400



Fonte: Autora.

Tabela 2 - Teor de ligante presente no “RAP 50/70” e massa específica

| Ensaio | Am1 | Am2 | Am3 | Média | DP |
|---------------------|------------|------------|------------|--------------|-----------|
| Teor de ligante (%) | 5,40 | 5,42 | 5,32 | 5,38 | 0,043 |
| Gmm | 2,663 | 2,679 | 2,671 | 2,671 | 0,008 |

Fonte: Autora.

A segunda fonte de RAP é originária da fresagem de dois trechos BR-290/RS e BR-116/RS, entre os municípios de Guaíba e Osório/RS. É um revestimento com agregados do tipo basáltico e, de acordo com Luzzi (2019), possui em sua composição o ligante AMP 60/85. O equipamento utilizado na fresagem do pavimento foi uma minifresadora, a qual gera um RAP de composição granulométrica fina em comparação a uma fresadora tradicional. A Figura 16 apresenta o equipamento utilizado na fresagem e o detalhe do tambor de fresagem e a Figura 17 apresenta o material em detalhe.

Figura 16 - Equipamento utilizado na fresagem e detalhe do tambor de fresagem



Fonte: Luzzi (2019).

Figura 17 - Detalhes do RAP originário da fresagem do trecho BR-290/RS e BR-116/RS



Fonte: Autora.

A verificação do teor e do tipo de ligante asfáltico presente no RAP foi feita pelo autor através do método Abson e os resultados estão apresentados na Tabela 3 e Tabela 4. A partir de ensaios realizados no ligante recuperado, o ligante apresentou um valor considerável de recuperação elástica, indicando a presença de polímero. Além disso, sabe-se que a concessionária responsável por administrar a rodovia à época (CONCEPA) utilizava somente AMP 60/85E em suas operações. A Figura 18 apresenta a localização no mapa dos locais onde foram realizadas as fresagens das duas fontes de RAP.

Tabela 3 - Teor de ligante e massa específica máxima medida das amostras de “RAP 60/85”

| Ensaio | Am1 | Am2 | Am3 | Am4 | Média | DP |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Teor de ligante (%) | 5,13 | 4,81 | 5,10 | 4,75 | 4,95 | 0,20 |
| Gmm | 2,536 | 2,545 | 2,543 | 2,552 | 2,544 | 0,007 |

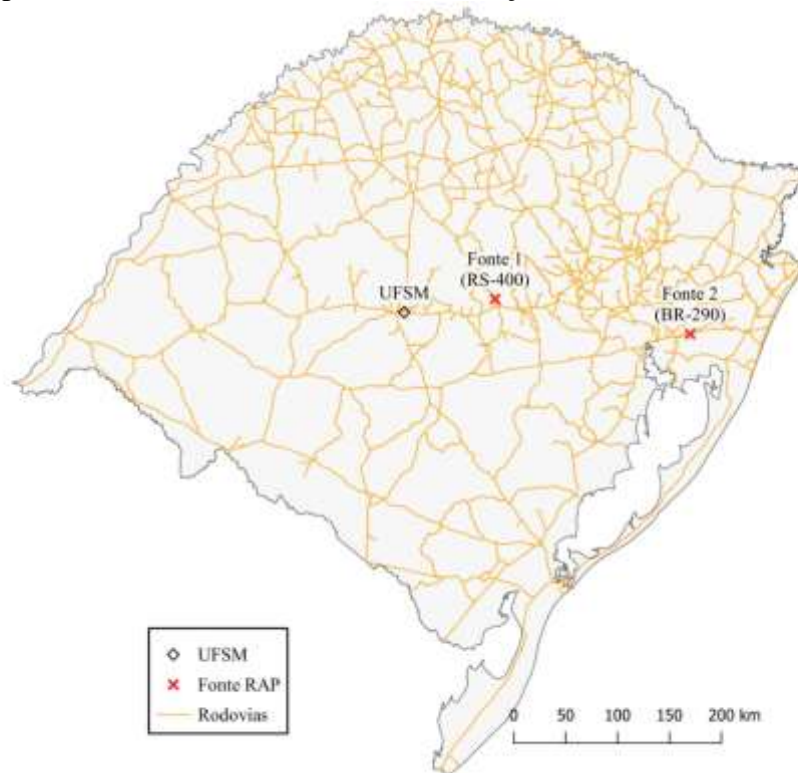
Fonte: Luzzi (2019).

Tabela 4 - Características do ligante presente no “RAP 60/85” após extração pelo método Abson

| Ensaio | Referência | Amostra 1 | Amostra 2 | Média |
|------------------------------|------------|-----------|-----------|--------|
| Recuperação Elástica | >68 | 40 | 38 | 39 |
| Ponto de amolecimento | 55 a 67 | 62 | 79 | 70,5 |
| Penetração a 25°C | 24 a 42 | 26 | 12 | 19 |
| Teor de CAP | --- | 5,0 | 4,2 | 4,6 |
| Viscosidade Brookfield 135°C | <3000 | 1481 | 5706 | 3593,5 |
| Viscosidade Brookfield 150°C | <2000 | 648 | 2057 | 1352,5 |
| Viscosidade Brookfield 177°C | <1000 | 201 | 548 | 374,5 |

Fonte: Luzzi (2019).

Figura 18 - Mapa do Rio Grande do Sul com a localização dos trechos onde ocorreu a fresagem



Fonte: Autora.

Após a coleta de ambos RAPs, eles foram armazenados nos fundos das dependências do Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) da UFSC. Quanto à caracterização dos materiais, foi realizada a análise granulométrica dos dois RAPs. A Tabela 5 apresenta a

média de três amostras para cada RAP. Para ambos materiais foram utilizados o passante na peneira #3/4" nas misturas em estudo, sendo descartado o material retido.

Tabela 5 - Resultado da granulometria dos materiais fresados que serão utilizados nesta pesquisa

| Peneira | mm | Porcentagem média passante (%) | |
|---------|-------|--------------------------------|-----------|
| | | RAP 50/70 | RAP 60/85 |
| 1" | 25,4 | 100,00 | 100,00 |
| 3/4" | 19,1 | 100,00 | 100,00 |
| 1/2" | 12,7 | 100,00 | 98,14 |
| 3/8" | 9,5 | 73,70 | 92,36 |
| n 4 | 4,8 | 57,91 | 69,52 |
| n 10 | 2,0 | 30,15 | 33,88 |
| n 40 | 0,42 | 11,41 | 3,59 |
| n 80 | 0,18 | 3,54 | 0,91 |
| n 200 | 0,075 | 1,60 | 0,21 |

Fonte: Autora.

Com base na análise granulométrica, observa-se uma diferença significativa na granulometria dos dois materiais. Diante disso, a fim de isolar essa diferença, optou-se por separar os materiais em suas frações, as mesmas apresentadas na Tabela 5, para então compor uma granulometria equivalente para ambos os RAPs, tendo por referência o RAP 60/85, utilizado por Luzzi (2019). Os teores de incorporação de RAP são de 0%, 10%, 20% e 30%, sendo a granulometria final das misturas apresentada na seção subsequente.

3.2.2 Agregado Mineral

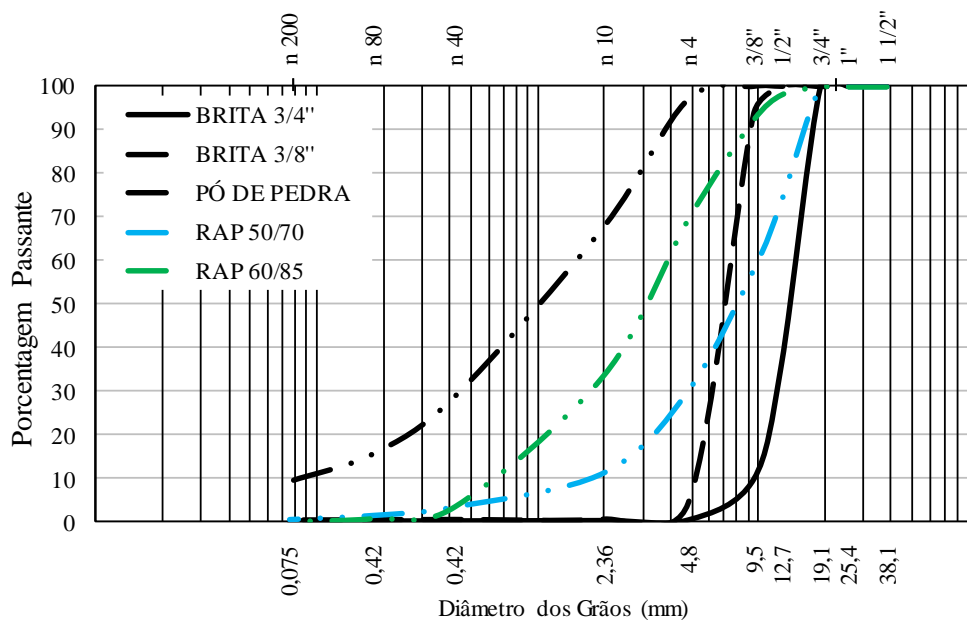
As amostras de agregados utilizadas nesta pesquisa foram recolhidas nas instalações de britagem da Empresa Mineração Eldorado em abril de 2018, localizada no município de Eldorado do Sul. Foram utilizadas as frações brita 3/4", brita 3/8" e pó de pedra. A média das granulometrias dos materiais pétreos está apresentada na Tabela 6. As curvas granulométricas dos agregados estão apresentadas na Figura 19, juntamente com a granulometria dos dois RAPs, e os resultados de caracterização dos agregados minerais estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 6 - Resultado da granulometria dos materiais que serão utilizados nesta pesquisa

| Peneira | mm | Porcentagem média passante (%) | | |
|---------|-------|--------------------------------|------------|-------------|
| | | Brita 3/4" | Brita 3/8" | Pó de pedra |
| 1" | 25,4 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 3/4" | 19,1 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 1/2" | 12,7 | 36,33 | 99,97 | 100,00 |
| 3/8" | 9,5 | 9,96 | 93,66 | 100,00 |
| n 4 | 4,8 | 0,6 | 4,22 | 97,00 |
| n 10 | 2,0 | 0,53 | 0,55 | 67,85 |
| n 40 | 0,42 | 0,46 | 0,47 | 28,67 |
| n 80 | 0,18 | 0,43 | 0,39 | 115,55 |
| n 200 | 0,075 | 0,39 | 0,35 | 9,17 |

Fonte: Autora.

Figura 19 - Curvas granulométricas dos materiais que serão utilizados nesta pesquisa



Fonte: Autora.

Tabela 7 - Ensaios de caracterização do agregado britado

| Ensaio | Am1 | Am2 | Am3 | Média |
|---|-------|-------|-------|-------|
| Avaliação da durabilidade pelo emprego de sulfato de sódio - DNER ME 089/94 (Perda média em %). | 4,61 | 4,68 | 12,14 | 7,14 |
| Índice de forma - DNER - ME 086/94 | 0,70 | 0,74 | 0,71 | 0,72 |
| Abrasão Los Angeles - (NBR 035/98) (%) | 19,99 | 16,31 | 23,12 | 19,81 |
| Equivalente de areia - DNER ME 054/97 (%) | 62,90 | 62,30 | 62,20 | 62,47 |
| Massa específica real ag. Graúdo - DNER 81/98 (g/cm ³) | 2,648 | 2,651 | 2,649 | 2,649 |
| Massa específica aparente ag. Graúdo - DNER 81/98 (g/cm ³) | 2,582 | 2,586 | 2,585 | 2,584 |
| Absorção - DNER 81/98 | 0,96 | 0,95 | 0,94 | 0,95 |
| Massa específica real ag. Miúdo - ASTM C 127/2007 (g/cm ³) | 2,592 | 2,599 | 2,597 | 2,596 |

Fonte: Luzzi (2019).

3.2.3 Ligantes Asfálticos

Nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de ligante asfáltico. O primeiro é um ligante convencional 50/70, distribuído pela REFAP. O segundo ligante asfáltico utilizado é um AMP 60/85E modificado por polímero do tipo SBS, distribuído pela empresa Betunel Asfaltos e teve sua retirada para ensaios junto à empresa Mineração Eldorado. Ambas as propriedades estão apresentadas na Tabela 8 e Tabela 9 para os ligantes 50/70 e 60/85E, respectivamente.

Tabela 8 - Propriedades do CAP 50/70

| Propriedades | CAP 50/70 | |
|------------------------------------|---------------|-----------|
| | Especificação | Resultado |
| Ductilidade a 25 GC | 60 min. | >147 |
| Ind. suscetibilidade térmica | -1,5 a 0,7 | -1,3 |
| Penetração a 25°C, 100g, 5s, dmm | 50 a 70 | 57 |
| Ponto de amolecimento, °C | Mínimo 46 | 48,5 |
| RTFOT Penetração Retida (%) | 55 | 65 |
| RTFOT var em %Massa | -0,50 a 0,50 | 0,053 |
| RTFOT - aum. Ponto amolecimento | 8 max. | 4,8 |
| RTFOT - Ductilidade a 25GC (cm) | 20 min. | >147 |
| Solubilidade Tricloroetileno | 99,5 min. | 100,00 |
| Aquecimento a 177 GC | NESP | NESP |
| Viscosidade Brookfield a 135°C, cp | Mínimo 274 | 300 |
| Viscosidade Brookfield a 150°C, cp | Mínimo 112 | 156 |
| Viscosidade Brookfield a 177°C, cp | 57 a 285 | 60 |
| Densidade relativa, 20/4 GC | 1,000 | - |
| Ponto de fulgor °C | 235 min. | >236 |

Fonte: Possebon (2018).

Tabela 9 - Propriedades do AMP 60/85E

| Propriedades | AMP 60/85 | |
|--|---------------|-----------|
| | Especificação | Resultado |
| Penetração a 25°C, 100g, 5s, dmm | 40 a 70 | 58 |
| Recuperação elástica ductilômetro a 25°C, 20 cm, % | Mínimo 85 | 86 |
| Ponto de amolecimento, °C | Mínimo 60 | 67 |
| Viscosidade brookfield a 135°C, cp | Máximo 3.000 | 919 |
| Viscosidade brookfield a 150°C, cp | Máximo 2.000 | 437 |
| Viscosidade brookfield a 177°C, cp | Máximo 1.000 | 153 |
| Temperatura de mistura, °C | Indicativo | 157 a 163 |
| Temperatura de compactação, °C | Indicativo | 139 a 145 |
| Ponto de fulgor °C | Mínimo 235 | >236 |
| Densidade Relativa, 20/4°C | NA/Anotar | 1,004 |
| Estabilidade na Estocagem – DIF. P. AM., °C | Máximo 5 | 2 |
| PG | 76-22 | 64 |

Fonte: Adaptado laudo Betunel.

3.3 PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

Os procedimentos laboratoriais utilizados nesta pesquisa serão descritos a seguir e abrangem a dosagem das misturas e os demais ensaios que serão realizados.

3.3.1 Misturas asfálticas

As misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa totalizam oito misturas, divididas em dois grupos, as primeiras quatro com ligante virgem 50/70 e RAP da fonte 1, com ligante 50/70 em sua composição, já as outras quatro misturas possuem ligante 60/85E e RAP da fonte 2. Para melhor compreensão e escrita do trabalho, optou-se por adotar uma nomenclatura para cada mistura. A nomenclatura foi escolhida a partir do tipo do ligante virgem adicionado, da fonte do RAP e do teor incorporado de RAP nas misturas. Por exemplo, a mistura com 10% de teor de RAP, com fonte de RAP 50/70 e com ligante 50/70, é chamada de “10 RAP 50/70”. A Tabela 10 um resumo com a nomenclatura escolhida para as misturas.

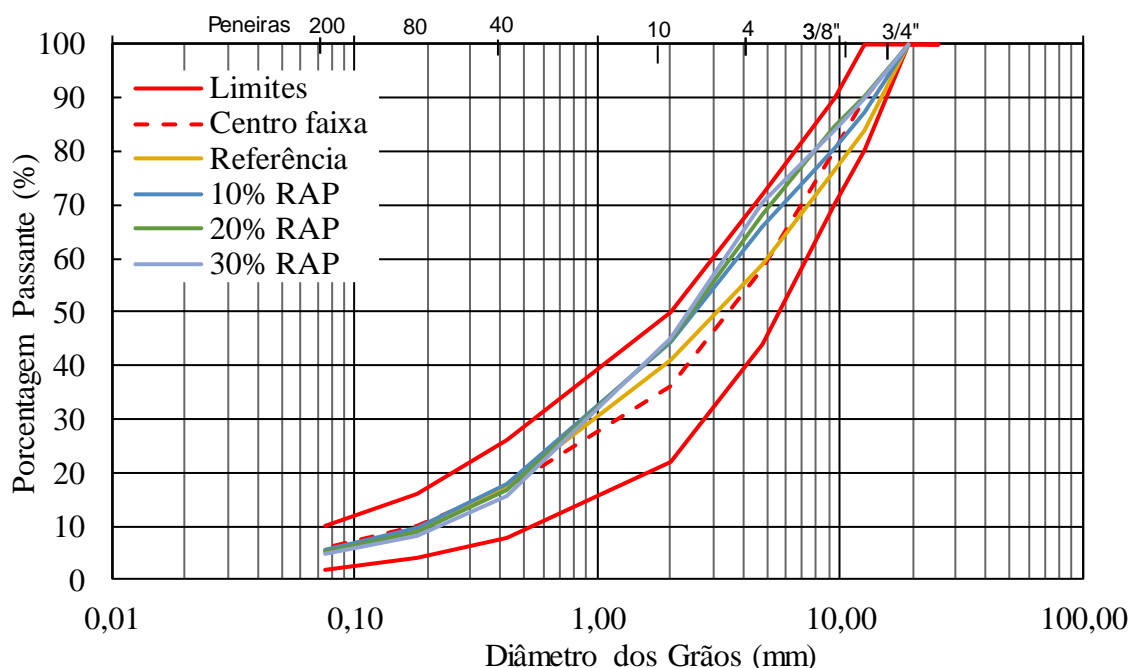
Tabela 10 - Nomenclatura adotada para as misturas estudadas nesta pesquisa

| Ligante | Fonte de RAP | Teor de incorporação | Nomenclatura adotada |
|----------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 50/70 | 1 | 0% | REF 50/70 |
| 50/70 | 1 | 10% | 10 RAP 50/70 |
| 50/70 | 1 | 20% | 20 RAP 50/70 |
| 50/70 | 1 | 30% | 30 RAP 50/70 |
| 60/85 | 2 | 0% | REF 60/85 |
| 60/85 | 2 | 10% | 10 RAP 60/85 |
| 60/85 | 2 | 20% | 20 RAP 60/85 |
| 60/85 | 2 | 30% | 30 RAP 60/85 |

Fonte: Autora.

Como descrito no item 3.2.1, as granulometrias, tanto para as misturas com ligante e RAP 50/70, quanto para as com RAP 60/85, serão as mesmas, permitindo a comparação entre elas, e estão apresentadas na Figura 20.

Figura 20 - Composição granulométrica das misturas



Fonte: Autora.

3.3.1.1 Dosagem Marshall

Luzzi (2019) seguiu a norma DNER ME 043/1995 para a elaboração dos seus projetos e a dosagem realizada a partir da metodologia Marshall. O autor escolheu esta técnica por ainda ser a mais difundida e a de maior conhecimento entre os técnicos de pavimentação brasileiros, facilitando o entendimento para elaboração de projetos, usinagem e controle tecnológico das misturas. Além disso, a metodologia Marshall de dosagem resulta em misturas com um teor de ligante maior que a dosagem SUPERPAVE (ALMEIDA JÚNIOR, 2016; BOEIRA, 2018). Como um dos objetivos da pesquisa também é avaliar o comportamento à fadiga, acredita-se que a dosagem Marshall será mais favorável no desempenho destas misturas frente à danificação por fadiga. Portanto, nesta pesquisa também se optou por utilizar a dosagem Marshall.

A metodologia Marshall de dosagem consiste em um método de compactação por impacto, onde três amostras são compactadas em um molde cilíndrico com 50 ou 75 golpes por face com um soquete de 4.540 g, caindo de uma altura de 457,2 mm, com cinco teores de ligante. Após moldados, pesam-se os corpos de prova ao ar e imerso em água para obtenção dos parâmetros volumétricos. O método considera os seguintes parâmetros: densidade, volume

de vazios, relação entre vazios do agregado mineral preenchido por betume e valores empíricos de estabilidade e fluência. A estabilidade é dada pela carga média, em N (kgf), de pelo menos três corpos-de-prova e a fluência é a média dos valores obtidos em pelo menos três corpos-de-prova, expressa em 0,25 mm.

Nesta pesquisa, foi realizada apenas a dosagem para as misturas contendo o ligante 50/70 e RAP 50/70. A moldagem das quatro misturas contendo ligante 50/70 foi realizada conforme os procedimentos indicados no Método Marshall DNER-ME 043/95, que consistiu na moldagem dos corpos de prova (CP's) com 10cm de diâmetro $6,35 \pm 1,5$ cm de altura, com 75 golpes por face, relativo a um tráfego pesado. A usinagem dos materiais foi realizada no misturador (Figura 21), e os CP's foram moldados no Compactador Marshall.

Figura 21 - Processo de mistura e compactação no compactador Marshall



Fonte: Autora.

Para cada mistura foram moldados três corpos de prova por teor de ligante, de acordo com o seguinte procedimento: o ligante, o agregado mineral e o material RAP foram aquecidos até as condições de temperatura de 155°C, 165°C e 110 °C, respectivamente. O RAP permaneceu nesta temperatura de 2 a 3 horas a fim de evitar o envelhecimento do ligante. Após o aquecimento, os materiais foram introduzidos no misturador mecânico para a usinagem das misturas.

A densidade máxima medida de cada mistura foi obtida pelo método rice (NBR 15619, 2016), e ainda, foram determinados para cada corpo de prova a massa específica aparente

(Gmb) (ASTM D 1188, 2015) e o volume de vazios, sendo a média de três amostras por mistura apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Escolha de teores para a determinação do teor ótimo de ligante a inserir nas misturas

| Mistura | Teor de Ligante (%) | Gmm (t/m³) | Gmb (t/m³) | Volume de Vazios (%) |
|----------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| REF 50/70 | 4,5 | 2,446 | 2,269 | 7,2 |
| | 5,0 | 2,427 | 2,292 | 5,5 |
| | 5,5 | 2,410 | 2,333 | 3,2 |
| | 6,0 | 2,383 | 2,334 | 1,5 |
| 10 RAP 50/70 | 4,5 | 2,442 | 2,284 | 6,5 |
| | 5,0 | 2,419 | 2,316 | 4,3 |
| | 5,5 | 2,404 | 2,331 | 3,0 |
| 20 RAP 50/70 | 4,0 | 2,452 | 2,286 | 6,8 |
| | 4,5 | 2,438 | 2,329 | 4,5 |
| | 5,0 | 2,419 | 2,343 | 3,1 |
| 30 RAP 50/70 | 3,5 | 2,480 | 2,293 | 7,6 |
| | 4,0 | 2,470 | 2,318 | 6,1 |
| | 4,5 | 2,444 | 2,351 | 3,8 |

Fonte: Autora.

Os teores de projetos, apresentados na Tabela 12, foram determinados com base no critério de 4% de volume de vazios, segundo indicação da ES 031 (2006). Nota-se que um aumento no teor de RAP resulta em uma menor adição de ligante virgem, o que decorre da ativação do ligante envelhecido presente no RAP.

Tabela 12 - Teores de projeto para as misturas com ligante 50/70

| Mistura | Teor de ligante novo a inserir (%) | Teor de ligante do RAP (%) | Teor de ligante total esperado (%) |
|----------------|---|-----------------------------------|---|
| REF 50/70 | 5,35 | 0,00 | 5,35 |
| 10 RAP 50/70 | 5,10 | 0,54 | 5,64 |
| 20 RAP 50/70 | 4,65 | 1,08 | 5,73 |
| 30 RAP 50/70 | 4,50 | 1,61 | 6,11 |

Fonte: Autora.

Ao comparar os resultados das misturas REF 50/70 e 10 RAP 50/70 para teor de ligante total esperado, verifica-se que a mistura com 10% de RAP possui uma diferença de 0,29% de ligante da mistura de referência. Dessa forma, observa-se que há uma mobilização do ligante presente no RAP (PIRES, LO PRESTI E AIREY, 2019), sendo possível propor uma equação

para inferir o valor da quantidade de ligante presente no RAP que foi reativado nas misturas, chamada de taxa de reativação do ligante (Equação 7):

$$\text{Taxa de reativação do ligante}_{\text{Mistura RAP}} = \frac{\text{teor de (ligante - ligante)}}{\text{teor de ligante do RAP}} = \frac{\text{total}_{\text{RAP}} - \text{total}_{\text{REF}}}{\text{teor de ligante do RAP}} \quad (7)$$

Assim, para a mistura de 10% de RAP:

$$\text{Taxa de reativação do ligante}_{10\text{RAP}} = \frac{(5,64 - 5,35)}{0,54} = 0,53$$

Assim, seria possível inferir que 53% do ligante disponível no RAP foi reativado para a mistura com 10% de RAP. Analogamente, aplicando a Equação 7 para as misturas com 20% de RAP e 30% de RAP, tem-se, respectivamente, 35% e 47% de taxa de reativação do ligante presente no RAP.

Nas misturas com RAP e ligante modificado por polímero, foram utilizados os resultados obtidos das dosagens de Luzzi (2019), pois se trata dos mesmos materiais. Porém, para a escolha do teor de projeto foi fixado o Vv em 4%, para permitir a comparação com as demais misturas. Dessa forma, os teores de projetos encontrados nesta pesquisa divergiram um pouco dos teores encontrados pelo autor. A Tabela 13 apresenta os teores de projeto escolhidos nesta pesquisa e os teores encontrados por Luzzi (2019), juntamente com os teores que o autor obteve após usar suas misturas.

Tabela 13 - Comparação entre os teores de projeto encontrados nesta pesquisa para as misturas com ligante 60/85, e os teores encontrados por Luzzi (2019)

| Mistura | Teor de ligante novo a inserir (%) | Teor de ligante do RAP (%) | Teor de ligante total esperado (%) | Teor de ligante projetado (%) | |
|--------------|------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|-------------------------------|--|
| | | | | Luzzi (2019) | Teor de ligante obtido após usinagem (%) Luzzi (2019) |
| REF 60/85 | 5,75 | 0,00 | 5,75 | 5,65 | 5,01 |
| 10 RAP 60/85 | 5,50 | 0,50 | 6,00 | 5,80 | 4,89 |
| 20 RAP 60/85 | 5,00 | 0,99 | 5,99 | 5,84 | 4,87 |
| 30 RAP 60/85 | 4,10 | 1,49 | 5,59 | 5,36 | 5,39 |

Fonte: Autora.

É possível perceber que o autor obteve diferença nos teores encontrados após a usinagem para os teores de projeto, excetuando-se a mistura com 30% de material fresado, as demais não se enquadraram no teor de projeto esperado. Além disso, pode-se notar que os valores encontrados nesta pesquisa ficaram um pouco maiores que os valores encontrados pelo autor.

Também é possível inferir sobre a taxa de ligante presente no RAP que foi reativado. Assim, aplicando a Equação 7, proposta anteriormente, para a mistura 10 RAP 60/85, tem-se:

$$\frac{\text{Taxa de reativação do ligante}_{10RAP}}{0,5} = \frac{(6,00 - 5,75)}{0,5} = 0,50$$

Dessa forma, pode-se dizer que 50% do ligante presente no RAP foi reativado. Da mesma forma, para as misturas 20 RAP 60/85 e 30 RAP 60/85, foram obtidas as seguintes taxas de reativação de ligante, respectivamente, de 50%, 24% e 107%.

3.3.2 Ensaios de deformabilidade

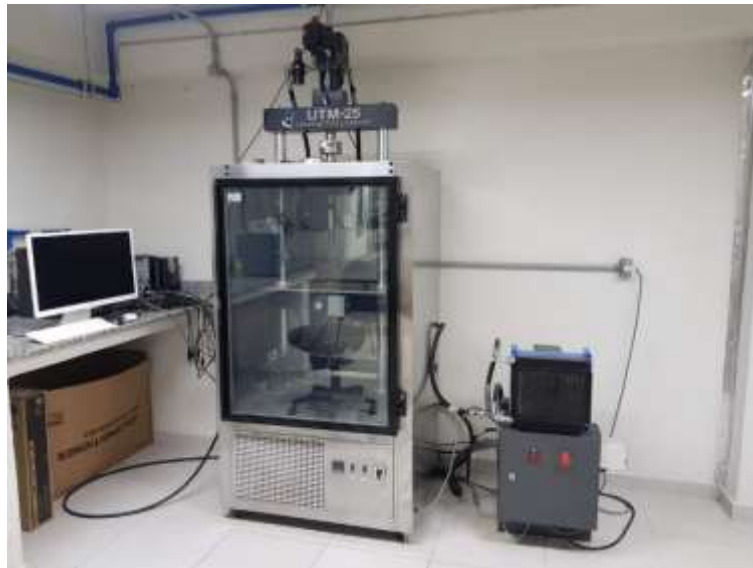
Neste trabalho foram realizados os ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e Módulo Complexo (E^*) com o objetivo de analisar e determinar as características das misturas estudadas quanto à deformabilidade.

3.3.2.1 Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência (MR) seguiu os procedimentos descritos pela norma DNIT – ME 135/2018, e determina a capacidade que um corpo elástico tem de armazenar energia e retornar ao seu estado inicial após sofrer a solicitação de um carregamento.

Para a realização deste ensaio foi utilizada a prensa *Universal Testing Machine UTM – 25* (Figura 22). A prensa é composta por um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante, com auxílio de um dispositivo hidráulico, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. Além disso, os corpos de prova utilizados neste ensaio foram moldados com um Vv de $4\pm 1\%$ e com dimensões de aproximadamente 6,4 cm de altura e 10 cm de diâmetro.

Figura 22 - Prensa UTM 25 utilizada no ensaio de MR



Fonte: Autora.

O módulo de resiliência é medido a partir da aplicação do carregamento dinâmico com tempo de 0,1s de duração e 0,9s de repouso. Este tipo de aplicação de carga simula o efeito do tráfego, o qual aplica cargas transientes do movimento dos veículos. Dessa forma, a amostra sofre deformações horizontais, medidas através dos dois LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*). O carregamento utilizado é o mínimo suficiente para deformar a amostra.

Na prensa, os corpos de prova foram condicionados a 25°C, por no mínimo 12 horas, e após foram ensaiados. Cada corpo de prova é encaixado no suporte para posicionar os LVDTs em sua face, alinhando-os na vertical, (Figura 23). O coeficiente de Poisson para este ensaio foi fixado em 0,30. A média das leituras dos cinco últimos pulsos de carga é o resultado obtido para o MR. Após este ensaio, essas mesmas amostras foram ensaiadas à Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT).

Para o cálculo do MR, foi utilizada a seguinte Equação 8:

$$M_R = \frac{P}{\Delta h} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (8)$$

Onde:

M_R = módulo de resiliência (MPa);

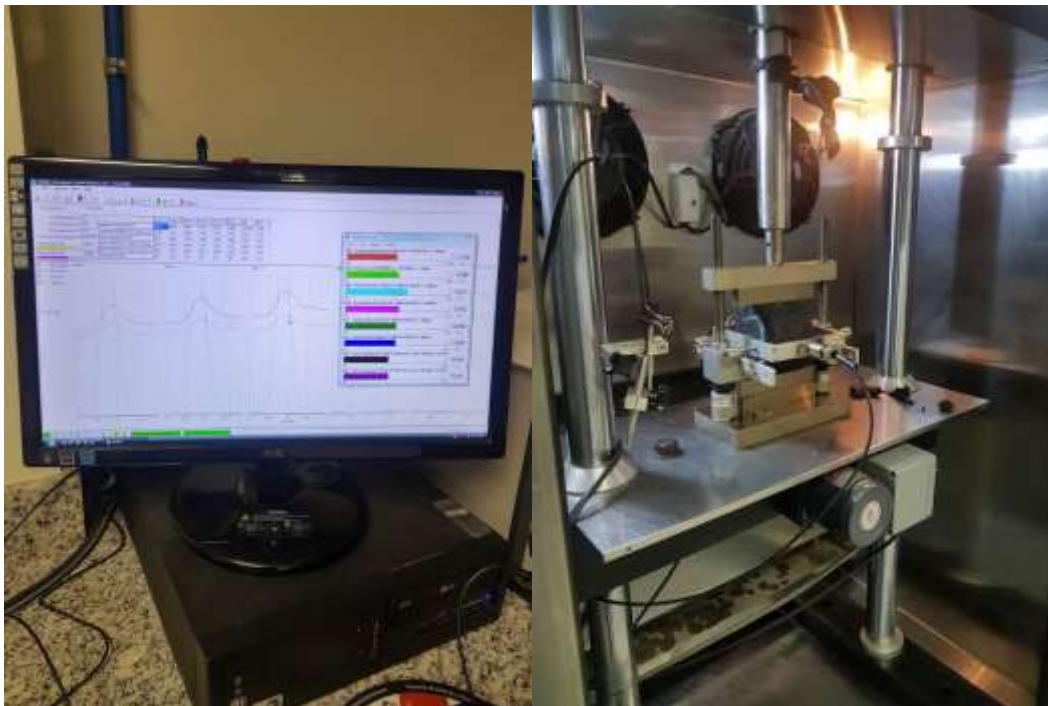
P = varga vertical repetida aplicada diretamente no corpo-de-prova (N);

Δ = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga (P) (mm);

h = altura do corpo-de-prova (mm);

μ = coeficiente de Poisson.

Figura 23 - Detalhe do ensaio de MR



Fonte: Autora.

3.3.2.2 Módulo Complexo

O ensaio de módulo complexo foi realizado com o intuito de avaliar a rigidez das misturas. Este ensaio permite a avaliação do comportamento do material em diversas temperaturas e frequências e consiste na aplicação de uma carga uniaxial senoidal em corpos de provas cilíndricos, onde a rigidez e o ângulo de fase são determinados dentro do regime viscoelástico linear. Segundo Nascimento (2008), a relação tensão-deformação é definida pelo Módulo Complexo (E^*), cujo valor absoluto, $|E^*|$, é definido como Módulo Dinâmico, e a defasagem entre a aplicação de carga e a resposta da amostra é o ângulo de fase da mistura asfáltica (δ).

O condicionamento das amostras, bem como toda a realização do ensaio, seguiu os preceitos da norma AASHTO T 342 - 11 – *Determining Dynamic Modulus of Hot mix Asphalt Concrete Mixtures*. Para a realização do ensaio foi utilizada a prensa hidráulica. As amostras para as oito misturas propostas neste trabalho foram moldadas no Compactador Giratório Superpave (CGS) de acordo com os teores de projetos definido pela dosagem Marshall, com dimensões de 10x15cm e um volume de vazios de $5,5\% \pm 0,5\%$, sendo necessário 2 copos de prova por mistura.

Para a realização do ensaio, primeiramente foi necessário realizar a colagem de pinos que fixam o conjunto dos três LVDT's, que farão a leitura dos deslocamentos verticais. Após, as amostras foram condicionadas por determinado tempo conforme a temperatura de realização do ensaio, indicado na Tabela 14. Após o condicionamento, as amostras foram ensaiadas em todas as frequências de carregamento que o software disponibiliza (25 Hz, 20 Hz, 10 Hz, 5 Hz, 2 Hz, 1 Hz, 0,5 Hz, 0,2 Hz, 0,1 Hz e 0,01 Hz) e nas temperaturas de - 10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C. A Figura 24 apresenta a realização o ensaio.

Tabela 14 - Tempo mínimo recomendado de estabilização da temperatura das amostras ensaiadas

| Temperatura de ensaio (°C) | Tempo para equilíbrio da temperatura a partir da temperatura da sala de ensaio de 25°C (h) | Tempo para equilíbrio da temperatura a partir da temperatura de teste anterior (h) |
|----------------------------|--|--|
| -10 | Uma noite | Uma noite |
| 4 | Uma noite | 4 horas ou uma noite |
| 21 | 1 | 3 |
| 37 | 2 | 2 |
| 54 | 3 | 1 |

Fonte: Adaptado de AASHTO T 342.

Figura 24 - Detalhe da realização do ensaio de módulo dinâmico



Fonte: Autora.

Para atingir o regime viscoelástico linear foi fixada uma deformação entre 50 e 75 microstrains, o que garante a integridade das amostras, visto que elas não sofrem deformação plástica nesse intervalo.

Após a obtenção dos resultados do ensaio, os dados experimentais foram ajustados pelo modelo matemático 2S2P1D (2 *Springs*, 2 *Parabolic*, 1 *Dashpot*), que consiste na combinação dos seguintes elementos físicos: 2 molas, 2 elementos parabólicos e 1 amortecedor, proposta por Di Benedetto *et al.* (2004). Os resultados experimentais foram expressos em curva mestra de módulo dinâmico, ângulo de fase, espaço Cole Cole e diagrama Black.

3.3.3 Ensaio de dano por umidade induzida

Para a análise da propriedade de adesividade/coesão das misturas, foi realizado o ensaio de dano por umidade induzida (DUI) ou *Lottman* Modificado. Sua metodologia está descrita a seguir e a análise dos resultados serão apresentados no Capítulo 4, onde os resultados serão comparados com valores encontrados na literatura para outras misturas recicladas.

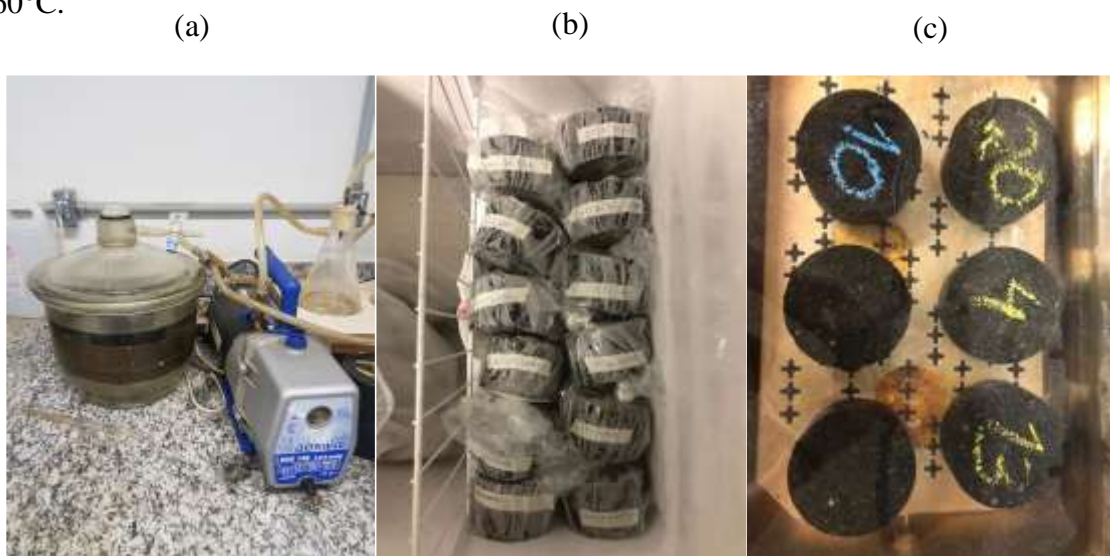
O ensaio de dano por umidade induzida avalia o dano causado pela umidade através da relação de Resistência Retida à Tração (RRT). No Brasil, o ensaio para a avaliação da ação deletéria da água segue os procedimentos descritos nas normas AASHTO T 283- 14 - *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture - Induced Damage* e a norma brasileira ABNT/NBR 15617:2011 – Misturas Asfálticas - Determinação do Dano por Umidade Induzida. O objetivo do ensaio é avaliar, a longo prazo (4 a 12 anos), a durabilidade das misturas asfálticas, em relação à propriedade da adesividade ligante/agregado.

Para a realização deste ensaio, foram moldadas um total de seis amostras por mistura, com volume de vazios de 7% \pm 1%, divididas em dois grupos. No primeiro grupo, as três primeiras amostras são saturadas por meio da aplicação de vácuo na faixa de 13 kPa a 67 kPa de pressão absoluta, com grau de saturação entre 70% e 80%, conforme Figura 25(a). Posteriormente a aplicação de vácuo, estas amostras foram embaladas e condicionadas a temperatura de -18°C por um período mínimo de 16h, esta temperatura leva o corpo de prova ao congelamento, Figura 25(b). Então, foram removidas da refrigeração e imersas em água destilada, à temperatura de 60°C, por um período de 24h (Figura 25c). Por fim, os corpos de provas foram imersos em água a uma temperatura de 25°C por um período de 2h, sendo, após,

submetido ao ensaio de RT. No segundo grupo, as amostras foram condicionadas a 25°C por 16h e então submetidas ao ensaio de RT.

Então, a RRT é definida pela razão da resistência à tração da amostra condicionada (RT_2) pela resistência à tração de amostras sem condicionamento (RT_1), para obter a porcentagem de perda de força e, assim, avaliar o potencial de susceptibilidade à umidade. Esta relação (RT_2/RT_1) indica a perda de resistência por umidade induzida, que não deve ser inferior a 0,70, ou seja, ter perda maior ou igual a 30%.

Figura 25 - Etapas de saturação dos corpos de prova (a) congelamento a -18° (b) e banho-maria a 60°C.



Fonte: Autora.

3.3.4 Ensaios para a avaliação do dano nas misturas

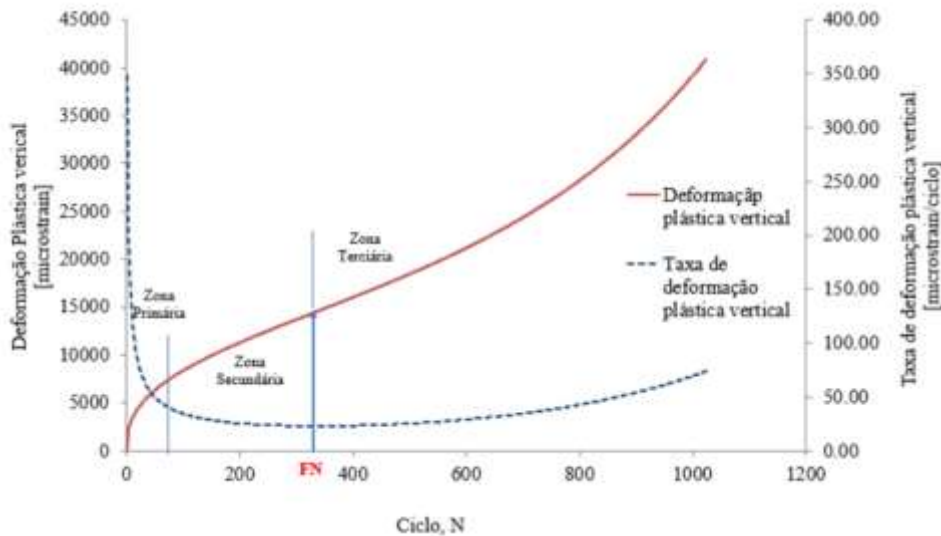
Neste item serão apresentados e descritos os ensaios realizados para a avaliação do dano causado nas misturas. Para tal, foram realizados os seguintes ensaios: Ensaio uniaxial de carga repetida e Fadiga a Tração-Compressão.

3.3.4.1 Ensaio uniaxial de carga repetida (*Flow Number*)

A avaliação da resistência à deformação permanente das misturas estudadas foi realizada através do ensaio uniaxial de carga repetida, que consiste na aplicação de cargas cíclicas na direção axial de amostras cilíndricas, onde é aplicado um carregamento de 0,1s e repouso de 0,9s (ZUBARAN, 2014). Durante a realização do ensaio obtém-se a curva

deformação permanente acumulada *versus* número de ciclos (Figura 26), sendo dividida em três zonas: primária, secundária e terciária. A zona de interesse é da segunda para a terceira, ponto em que começa a ocorrer cisalhamento constante definido como *Flow Number* (FN). O ensaio foi conduzido pela norma ABNT NBR 16505:2016 - Misturas asfálticas – Resistência à deformação permanente.

Figura 26 - Curva deformação permanente *versus* número de ciclos



Fonte: Barros (2017).

O ensaio também foi realizado na prensa hidráulica a uma temperatura de 60°C, com uma tensão de 204 kPa e com tempo de aplicação de carga de 0,1s e tempo de repouso de 0,9s, com critério de parada em 5% de deformação ou 7200 ciclos. A Figura 27(a) apresenta a deformação que as amostras sofreram, e a Figura 27(b) apresenta a amostra após finalização do ensaio. A curva de deformação plástica vertical uniaxial foi ajustada conforme modelo de Francken, Equação 7, no qual o FN corresponde à derivada segunda.

$$\varepsilon_p = AN^B + C(e^{DN} - 1) \quad (9)$$

Onde:

N = Número de ciclos;

A, B, C e D = Constantes do modelo de Francken determinados para cada amostra.

Figura 27 - Exemplo de amostra sofrendo deformação (a) e amostra ao término do ensaio (b)



Fonte: Autora.

3.3.4.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A determinação da resistência à tração por compressão diametral foi realizada conforme a norma DNIT 136/2018 - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio. O ensaio consiste na aplicação de uma carga estática distribuída ao longo de um cilindro, em duas geratrizes opostas que geram tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro.

O ensaio foi conduzido nas amostras submetidas ao ensaio de Módulo de Resiliência, sendo suas dimensões de 64mm de altura e 100mm de diâmetro. Para a realização do ensaio, cada amostra foi condicionada à uma temperatura de 25°C e apoiada sobre uma geratriz e então a carga foi aplicada e o valor obtido é a resistência à tração, dada pela Equação 9. A Figura 28 ilustra o ensaio de RT realizado na prensa Marshall.

$$RT = \frac{2.F}{\pi.D.H} \quad (10)$$

Onde:

RT = a resistência à tração;

F = Força obtida pelo produto da constante do anel com o valor máximo atingido pelo extensômetro do anel dinamométrico durante o ensaio;

D = Média de quatro medidas do diâmetro da amostra;

H = Média de quatro medidas da altura da amostra

Figura 28 - Ensaio de RT



Fonte: Autora.

3.3.4.3 Fadiga à Tração–Compressão Uniaxial

No ensaio de Fadiga à Tração-Compressão Uniaxial, uma deformação cíclica senoidal de amplitude constante é aplicada na amostra até que ocorra a ruptura ou defasagem desta. O ensaio seguiu as prescrições da norma AASHTO TP 107-14 - *Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*. Foram coletados e monitorados o deslocamento do atuador, a deformação, a carga, as temperaturas de núcleo e superfície, o ângulo de fase e o módulo dinâmico da amostra ensaiada.

Para este ensaio foram moldadas 5 amostras por mistura no compactador giratório Superpave (CGS), nos teores de projeto determinados pela dosagem Marshall, nas dimensões 10x17cm e com V_v de $5,5 \pm 0,5\%$. O ensaio também foi realizado na prensa hidráulica,

utilizando o aparato de ensaio desenvolvido por Boeira (2018). Este aparato de ensaio consiste em duas placas, que são fixadas por meio de parafusos na prensa, e uma rótula de tração.

As amostras foram cortadas e retificadas para uma dimensão final de 10 x 13cm, sendo coladas as placas “*top e down*” nas amostras através de gabaritos. Após o tempo de secagem da cola, procedimento que dura em torno de 20h, as amostras foram condicionadas a 19°C por no mínimo 3h. Então, o conjunto amostra + placa é conectado na prensa hidráulica utilizando parafusos e rótula de tração e é ensaiado. A Figura 29 apresenta o processo de colagem das placas no corpo de prova e a realização do ensaio com o equipamento.

Figura 29 - Processo de fixação das chapas nas amostras e realização do ensaio na prensa



Fonte: Autora.

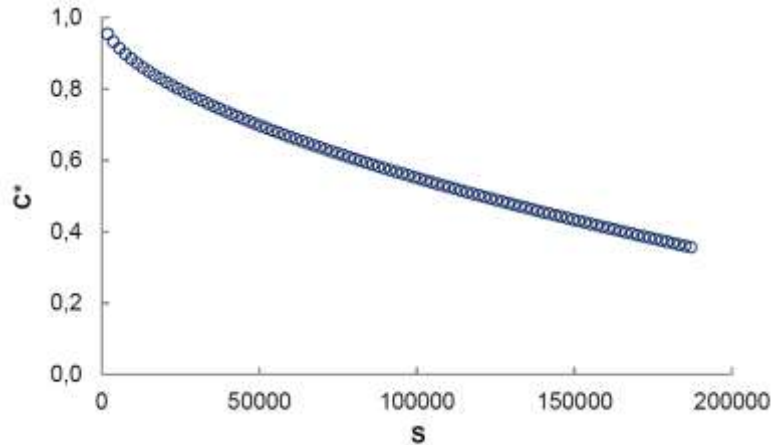
O ensaio é dividido em duas etapas. A primeira, denominada *fingerprint*, consiste em determinar o módulo dinâmico de cada amostra, para obter a variação de rigidez entre estas, através da aplicação de um pequeno carregamento realizado à tração-compressão, controlando as deformações, estas variando entre 50 a 75 μ m, medidos através dos LVDTs.

Na segunda etapa do ensaio, o atuador é programado para chegar a um deslocamento de pico constante em cada ciclo de carga, até que ocorra a ruptura. O critério de falha utilizado nesta pesquisa foi proposto por Kim *et al.* (2003) e é definido como o ponto de inflexão na curva de ângulo de fase versus número de ciclos.

De posse dos dados, foi possível aplicar o modelo S-VECD, através do MATLAB, compilando os dados obtidos no ensaio de cada amostra, gerando a curva característica de dano

e prevendo a falha por fadiga do material. Para maiores informações sobre a rotina de cálculo, reportar a Schuster (2018), Figura 30.

Figura 30 - Gráfico típico da Curva Característica de Dano (C versus S)



Fonte: Nascimento *et al.* (2014).

Com os resultados obtidos do ensaio de fadiga tração - compressão, também foi possível elaborar as curvas de Wöhler de cada mistura, as envoltórias de ruptura G^R vs. N_f , as curvas utilizando a equação proposta por Nascimento (2016), que permitiu calcular o fator de fadiga da mistura (FFM) e elaborar um ranqueamento das misturas com outros valores encontrados na literatura.

Também foi realizado uma avaliação mecanicista pelo software LVECD. O software baseia-se nos resultados obtidos através do modelo S-VECD para simular a resposta do pavimento sob ação das condições de clima e tráfego. Também são utilizados no software os valores de módulo dinâmico, para a consideração dos efeitos viscoelásticos, extraídos a partir do modelo 2SP1D a 19°C e 10Hz do módulo complexo realizado anteriormente.

A estrutura dimensionada foi a mesma para todas as oito misturas, sendo o revestimento com espessura de 10cm e o período simulado foi de 10 anos (120 meses). Para permitir uma comparação, as estruturas foram avaliadas com os mesmos parâmetros de Luzzi (2019): com clima da região de Curitiba/PR (mais próxima no software), as camadas consideradas aderidas entre si, carga de um eixo padrão (8200 Kgf), distância entre rodas de 0,325m e pressão dos pneus de 0,56 MPa distribuídos sobre uma área circular. Os coeficientes de Poisson utilizados estão de acordo com o sugerido por Balbo (2007), onde: 0,35 para o revestimento; 0,30 para a camada de base (BGS); 0,40 para a camada de sub-base (Macadame seco); 0,45 para o subleito. Os valores de MR das camadas de base e sub-base foram os de Ribas (2014) e os módulos de resiliência do subleito de Santos (2015), que estudou solos do estado do Rio Grande do Sul.

Ainda, para a estrutura foi considerado os parâmetros USACE de tráfego de 1×10^7 repetições do eixo padrão para 10 anos. A Figura 31 ilustra a estrutura utilizada para as simulações. A partir dos resultados obtidos, também foi possível aplicar equação de transferência de Nascimento (2015) e obter um percentual de área trincada.

Figura 31 - Estrutura de pavimento utilizada nas simulações no software LVECD

| | | | |
|----|--------------|----------------------|-------|
| | | Módulo (MPa) | ν |
| 10 | REVESTIMENTO | E^* (cada mistura) | 0,35 |
| 15 | BASE | 202 | 0,3 |
| 20 | SUBBASE | 197 | 0,4 |
| | SUBLEITO | 84 | 0,45 |

Fonte: Autora.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados para cada um dos ensaios realizados para a avaliação das propriedades e características das misturas estudadas conforme o Capítulo 3.

4.1 ENSAIOS DE DEFORMABILIDADE

Neste item são analisados os resultados obtidos para os ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e Módulo Complexo (E*).

4.1.1 Módulo de Resiliência

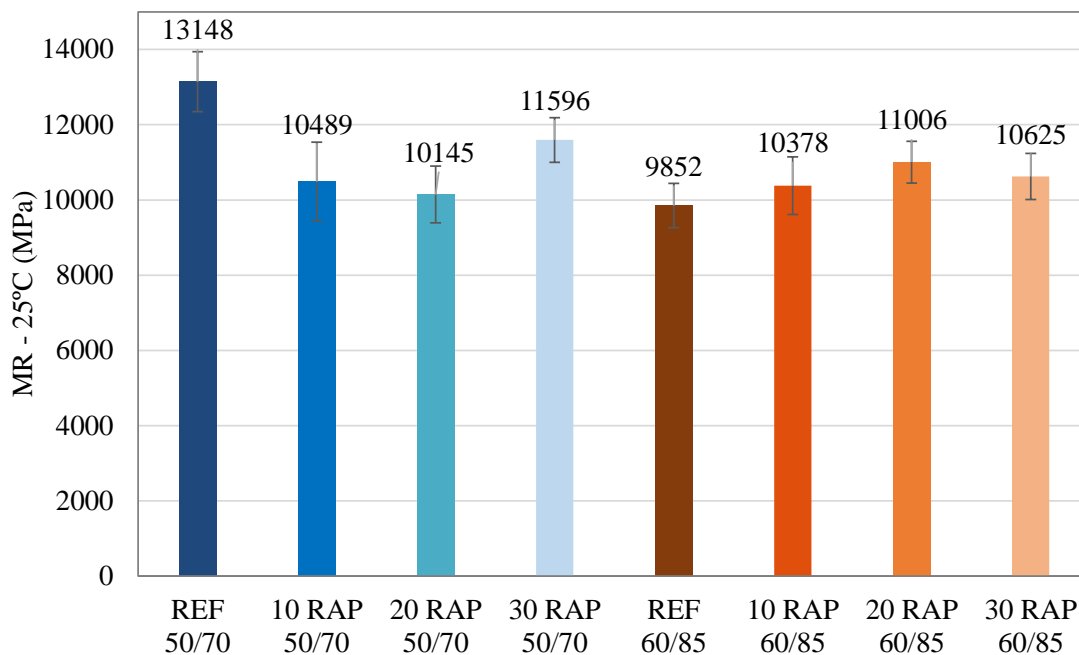
Após a realização dos ensaios nas amostras, os dados foram extraídos do software UTS003 (*Indirect Tensile Modulus Test*). Esses resultados estão indicados Tabela 15, sendo apresentados os valores para módulo de resiliência, desvio padrão e coeficiente de variação. A Tabela 15 ilustra graficamente os resultados de MR para cada uma das oito misturas estudadas.

Tabela 15 - Valores encontrados para o ensaio de MR a 25°C

| Mistura | MR (0°) | | | MR (90°) | | | MR médio | | |
|---------------|----------|---------|--------|----------|--------|--------|----------|---------|--------|
| | MR (MPa) | DP | CV (%) | MR (MPa) | DP | CV (%) | MR (MPa) | DP | CV (%) |
| REF 50/70 | 13148 | 987,96 | 7,16 | 13148 | 603,97 | 7,35 | 13148 | 795,97 | 7,25 |
| 10% RAP 50/70 | 12277 | 1197,01 | 9,70 | 8701 | 894,07 | 7,19 | 10489 | 1045,54 | 8,45 |
| 20% RAP 50/70 | 8951 | 751,66 | 5,75 | 11338 | 763,26 | 6,77 | 10145 | 757,46 | 6,26 |
| 30% RAP 50/70 | 10675 | 546,01 | 5,17 | 12517 | 639,57 | 5,55 | 11596 | 592,79 | 5,36 |
| REF 60/85 | 12312 | 687,325 | 5,565 | 7392 | 493,09 | 6,71 | 9852 | 590,21 | 6,14 |
| 10% RAP 60/85 | 9669 | 550,64 | 5,535 | 11087 | 981,31 | 8,77 | 10378 | 765,97 | 7,15 |
| 20% RAP 60/85 | 11244 | 617,08 | 5,225 | 10768 | 495,50 | 0,00 | 11006 | 556,29 | 2,61 |
| 30% RAP 60/85 | 11091 | 725,365 | 6,475 | 10159 | 493,61 | 4,89 | 10625 | 609,49 | 5,68 |

Fonte: Autora.

Figura 32 - Resultados de todas as misturas obtidos no ensaio de MR



Fonte: Autora.

De modo geral, a inserção do material RAP resultou em respostas distintas de acordo com o tipo de RAP e ligante virgem adicionado. Para as misturas com RAP e ligante 50/70, as três misturas recicladas apresentaram módulo inferior à mistura de referência. Em relação ao teor de incorporação, não foi encontrada uma tendência, com a mistura com 30% apresentando valor superior às duas outras misturas recicladas. Dessa forma, o teor de ligante das misturas mostrou ser mais influente na rigidez, uma vez que com o aumento do teor de RAP, ao invés da mistura se tornar mais rígida devido ao ligante envelhecido deste, houve uma diminuição nos valores de MR.

Nas misturas com ligante 60/85 e RAP 60/85, a inserção do material reciclado aumentou o módulo das misturas, inclusive com uma tendência crescente à medida que se aumenta o teor de incorporação. Analisando genericamente o efeito da inserção do material RAP na propriedade analisada, espera-se uma maior rigidez das misturas em virtude do ligante envelhecido do material, resultando em uma maior elasticidade, o que fora encontrado nas misturas com ligante e RAP 60/85.

Para essas misturas contendo ligante 60/85, é importante destacar que esse mesmo comportamento foi observado por Luzzi (2019), onde o autor encontrou valores muito semelhantes aos encontrados nesta pesquisa, e atribuiu o pequeno decréscimo no valor médio do parâmetro entre as misturas com 20% de fresado e 30% de fresado ao maior teor de ligante

total final encontrado na sua mistura com 30% de fresado, a tornando menos rígida quando em comparação as misturas com 10% e 20%.

É importante ressaltar que as quatro misturas contendo ligante 50/70 possuem um RAP em sua composição distinto das outras quatro misturas que contém ligante AMP 60/85. O primeiro RAP possui em sua composição ligante convencional 50/70. Já o segundo RAP possui o ligante AMP 60/85, desta forma, é esperado que os valores de MR das misturas apresentem comportamento distinto.

Ainda, para Bernucci *et al.* (2008), tipicamente, para ensaios realizados a 25°C e 1 Hz de frequência, os valores de módulo de resiliência se enquadram na faixa de 2000 a 8000 MPa. Portanto, todas as misturas avaliadas nesta pesquisa se encontram com valores de MR acima do máximo usualmente encontrado nas misturas asfálticas brasileiras.

Suzuki (2019), avaliou, em laboratório, misturas com a incorporação de 0%, 10%, 20%, 25%, 35%, 50% e 65% de fresado e ligante virgem 30/45 e observou um aumento dos módulos de resiliência (a 25°C) para as misturas acima de 35% de fresado. A autora atribuiu a maior rigidez das misturas com altos teores de RAP ao fato do ligante contido no RAP ser mais envelhecido e ao condicionamento do material durante a dosagem, uma vez que as misturas com baixos teores tiveram o RAP inserido na temperatura ambiente, o que não ativou as propriedades presentes do ligante envelhecido presente no RAP (modificado com borracha). Já as misturas com altos teores de RAP foram aquecidas previamente.

Bohn (2018) concluiu que a maior inserção de RAP nas misturas elevou os valores de MR. Na avaliação de misturas com ligante convencional, os resultados obtidos se encaixaram na faixa de 9500 a 13000 MPa, enquanto que os valores para as misturas com ligante modificado por polímero (AMP 60/85) se aproximaram do intervalo de 9900 a 14200 MPa.

Para Centofante (2016), os resultados de MR das misturas estudadas pela autora também mostraram um aumento no valor conforme a inserção do material fresado. A autora utilizou percentuais de 10%, 20% e 30% de inserção de material RAP, que continha ligante convencional 50/70, que também foi o mesmo inserido como ligante virgem nas misturas.

Assim, os valores encontrados nesta pesquisa corroboram com os estudos já realizados pelos demais autores. A presença do ligante envelhecido do RAP tende a aumentar os valores de rigidez das misturas, porém, o teor de ligante mostra-se mais influente que o teor de RAP. É necessário analisar os resultados quanto à resistência a deformação permanente e fadiga para poder concluir sobre a utilização deste material e seu comportamento.

4.1.2 Módulo Complexo

Os resultados de módulo complexo foram modelados através do modelo matemático 2S2P1D (*2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot*), permite a modelação dos resultados experimentais obtidos no ensaio de módulo complexo, para assim permitir uma maior discussão e análise do comportamento viscoelástico das misturas estudadas. Proposto por Di Benedetto *et al.* (2004), o modelo consiste na combinação dos seguintes elementos físicos: 2 molas, 2 elementos parabólicos e 1 amortecedor.

A apresentação dos resultados obtidos no ensaio de módulo complexo segue protocolo de análise segundo orientam Di Benedetto & Corté (2005). Primeiramente serão apresentados os parâmetros utilizados no modelo 2S2P1D, o espaço Cole Cole, o diagrama Black e as curvas mestras de módulo e ângulo de fase. Para melhor análise, os gráficos são apresentados da seguinte maneira: primeiramente as misturas com ligante 50/70, seguido das misturas com ligante 60/85 e por fim, um gráfico com todas misturas.

As curvas mestras foram construídas a partir do princípio da superposição tempo e temperatura. A Tabela 16 apresenta todos parâmetros para cada mistura após a modelagem 2S2P1D, bem como as constantes C1 e C2 do WLF (William, Landel e Ferry).

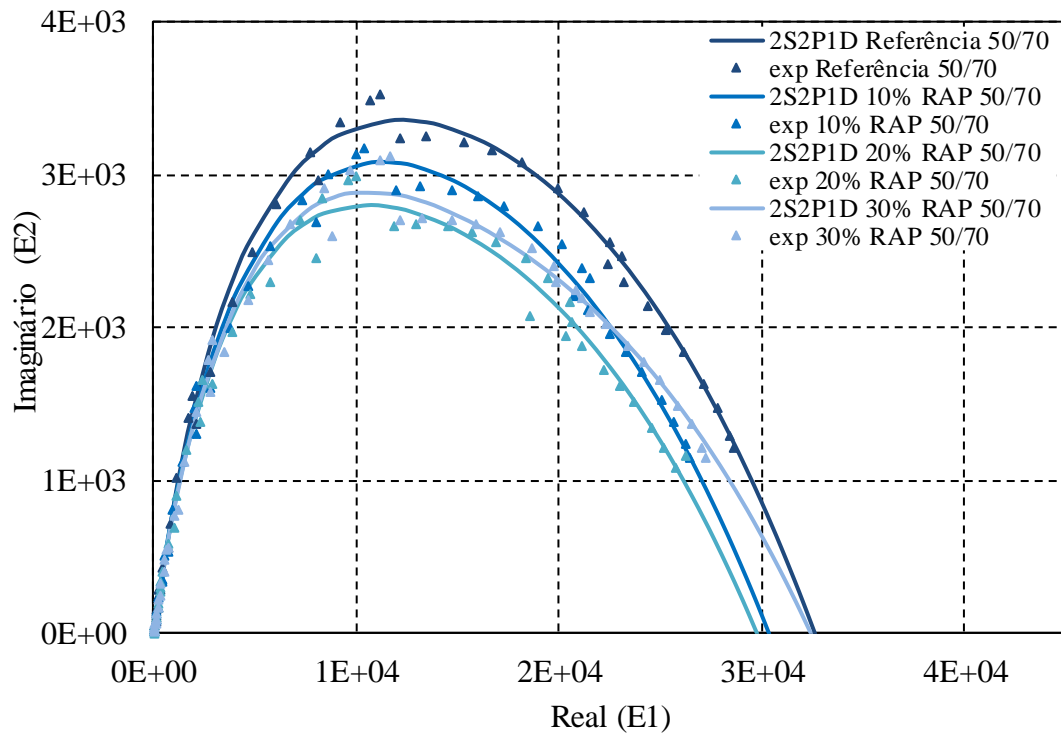
Tabela 16 - Parâmetros da modelagem 2S2P1D e valores de C1 e C2

| Mistura | E* | | | | | | WLF | | |
|--------------|---------------|------------|-------|-------|----------|----------|---------|-------|---------|
| | $E_{00}(MPa)$ | $E_0(MPa)$ | K | h | δ | τ_E | β | C1 | C2 (°C) |
| REF 50/70 | 64,97 | 32625 | 0,218 | 0,598 | 2,313 | 0,0382 | 10000 | 30,65 | 233,15 |
| 10 RAP 50/70 | 50,00 | 30381 | 0,209 | 0,556 | 2,118 | 0,0291 | 10000 | 26,03 | 199,10 |
| 20 RAP 50/70 | 27,21 | 29814 | 0,195 | 0,550 | 2,202 | 0,0391 | 10000 | 28,32 | 203,13 |
| 30 RAP 50/70 | 44,00 | 32400 | 0,177 | 0,531 | 2,087 | 0,0472 | 10000 | 25,76 | 190,73 |
| REF 60/85 | 70,10 | 32200 | 0,218 | 0,568 | 2,779 | 0,0107 | 10000 | 12,45 | 101,17 |
| 10 RAP 60/85 | 24,70 | 32000 | 0,218 | 0,555 | 2,367 | 0,0127 | 10000 | 16,36 | 116,95 |
| 20 RAP 60/85 | 40,70 | 33900 | 0,174 | 0,528 | 2,116 | 0,0192 | 10000 | 20,29 | 143,22 |
| 30 RAP 60/85 | 61,00 | 34500 | 0,183 | 0,534 | 1,965 | 0,0362 | 10000 | 15,59 | 118,80 |

Fonte: Autora.

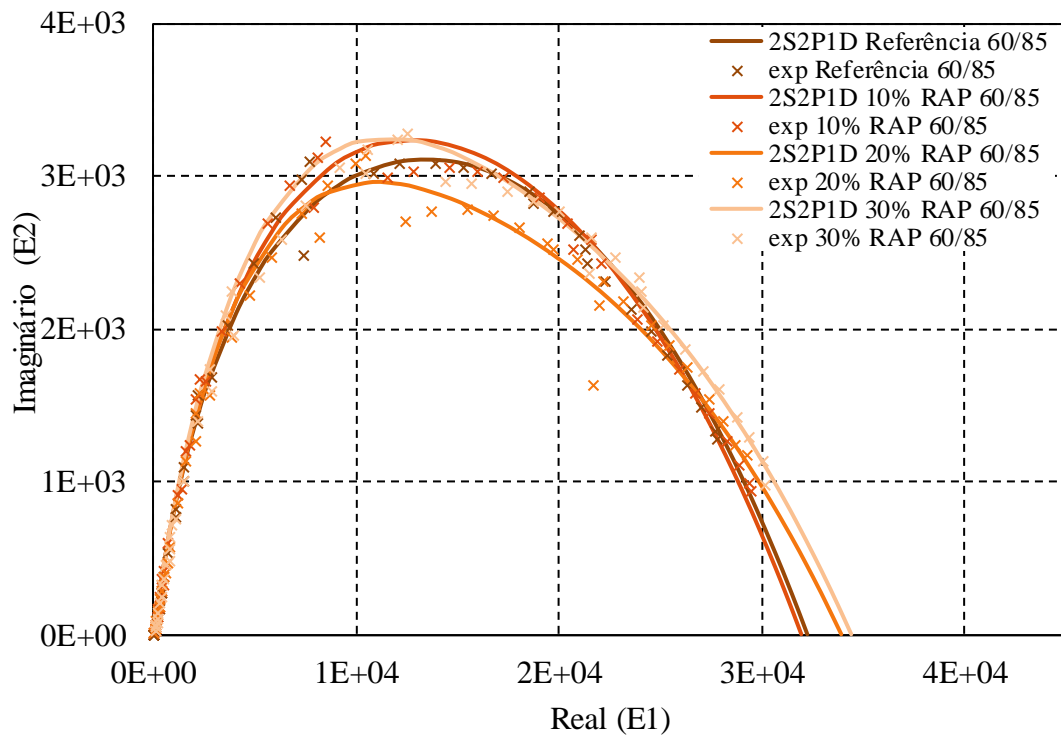
O espaço Cole Cole apresenta a parte real E1, no eixo das abcissas, e a parte imaginária E2, no eixo das ordenadas, e é semelhante a um arco de círculo. Com E1 pode-se avaliar a parte recuperável da energia armazenada, e com E2 o comportamento viscoso reversível do material devido a dissipação de energia. A Figura 33 e Figura 34 dispõe a representação gráfica das misturas, respectivamente, com ligante 50/70 e 60/85 após a modelagem 2S2P1D no espaço Cole Cole.

Figura 33 - Espaço Cole Cole para as misturas com ligante 50/70



Fonte: Autora.

Figura 34 - Espaço Cole Cole para as misturas com ligante 60/85



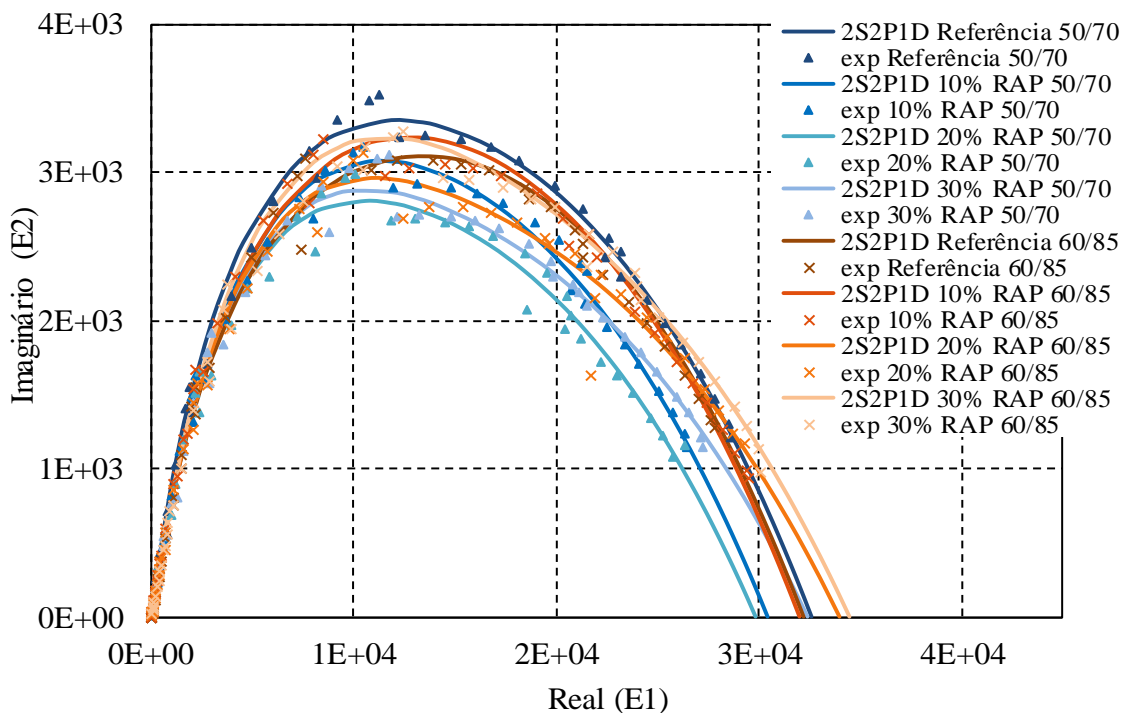
Fonte: Autora.

Ao analisar a Figura 33, para as misturas com ligante 50/70, nota-se que a mistura de referência apresentou os maiores valores tanto para E1 como para E2, indicando maior comportamento elástico e viscoso para esta mistura, e à medida que foi aumentada a incorporação do RAP, os valores foram diminuindo para ambas parcelas, sendo a mistura com 20% de RAP a que obteve o menor valor de E1. O que pode ser explicado devido ao RAP conter ligante envelhecido e, portanto, ser mais rígido. Por outro lado, a mistura 30 RAP 50/70 apresentou um salto no valor para o E1 e E2, possivelmente pelo fato de possuir maior teor de ligante e maior teor de RAP e, ao ser aquecido, este contribuiu para um aumento da parcela elástica.

Em relação às misturas com ligante 60/85, Figura 34, as misturas com 10% e 30% de incorporação de RAP foram as que obtiveram maior valor para E2, o que indica que estas possuem um maior comportamento viscoso se comparadas as demais misturas. Quanto ao teor de incorporação de RAP, não foi possível constatar uma tendência no comportamento das misturas. No entanto, ao analisar a parte real (E1), nota-se que os maiores valores são para as misturas com 30% e 20% de RAP, indicando maior comportamento elástico, possivelmente devido à reativação do ligante contido no RAP.

A Figura 35 apresenta graficamente o espaço Cole Cole para todas as oito misturas e permite uma comparação entre os diferentes tipos de ligante e fonte de RAP.

Figura 35 - Espaço Cole Cole para todas misturas

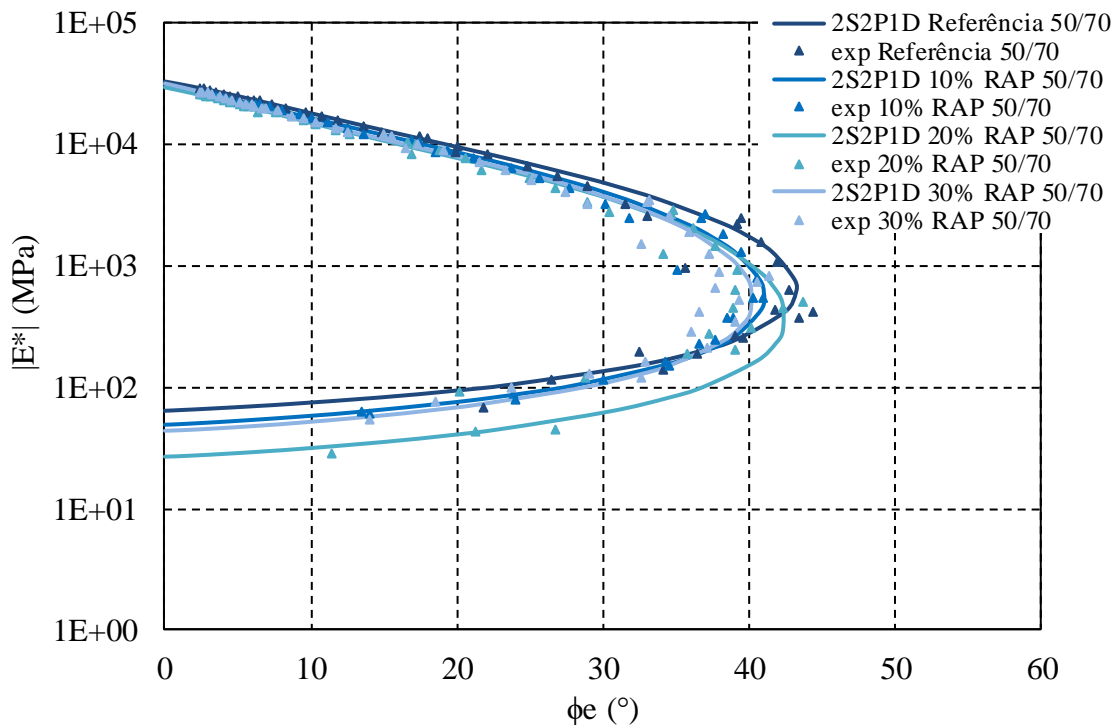


De maneira geral, as misturas apresentaram valores muito próximos. Percebe-se que a mistura REF 50/70 obteve os maiores valores para E2, seguido das misturas 30 RAP 60/85 e 10 RAP 60/85, o que indica um maior comportamento viscoso para estas misturas. A mistura 20 RAP 60/85 foi a que apresentou menor valor de E2.

Analisando a parte E1, é possível notar que a mistura 30 RAP 60/85 é a mistura que apresenta maior comportamento elástico. Tal comportamento pode ter ocorrido devido ao fato do ligante 60/85 ser mais elástico que o 50/70, e ainda devido ao alto percentual de RAP desta mistura e por este também conter em sua composição o ligante 60/85, corroborando para a reativação do ligante presente no RAP.

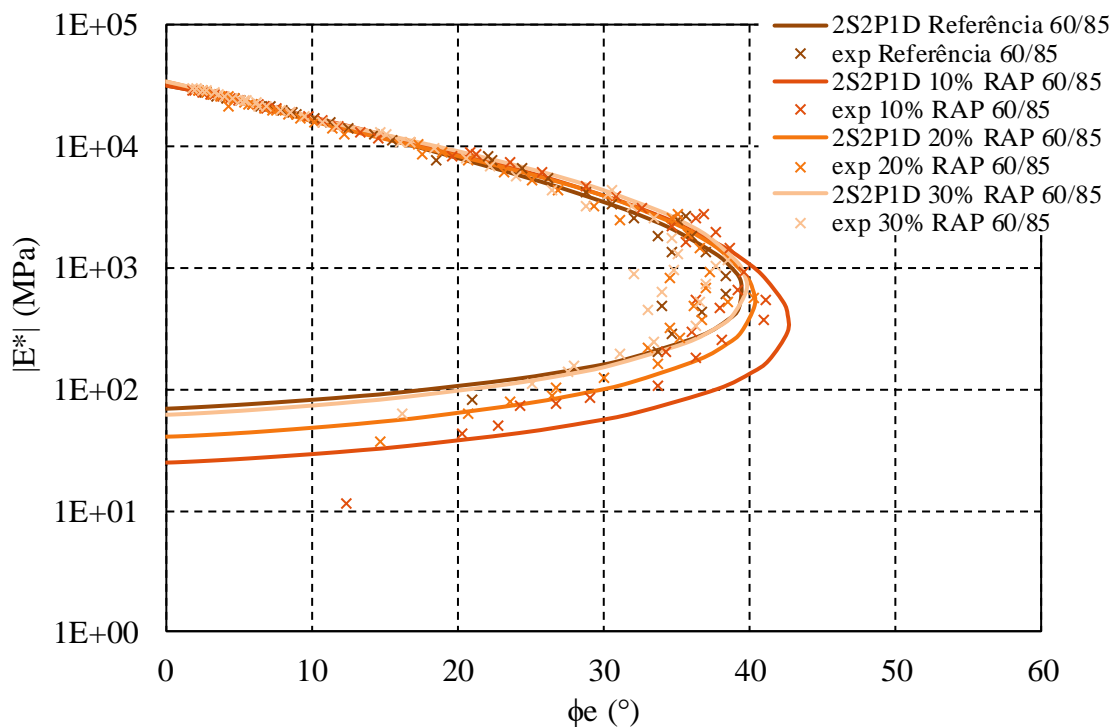
Na Figura 36 e Figura 37 estão dispostos graficamente os resultados para o diagrama Black para as misturas contendo ligante 50/70 e 60/85, respectivamente. A análise dos dados no diagrama Black permite verificar a relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase para diferentes temperaturas e, ainda, com o aumento da temperatura que o $|E^*|$ diminui.

Figura 36 - Diagrama Black para as misturas com ligante 50/70



Fonte: Autora.

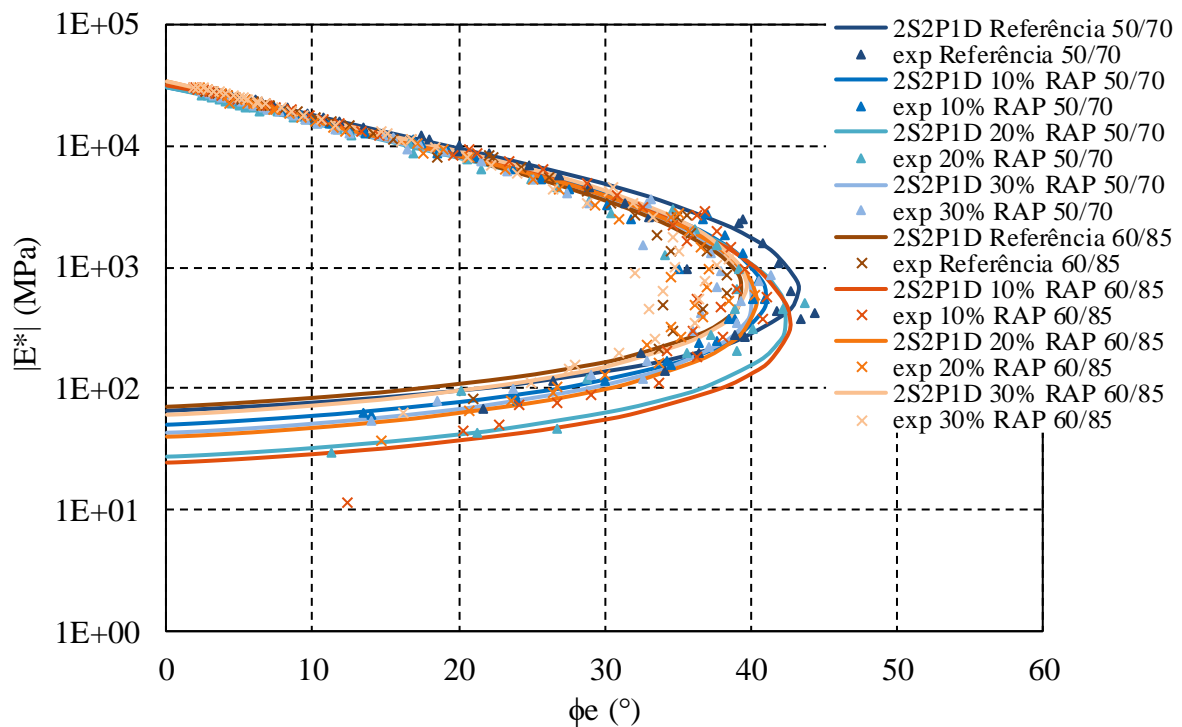
Figura 37 - Diagrama Black para as misturas com ligante 60/85



Fonte: Autora.

Ao observar o diagrama Black para as misturas com ligante 50/70, Figura 36, é possível observar que a mistura com 30% de adição de RAP apresentou um menor valor de ângulo de fase indicando um maior comportamento elástico. Já as misturas de referência e com 20% de RAP, apresentaram maiores valores de ângulo de fase, o que indica uma maior atuação da parcela viscosa, permitindo inferir que essas misturas, possivelmente, sofreriam maiores deformações plásticas se comparadas as demais. Quanto as misturas contendo ligante 60/85, Figura 37, a mistura de referência e a mistura com 30% de RAP apresentaram os menores valores de ângulo de fase, muito semelhantes entre si. Já a mistura com maior valor de ângulo de fase foi a com 10% de RAP. Analisando o teor de incorporação de RAP em ambos tipos de ligante, pode-se constatar que as misturas contendo ligante 50/70 apresentaram uma diminuição no valor de ângulo de fase, e as misturas contendo ligante 60/85 não apresentaram uma tendência definida em seu comportamento. A seguir, a Figura 38 apresenta o diagrama Black para todas as misturas.

Figura 38 - Diagrama Black para todas misturas



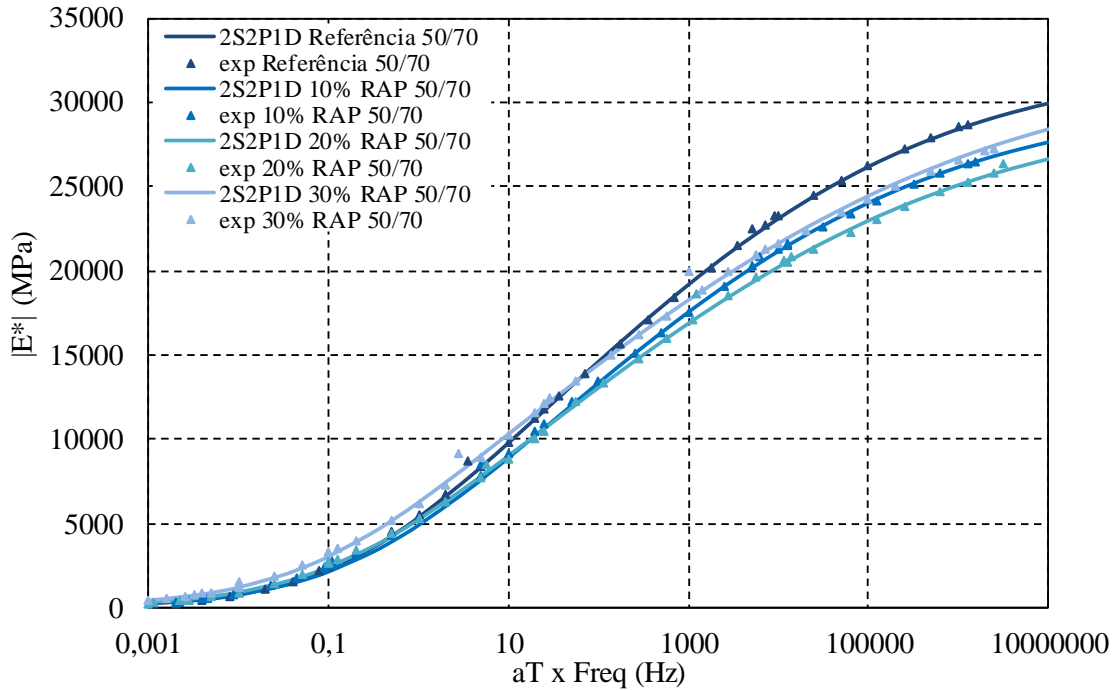
Fonte: Autora.

Novamente, é possível perceber que não houve um comportamento tão distinto entre as misturas, todas apresentaram valores muito próximos, não permitindo fazer uma relação entre os teores de fresado e os resultados. As misturas REF 50/70, 20 RAP 50/70 e 10 RAP 60/85, apresentaram um valor de ângulo de fase ligeiramente maior que as demais misturas, o que indica uma atuação maior da parcela viscosa que a elástica.

A partir do princípio da superposição tempo-temperatura e dos resultados obtidos de módulo dinâmico e ângulo de fase das misturas, foi possível elaborar as curvas mestras, as quais permitem fazer uma previsão dos valores de uma determinada propriedade reológica em uma ampla faixa de temperaturas e frequências, sendo as curvas ajustadas pelo modelo reológico 2S2P1D. Para melhor visualização dos resultados, primeiramente estão apresentadas, na Figura 39, as curvas mestras para as misturas com ligante 50/70, seguida da Figura 40 que apresenta as curvas mestras das misturas com ligante 60/85 e por último, a Figura 41 que apresenta todas as misturas. As maiores frequências correspondem ao menor tempo de carga, o que limita a manifestação de deformações viscoelásticas, ou seja, praticamente só existem deformações elásticas no material. Nas baixas frequências, o tempo de carregamento é maior, o que faz com que as deformações viscoelásticas do material se manifestem. As análises nas altas frequências correspondem às baixas temperaturas, e, portanto, relacionam-se com o trincamento térmico. Já, as baixas frequências correspondem às altas temperaturas e estão relacionadas diretamente

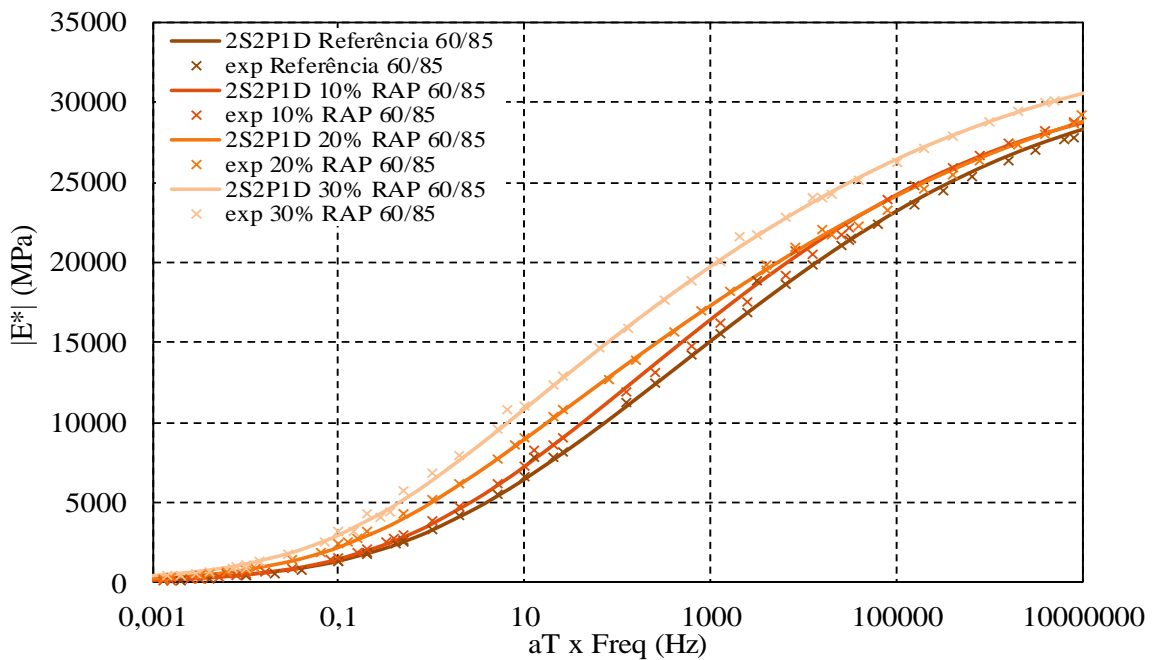
com a ocorrência de deformação permanente, e as frequências intermediárias estão relacionadas à fadiga. Como a temperatura de ensaio variou de -10°C a 54°C , o comportamento viscoelástico é válido para essa faixa de temperatura.

Figura 39 - Curvas mestras de módulo dinâmico para as misturas com ligante 50/70



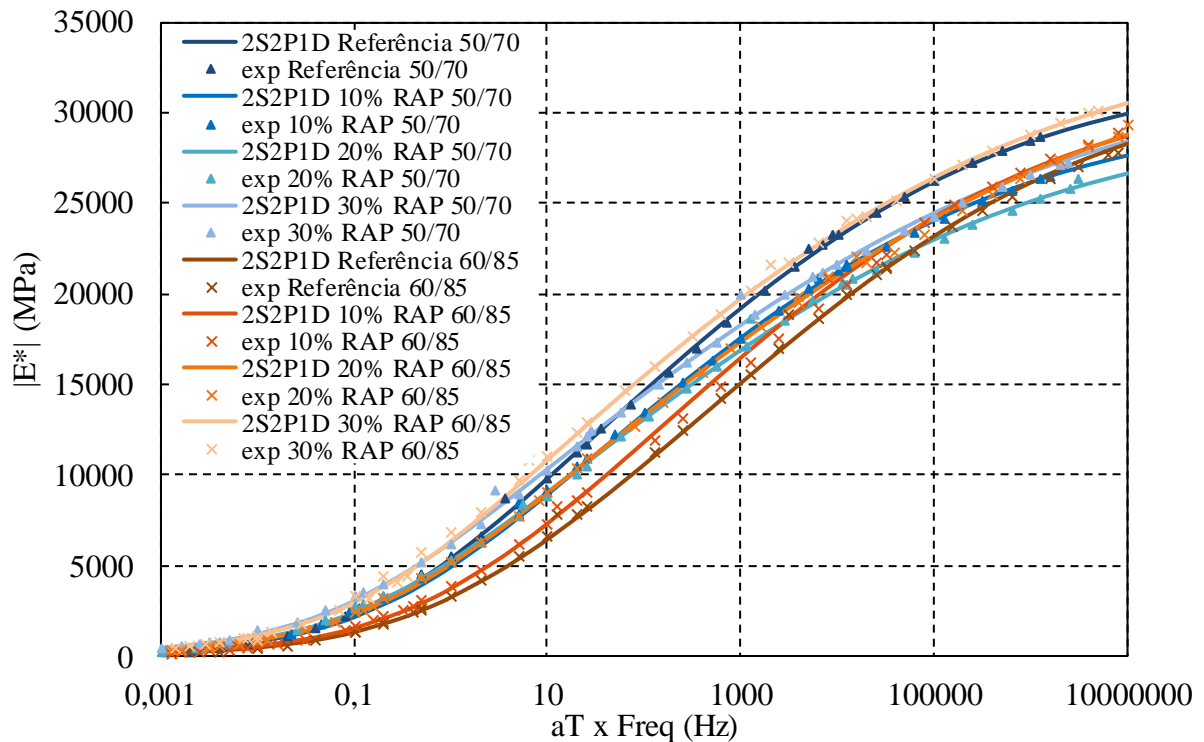
Fonte: Autora.

Figura 40 - Curvas mestras de módulo dinâmico para as misturas com ligante 60/85



Fonte: Autora.

Figura 41 - Curvas mestras de módulo dinâmico para as oito misturas



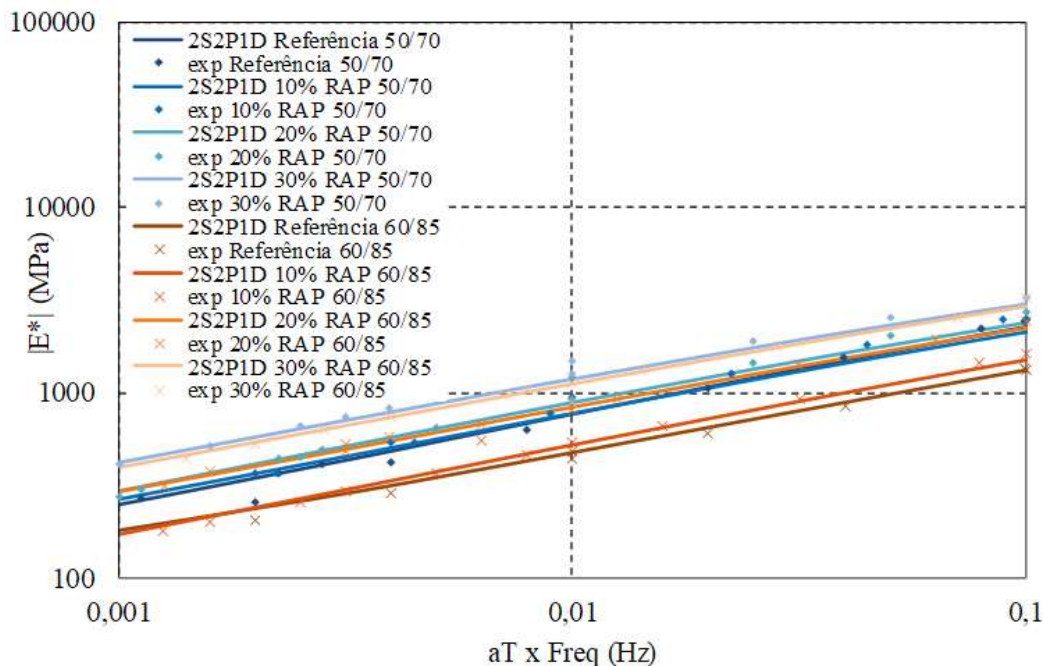
Fonte: Autora.

Ao analisar as frequências intermediárias e altas, a mistura REF 50/70 foi a que apresentou maior valor de módulo, seguida da mistura 30 RAP 50/70, o que corrobora os resultados obtidos no ensaio de MR: a adição de fresado e ligante virgem diminuiu a rigidez.

Para as misturas com ligante e RAP 60/85, a mistura com 30% de RAP apresentou os maiores valores de módulo em todas as frequências, o que indica que o maior teor de RAP pode ter influenciado esse comportamento, pois o RAP aumenta a rigidez das misturas, o que resulta na redução da susceptibilidade térmica. Ainda, a mistura REF 60/85 obteve os menores valores de módulo para as frequências altas e intermediárias.

As baixas frequências estão relacionadas diretamente ao fenômeno de deformação permanente, a Figura 42 apresenta detalhadamente os resultados de módulos nas baixas frequências, até 0,01Hz.

Figura 42 - Comparação das curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas nas baixas frequências (@ 21°C)

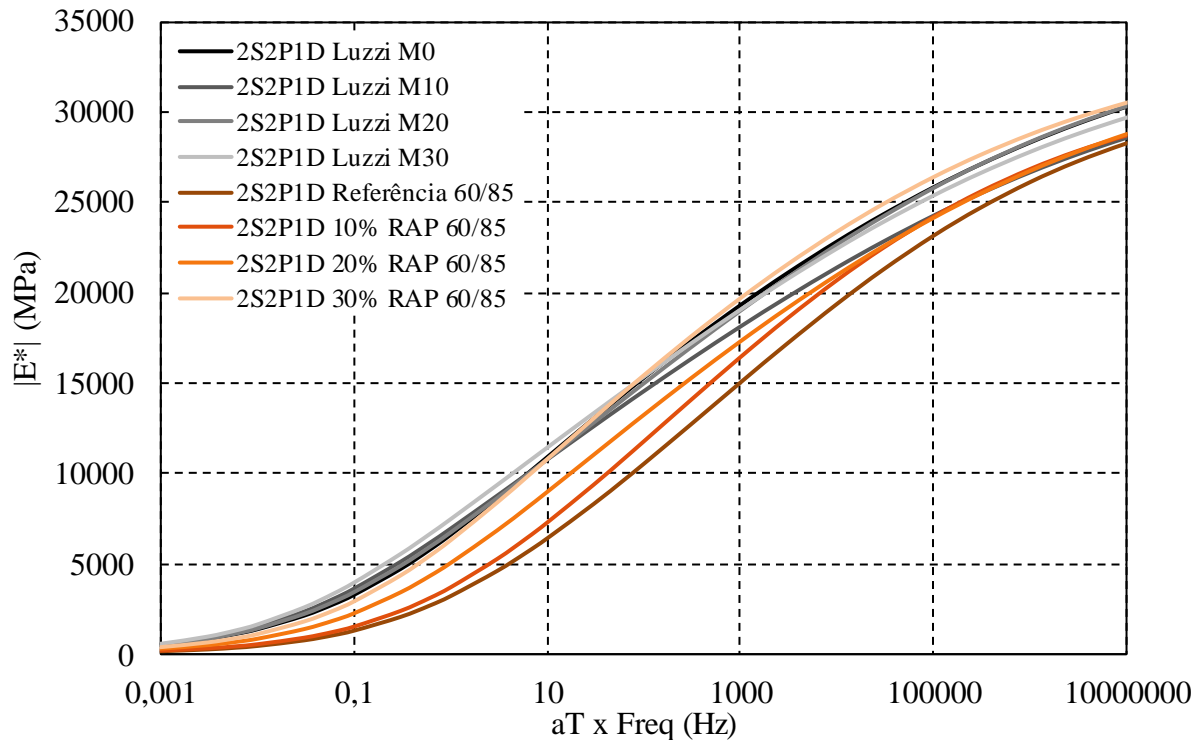


Fonte: Autora.

Analisando de maneira geral, é possível observar a superioridade dos valores de módulo das misturas com ligante 50/70 para as misturas com ligante 60/85. Nota-se que as misturas 30 RAP 50/70 e 30 RAP 60/85 obtiveram valores mais elevados que as demais misturas, seguidos pelas misturas 20 RAP 50/70 e 20 RAP 60/85. Assim, é possível inferir que o aumento da porcentagem de RAP introduzido elevou o módulo, para ambos tipos de ligantes, podendo estas misturas apresentar melhor comportamento à deformação permanente. Também é importante observar que nas baixas frequências, a mistura de REF 50/70 apresentou os menores valores de módulo, sendo este comportamento o inverso do observado nas altas frequências.

A fim de comparação, foram plotadas as curvas mestras de módulo dinâmico das misturas com ligante 60/85 juntamente com as curvas obtidas por Luzzi (2019) para suas misturas produzidas em usina, Figura 43.

Figura 43 - Comparação das curvas mestras de módulo dinâmico das misturas com ligante 60/85 com as curvas obtidas por Luzzi (2019) (@ 21°C)



Fonte: Autora.

Nota-se que os valores obtidos pelo autor são muito próximos para suas misturas, mas de maneira geral, as misturas desta pesquisa apresentaram valores menores que as misturas do autor, com exceção da mistura contendo 30% de RAP, o que pode ter influenciado nesse comportamento foi a diferença do teor de ligantes das misturas desta pesquisa para as de Luzzi (2019) (Tabela 17).

Tabela 17 - Tabela de comparação dos valores de teor de ligante das misturas desta pesquisa e os de Luzzi (2019)

| Teor de RAP | Teor de ligante (%) (autora) | Teor de ligante (%) (Luzzi, 2019) |
|-------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 0% | 5,75 | 5,01 |
| 10% | 6,00 | 4,89 |
| 20% | 5,99 | 4,87 |
| 30% | 5,99 | 5,39 |

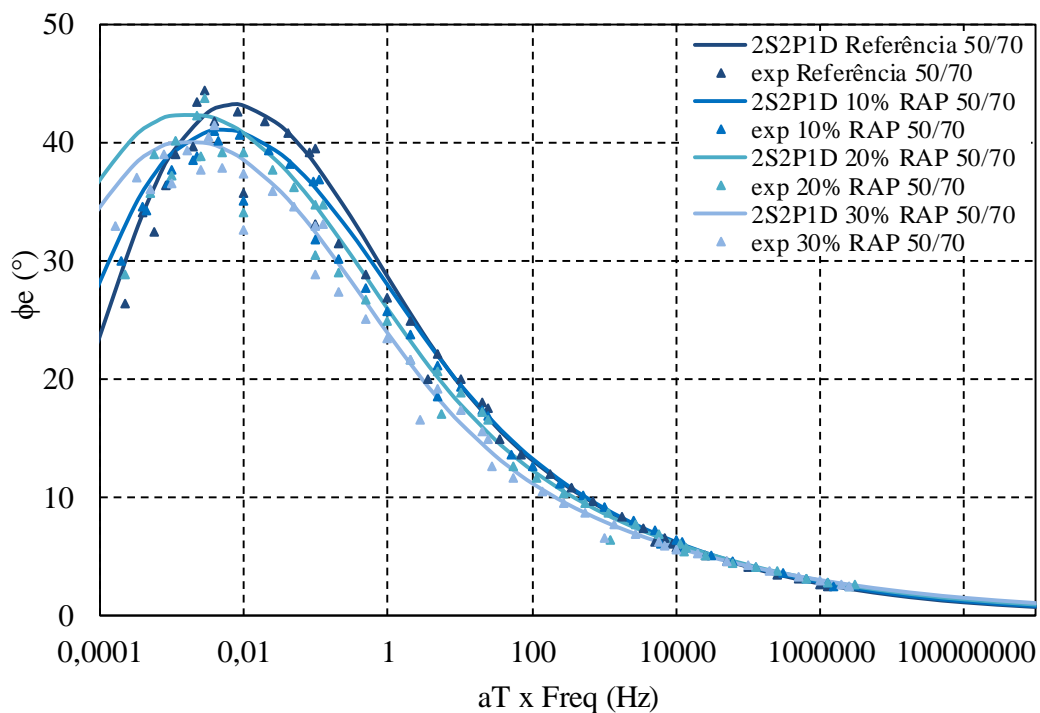
Fonte: Autora.

A mistura M0 do autor apresentou teor de ligante final de 5,01%, já a mistura de referência desta pesquisa ficou com teor de ligante de 5,75%, dessa forma, o menor teor de ligante das misturas do autor influenciou para os maiores valores de rigidez encontrados por

ele. É importante ressaltar aqui que a eficiência da mistura na usina e em laboratório influenciou os valores de teor de ligante.

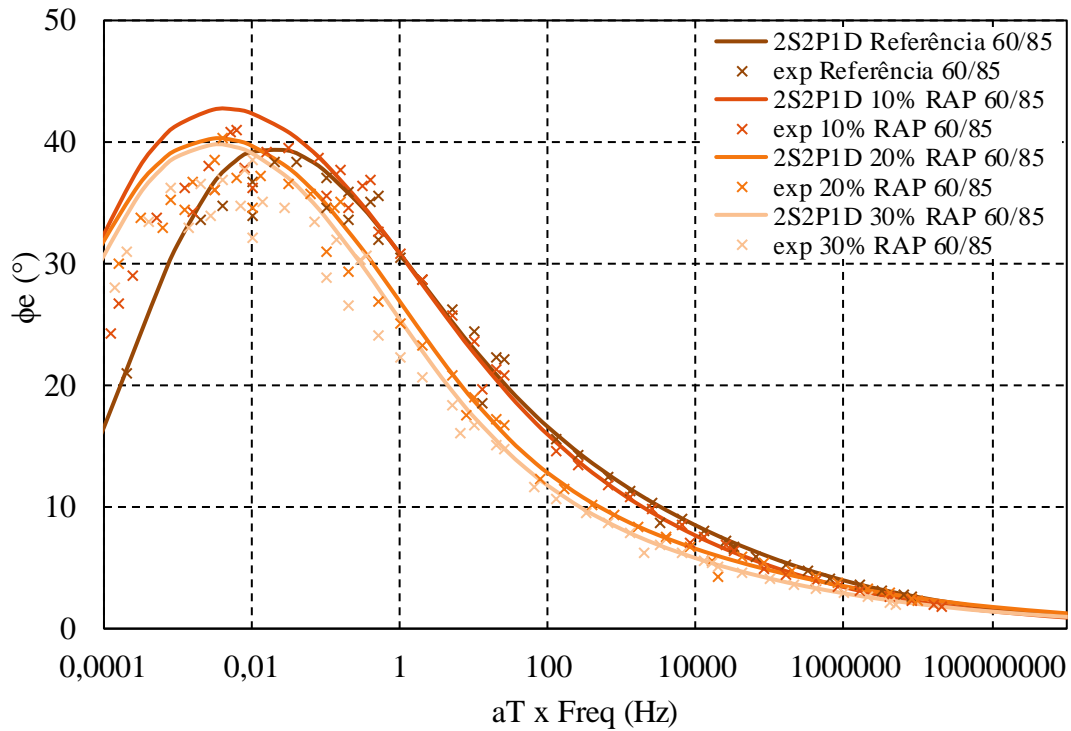
A seguir a Figura 44 e Figura 45 apresentam graficamente as curvas mestras de ângulo de fase (ϕ) obtidas pela modelagem 2S2P1D para as misturas com ligante 50/70 e ligante 60/85, respectivamente, por fim, a Figura 46 apresenta um gráfico com a modelagem de todas as misturas. O ângulo de fase é um parâmetro utilizado frequentemente para avaliar o efeito da modificação por polímero, e está relacionado às propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos.

Figura 44 - Comparação das curvas mestras de ângulo de fase para todas as misturas com ligante 50/70 (@ 21°C)



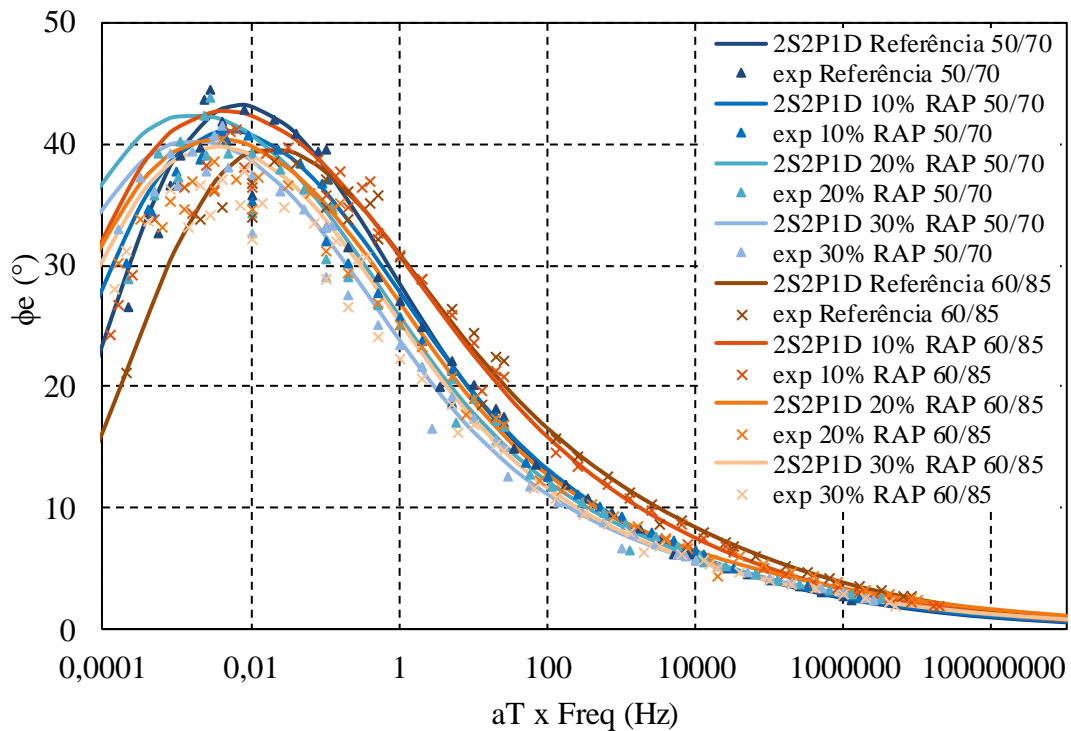
Fonte: Autora.

Figura 45 - Comparação das curvas mestras de ângulo de fase para as misturas com ligante 60/85 (@ 21°C)



Fonte: Autora.

Figura 46 - Comparação das curvas mestras de ângulo de fase para todas as misturas (@ 21°C)



Fonte: Autora.

Nota-se que as misturas REF 50/70, 10 RAP 60/85 e 20 RAP 50/70 apresentaram os maiores valores de ângulo de fase nas baixas frequências. Nas baixas frequências há a atuação do esqueleto pétreo, uma vez que o ligante não consegue suportar sozinho o carregamento e o agregado passa a atuar. Desta forma, estas misturas apresentam um comportamento mais viscoso em relação às demais, pois obtiveram uma maior defasagem entre o carregamento e a deformação. Porém, o comportamento das misturas é muito semelhante e, conforme a alteração da frequências, as misturas se desordenam, o que impossibilita concluir a respeito do teor de incorporação de RAP.

Bohn (2017), após analisar a curva mestra para o ângulo de fase das misturas de referência com ligante 60/85 e 50/70, concluiu que, em geral, as misturas com ligante modificado exibem uma maior elasticidade e resistência à deformação permanente. Em relação as demais misturas que continham teor de fresado, a autora não encontrou um comportamento que seja equivalente para todas as misturas, mas constatou um visível aumento da parcela elástica quando utilizado o material reciclado em conjunto com ligante modificado por polímero. Assim como a autora, Luzzi (2019) constatou que os comportamentos semelhantes entre misturas recicladas e convencional, demonstram a viabilidade de utilização de misturas recicladas à quente. Porém, apenas essas constatações não são suficientes para concluir à cerca do comportamento destas misturas em campo, sendo necessário realizar ensaios complementares.

De maneira geral, as misturas com ligante e RAP 50/70 apresentaram valores de módulo levemente superiores às misturas contendo ligante modificado, corroborando os ensaios de módulo de resiliência. Com relação as misturas recicladas, as misturas com 30% de inserção de RAP, para ambos ligantes, apresentaram os maiores valores de rigidez. Um dos fatores que pode explicar tais resultados é o tipo de ligante presente no RAP e o seu grau de envelhecimento, porém não é possível afirmar com certeza quanto do ligante foi reativado nas misturas.

4.2 ENSAIO PARA A AVALIAÇÃO DA PROPRIEDADE DE ADESÃO/COESÃO

Neste item serão apresentados os resultados para o ensaio de Dano por Umidade Induzida, que avalia o efeito deletério da água na adesão e coesão.

4.2.1 Dano por umidade induzida (DUI)

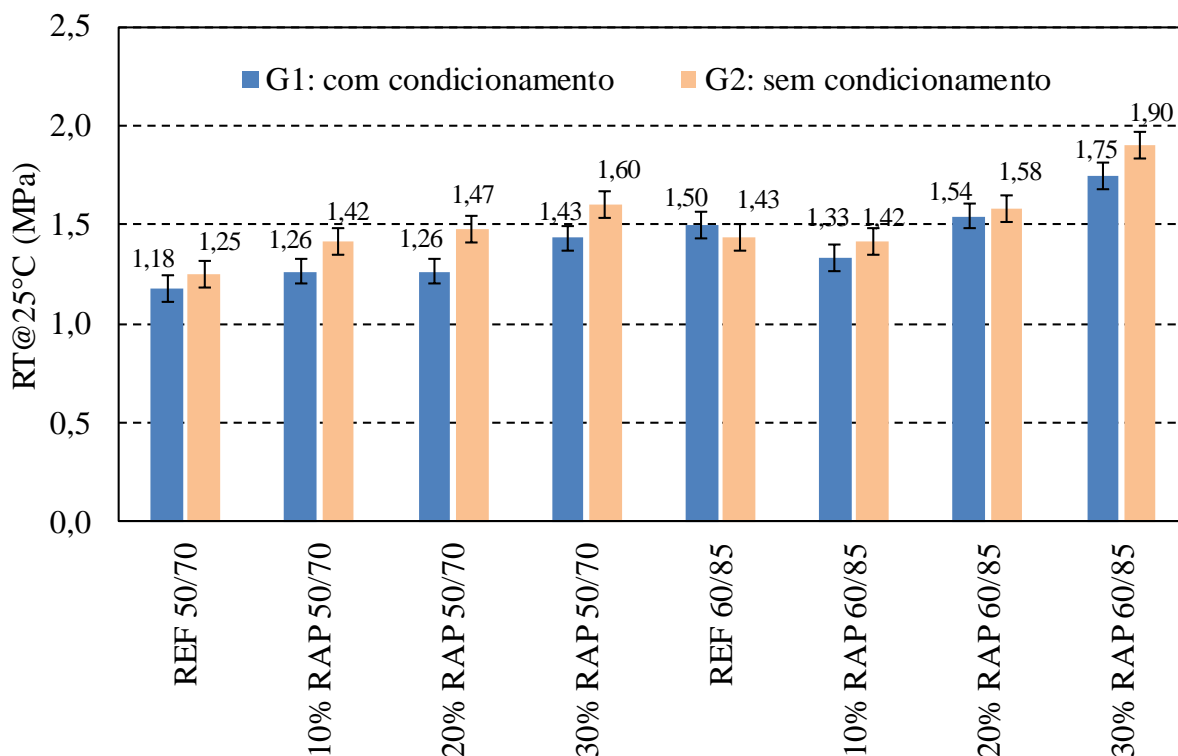
Para avaliar o efeito deletério da água na propriedade de adesividade das misturas, foi realizado o ensaio de dano por umidade induzida (Lottman Modificado). Cada mistura teve 6 amostras ensaiadas, sendo 3 sem sofrer condicionamento, e outras 3 que sofreram o condicionamento. O condicionamento consistiu em 3 etapas: saturação dos corpos de prova, congelamento à -18°C, banho maria à 60°C e 25°C. Após esse processo os corpos de prova foram ensaiados a resistência à tração (RT). A seguir, estão apresentados a média de RT obtida para cada mistura e grupo, além dos valores da resistência retida à tração (RRT), na Tabela 18. A Figura 47 ilustra graficamente os resultados de RT obtidos para cada grupo.

Tabela 18 - Valores de RT, desvio padrão e coeficiente de variação encontrados para as amostras com condicionamento e sem condicionamento

| Mistura | Com condicionamento (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | Sem condicionamento (MPa) | DP (MPa) | CV (%) | RRT (%) |
|--------------|---------------------------|----------|--------|---------------------------|----------|--------|---------|
| REF 50/70 | 1,18 | 0,07 | 6,15 | 1,25 | 0,13 | 10,41 | 94 |
| 10 RAP 50/70 | 1,26 | 0,07 | 5,21 | 1,42 | 0,06 | 3,90 | 89 |
| 20 RAP 50/70 | 1,26 | 0,07 | 5,67 | 1,47 | 0,04 | 2,71 | 86 |
| 30 RAP 50/70 | 1,43 | 0,08 | 5,82 | 1,60 | 0,02 | 1,50 | 90 |
| REF 60/85 | 1,50 | 0,03 | 2,00 | 1,43 | 0,07 | 4,90 | 105 |
| 10 RAP 60/85 | 1,33 | 0,04 | 3,01 | 1,42 | 0,05 | 3,52 | 94 |
| 20 RAP 60/85 | 1,54 | 0,05 | 3,25 | 1,58 | 0,06 | 3,80 | 98 |
| 30 RAP 60/85 | 1,75 | 0,06 | 3,43 | 1,90 | 0,03 | 1,58 | 92 |

Fonte: Autora.

Figura 47 - Resultados de Resistência Retida a Tração



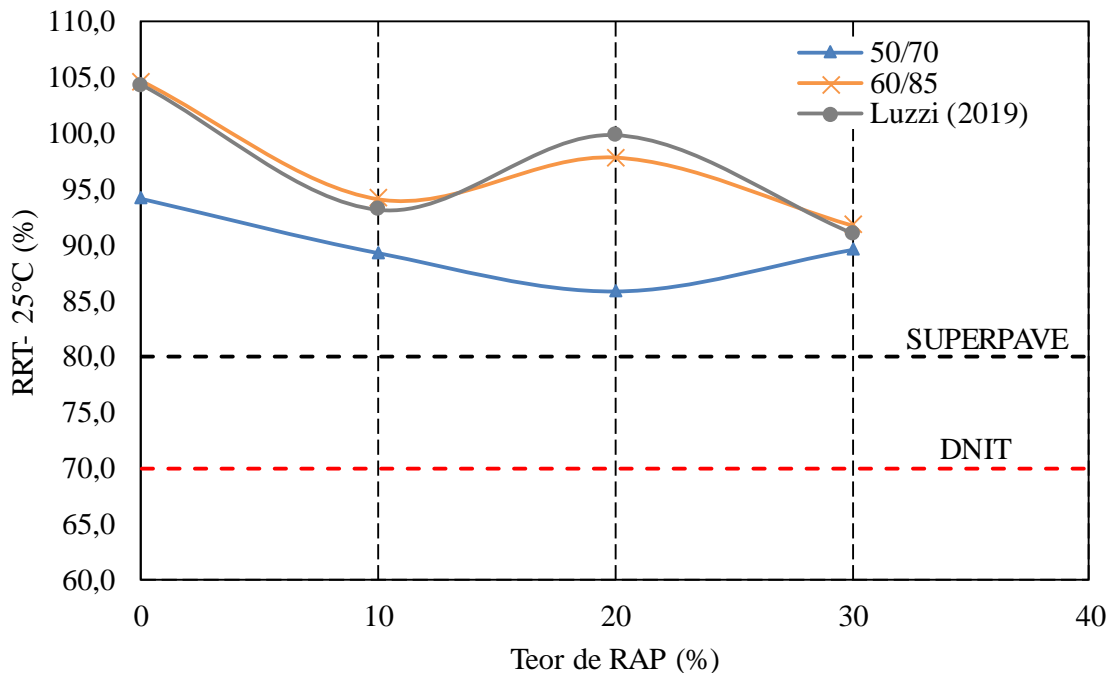
Fonte: Autora

Os resultados apresentados demonstram, de modo geral, uma diminuição dos valores de RT no grupo que sofreu condicionamento, porém os valores apresentam baixa diferença entre os resultados para os grupos com condicionamento e sem condicionamento. A mistura REF 60/85 apresentou um aumento do valor de RT após o condicionamento da amostra. Luzzi (2019) também constatou essa melhora em sua mistura de referência, evidenciando a influência não negativa da água. Ainda, os valores de RRT para as misturas recicladas foram menores que as misturas de referência, porém, não foi possível estabelecer um comportamento quanto ao teor de RAP inserido, pois os valores foram próximos, sem um comportamento definido.

A ES 031/2006 do DNIT determina que a razão da RRT por compressão diametral estática deve ser superior a 0,7, ou seja, 70% da RT encontrada inicialmente nas misturas, sem condicionamento e após o condicionamento. Conforme a metodologia Superpave, esse valor de RT deve ser superior a 80%. Dessa forma, todas as misturas estudadas obtiveram valores acima dos determinados.

A Figura 48 apresenta o comportamento das curvas de RRT, para os valores encontrados nesta pesquisa, os valores encontrados por Luzzi (2019) e os limites estabelecidos pelo DNIT e metodologia Superpave.

Figura 48 - Resultados de Resistência Retida a Tração



Fonte: Autora.

Bohn (2017), ao avaliar o efeito deletério da água em suas misturas com 0%, 25% e 50% de RAP, constatou uma melhora nos resultados de RRT conforme o aumento do teor de RAP. Contrapondo esta tendência, Centofante (2016) verificou que a inserção de RAP em suas misturas (0%, 10%, 20% e 30%) diminuíram os valores de RRT sendo que as misturas com 20% e 30% de RAP não atingiram o limite mínimo proposto pelo DNIT.

4.3 ENSAIOS PARA A AVALIAÇÃO DO DANO NAS MISTURAS

Este item abordará e discutirá os resultados obtidos para os ensaios de uniaxial de carga repetida (*flow number*), resistência à tração por compressão diametral e fadiga à tração-compressão uniaxial.

4.3.1 Ensaio uniaxial de carga repetida (*Flow Number*)

Após a realização do ensaio de *flow number* (FN), as curvas de deformação plástica acumulada foram modeladas através do modelo de Francken e então foi possível obter, para cada mistura, os valores médios de número de ciclos, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e os coeficientes encontrados para o modelo de Francken (A, B, C e D), que

estão apresentados na Tabela 19. Nota-se que as misturas 50/70 apresentaram um número de ciclos de FN muito baixo, o que não permitiu calcular e modelar as misturas pelo modelo de Francken, então os valores apresentados na tabela para estas misturas foram os encontrados na prensa.

Tabela 19 - Valores encontrados para FN, desvio padrão, coeficiente de variação e parâmetros do modelo de Francken

| Mistura | FN | DP | CV (%) | Coeficientes do modelo de Francken | | | |
|---------------|-----|----|--------|------------------------------------|------|--------|---------|
| | | | | A | B | C | D |
| REF 50/70 | 17 | 1 | 4,29 | - | - | - | - |
| 10% RAP 50/70 | 16 | 0 | 0,00 | - | - | - | - |
| 20% RAP 50/70 | 26 | 2 | 8,32 | - | - | - | - |
| 30% RAP 50/70 | 34 | 6 | 16,64 | - | - | - | - |
| REF 60/85 | 23 | 2 | 8,92 | 518,11 | 0,93 | 28,19 | 0,08659 |
| | | | | 521,16 | 0,90 | 46,25 | 0,07133 |
| 10% RAP 60/85 | 29 | 6 | 19,51 | 582,01 | 0,85 | 98,43 | 0,05095 |
| | | | | 521,16 | 0,90 | 46,25 | 0,07133 |
| | | | | 364,50 | 0,75 | 44,15 | 0,01916 |
| 20% RAP 60/85 | 111 | 10 | 9,05 | 432,34 | 0,74 | 123,13 | 0,01775 |
| | | | | 362,76 | 0,79 | 67,85 | 0,01961 |
| 30% RAP 60/85 | 143 | 15 | 10,42 | 452,70 | 0,66 | 312,90 | 0,01065 |
| | | | | 280,31 | 0,70 | 346,59 | 0,00828 |

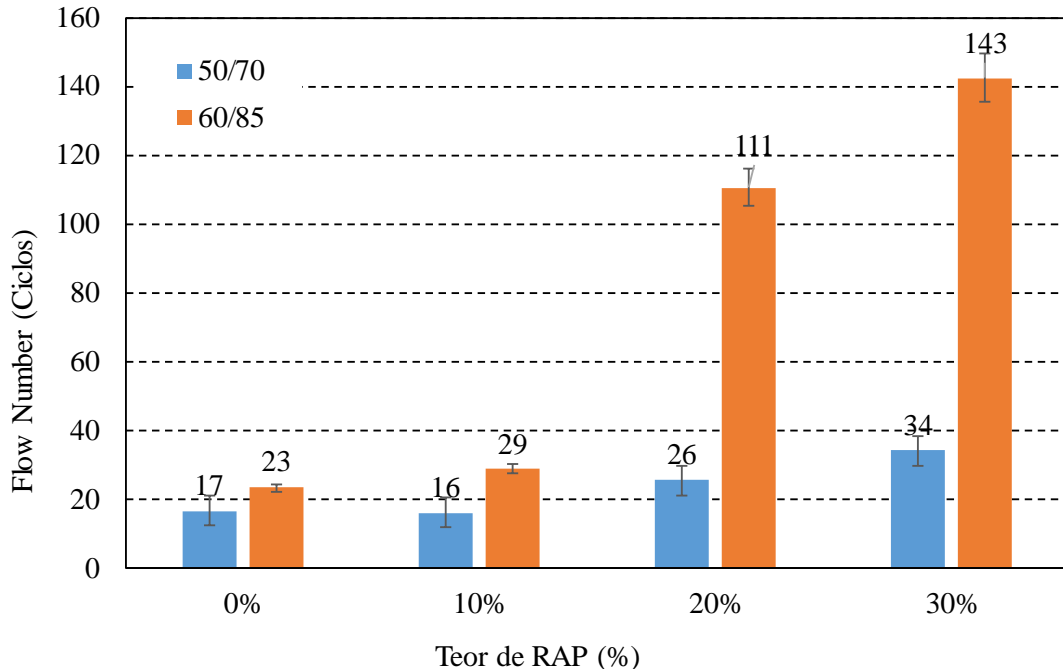
Fonte: Autora.

De acordo com a norma americana AASHTO T79, para dois corpos de prova, o CV deve ser inferior ao valor de 14,1% e para três amostras não deve ser maior que 11,5%. Ao analisar os CV da Tabela 19, nota-se que apenas duas misturas estão acima do permitido pela norma americana, isto pode ocorrer devido à influência da heterogeneidade do material RAP, ou ainda de variações durante a mistura e moldagem dos corpos de prova.

A Figura 49 dispõe graficamente os resultados de FN para todas as misturas. É possível observar que, apesar do aumento do teor de fresado nas misturas terem elevado o FN, todas elas

tiveram valores muito abaixo dos resultados encontrados nas literaturas, sendo as misturas com 50/70 detentoras dos menores valores.

Figura 49 - Resultados de FN para as oito misturas



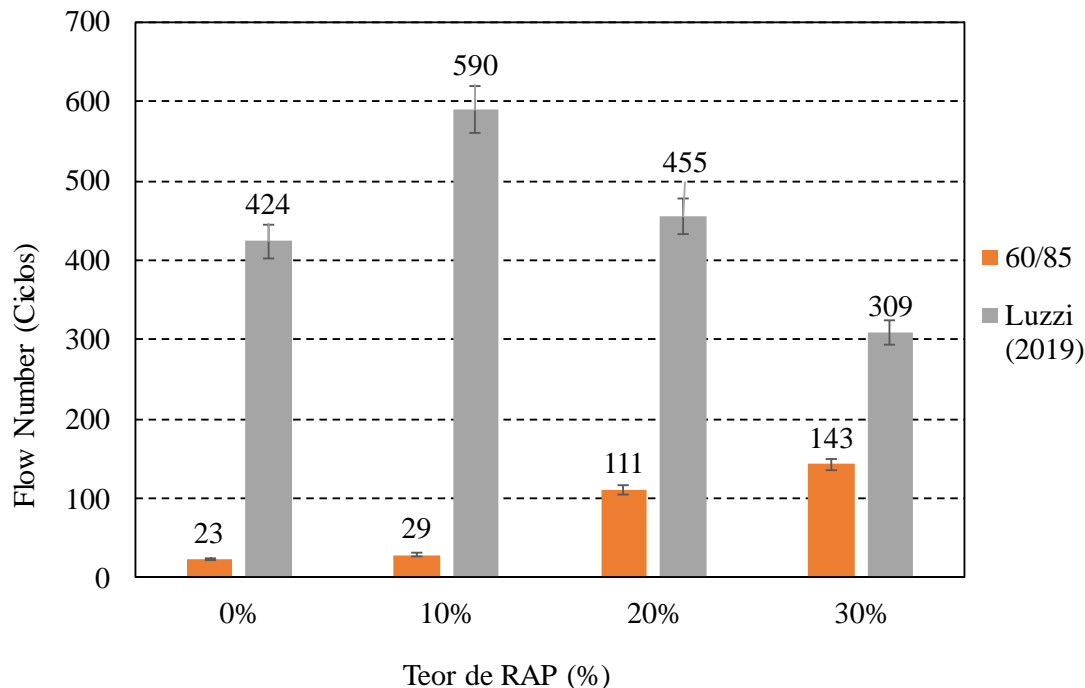
Fonte: Autora.

Assim como esta pesquisa, Centofante (2016) constatou um aumento em seus valores de FN com o aumento da inserção de RAP em suas misturas

Suzuki (2019), assim como esta pesquisa, obteve valores de FN baixos para suas misturas com até 25% de RAP sem agente rejuvenescedor, entre 188 e 353 ciclos, já as misturas com altos teores de RAP (35%, 50% e 60%) suportaram um número maior de ciclos, variando entre 1.198 e 1.833. Bohn (2017), também obteve valores mais altos para o FN a medida em que o teor de RAP inserido aumentou, tanto para as misturas com ligante 50/70, como para as com ligante 60/85.

Contrapondo os estudos citados anteriormente, Luzzi (2019) concluiu que quanto maior o percentual de RAP adicionado, pior é o comportamento a deformação permanente das misturas. Entre as misturas recicladas, a que obteve maior valor foi a mistura com 10% de RAP. A Figura 50 apresenta uma comparação entre os valores das misturas com ligante 60/85 deste estudo e os resultados encontrados por Luzzi (2019), onde é possível perceber que, apesar das misturas serem compostas pelo mesmo tipo de agregado, ligante virgem e fonte de RAP, os valores encontrados pelo autor são superiores aos encontrados nesta pesquisa.

Figura 50 - Comparação entre Resultados de FN das misturas com ligante 60/85

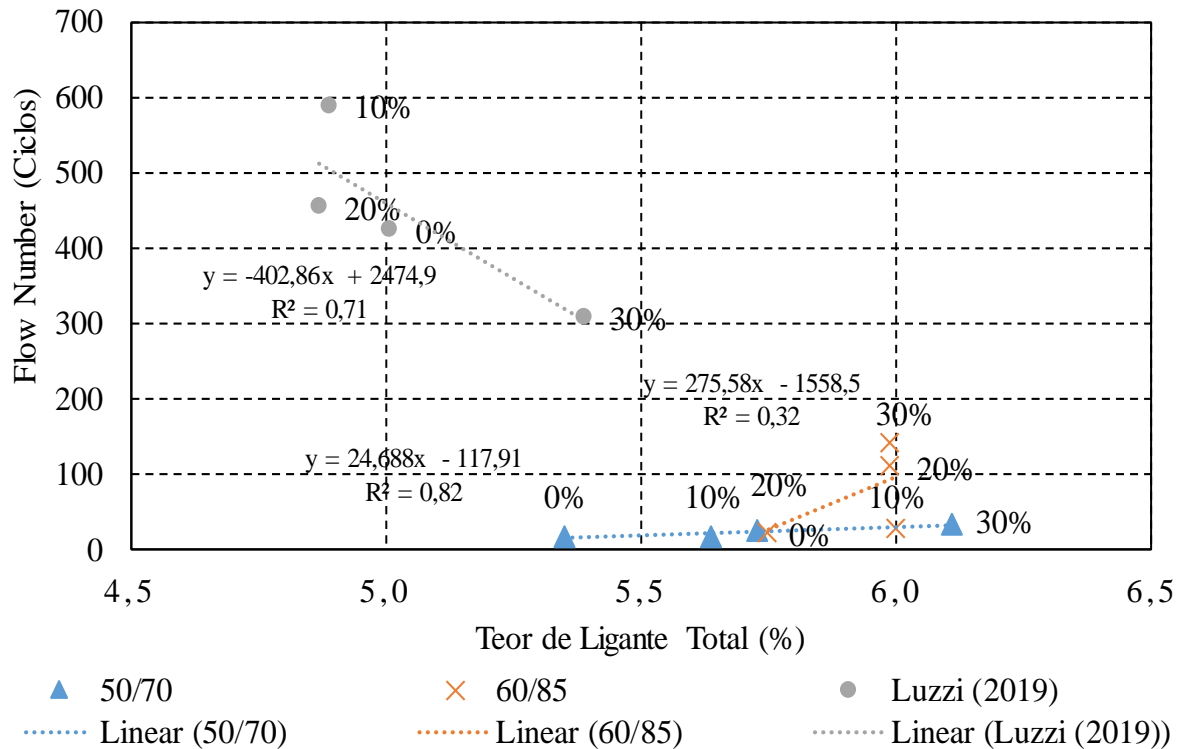


Fonte: Autora.

Vale ressaltar que as misturas desta pesquisa apresentaram teor de ligante final mais alto que as estudadas por Luzzi (2019), podendo este fato ter contribuído para os valores serem baixos. Misturas com teores de ligantes mais altos tendem a apresentar FN baixos, pois a espessura do filme asfáltico no entorno do agregado aumenta, causando redução no atrito entre os grãos, em altas temperaturas, aumentando também a mobilidade das partículas e lubrificando com maior intensidade o contato agregado-agregado. Sendo assim, há a redução da resistência ao cisalhamento que o atrito entre os agregados produz na mistura (ALMEIDA JR., 2016; BOHN, 2017). A Figura 51 apresenta graficamente a relação entre os resultados de FN com o teor de ligante final para as oito misturas desta pesquisa e as de Luzzi (2019).

Além disso, Luzzi (2019), após usar suas misturas, encaminhou as massas para laboratório. Para produzir corpos de prova e posterior realização de ensaios tecnológicos, o autor aqueceu suas massas usinadas em estufa a 110°C durante duas horas e inseriu as amostras no misturador, na temperatura de compactação, para a realização da moldagem das amostras. Desta forma, outro motivo para os valores encontrados pelo autor serem mais elevados é o fato de que as misturas foram pré-aquecidas e misturadas novamente, causando maior envelhecimento do ligante presente nas massas usinadas, e consequentemente um aumento no valor de rigidez.

Figura 51 - Relação entre teor de ligante total e resultados de FN



Fonte: Autora.

Em relação aos valores propostos na literatura de limites de FN para tráfegos médio e pesado, Nascimento (2008) propôs valores de FN mínimos de 300 ciclos para tráfego médio e de 750 ciclos para tráfego pesado. Faccin (2018) avaliou 24 misturas no Rio Grande do Sul quanto ao comportamento da deformação permanente com o ensaio de FN e propôs um critério para intervalos de níveis de tráfego. Para nível pesado de tráfego o valor é de 600 ciclos e para o nível de tráfego médio foi mantido o mesmo que Nascimento (2008), de 300 ciclos. Bastos *et al.* (2017) também propôs critérios de FN para os mesmos níveis de tráfego, 100 ciclos para o médio, e para pesado, 300 ciclos.

Observando os valores obtidos, nenhuma mistura atende os limites propostos por Nascimento (2008) e Faccin (2018). Já, para os limites propostos por Bastos *et al.* (2017), as misturas 20 RAP 60/85 e 30 RAP 60/85 atendem o limite para tráfego médio.

Ainda, é importante verificar a influência mineralógica nos resultados de FN. Faccin (2018), em seu estudo, comparou resultados de deformação permanente de diversas misturas aplicadas no estado do Rio Grande do Sul. Duas das misturas continham agregado granítico, de mesma origem que as estudadas nesta pesquisa. O autor confirmou com os resultados de FN a influência da origem mineralógica do agregado, uma vez que os menores valores de FN obtidos

para as misturas com ligante 60/85 foram para as produzidas com agregados graníticos. Analisando os ensaios dos agregados, constata-se que as duas pedreiras com agregados graníticos apresentam as maiores perdas por abrasão. O autor também visualizou agregados graúdos quebrados no final do ensaio de FN, o que explicou a maior deformação do corpo de prova e, conseqüentemente, redução do número de ciclos. Portanto, acredita-se que os resultados de FN desta pesquisa tenham sido baixos devido à origem mineralógica do agregado.

4.3.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Tabela 20 apresenta a média dos valores de RT encontrados para as misturas estudadas, os desvios padrões encontrados e os coeficientes de variação. De acordo com a especificação DNIT ES 031/2006, o valor mínimo para o ensaio de RT é de 0,65 MPa para misturas asfálticas com ligante convencional. Já a DNER 385/99 – Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero, determina que as misturas asfálticas com ligante modificado por polímero devem possuir valores de RT no entre 0,7 a 1,2 MPa.

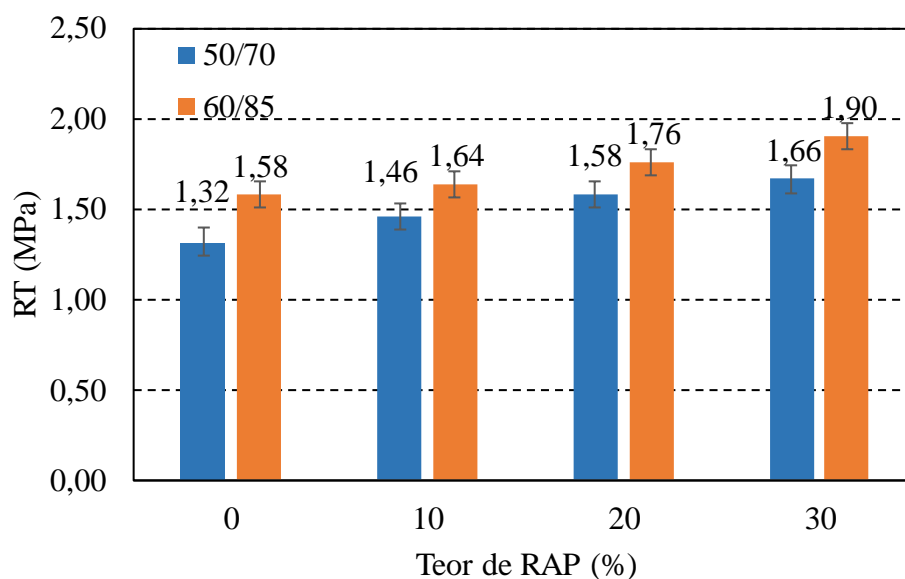
Tabela 20 - Valores médios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, a 25°C

| Mistura | RT (MPa) | DP | CV (%) |
|--------------|----------|------|--------|
| REF 50/70 | 1,32 | 0,04 | 3,10 |
| 10 RAP 50/70 | 1,46 | 0,03 | 1,87 |
| 20 RAP 50/70 | 1,58 | 0,02 | 1,30 |
| 30 RAP 50/70 | 1,65 | 0,06 | 3,88 |
| REF 60/85 | 1,58 | 0,01 | 0,66 |
| 10 RAP 60/85 | 1,64 | 0,07 | 4,41 |
| 20 RAP 60/85 | 1,76 | 0,03 | 1,76 |
| 30 RAP 60/85 | 1,78 | 0,08 | 4,20 |

Fonte: Autora.

A Figura 52 apresenta graficamente os resultados encontrados para RT em função do teor de fresado. Nota-se que com o aumento da porcentagem do material RAP nas misturas, os valores de RT também aumentam e que todas as misturas atendem aos limites indicados pelas normas. As misturas com ligante 60/85 obtiveram valores mais altos para o RT que as misturas com ligante 50/70, o que era esperado, uma vez que o ligante modificado por polímero aumenta a resistência da mistura. Tal comportamento entre os dois ligantes também foi confirmado por Bohn (2017) e Bruxel (2015).

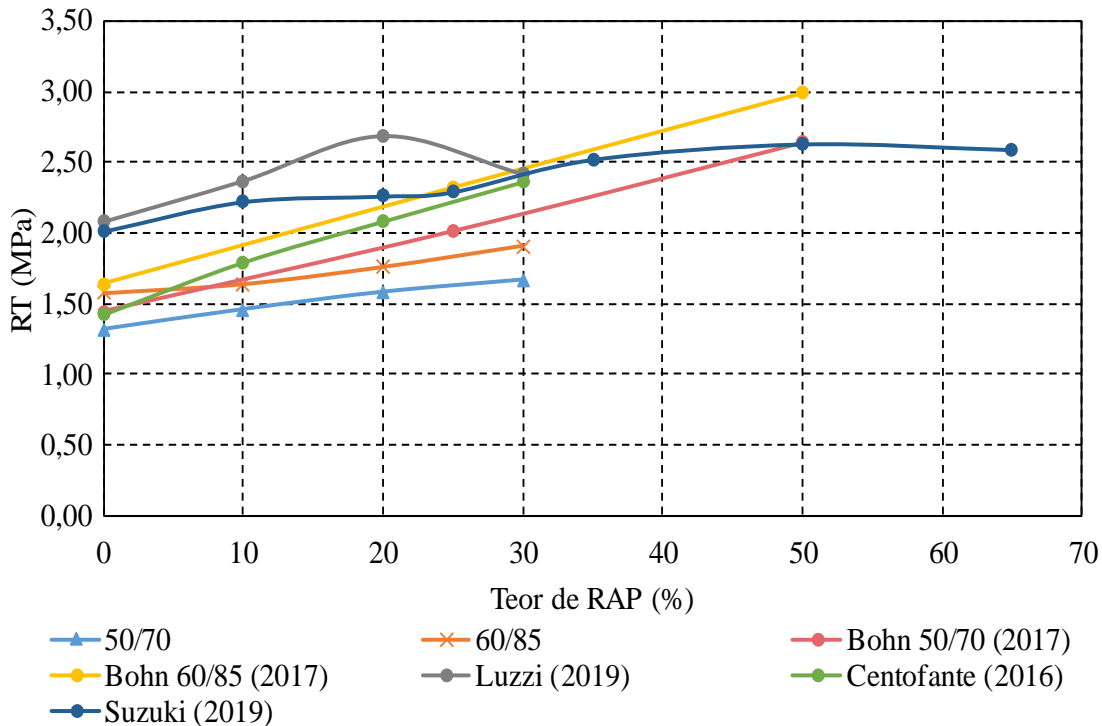
Figura 52 - Resultados encontrados para RT em função do teor de RAP incorporado



Fonte: Autora.

Na Figura 53 estão plotados graficamente uma comparação entre os valores de RT, em função da porcentagem de RAP incorporada, desta pesquisa, Centofante (2016), Bohn (2017), Luzzi (2019) e Suzuki (2019). É possível observar que a maioria dos autores encontraram um aumento no valor de RT proporcionalmente ao aumento do teor de RAP, apenas Luzzi (2019) encontrou uma queda no valor de RT da mistura de 20% para a de 30% de RAP.

Figura 53 - Comparação entre os valores de RT em função do teor de RAP entre esta pesquisa, Centofante (2016), Bohn (2017), Luzzi (2019) e Suzuki (2019)



Fonte: Autora.

4.3.3 Fadiga à Tração-Compressão Uniaxial

Neste tópico são apresentados os resultados e as análises obtidas através do ensaio de fadiga. Primeiramente é apresentado uma abordagem clássica das curvas de Wöhler por meio dos dados brutos obtidos no ensaio. Após, são apresentadas as curvas C vs. S para as misturas, geradas a partir do modelo S-VECD, seguido das envoltórias de ruptura G^R vs. N_f com uma simulação de fator de fadiga da mistura proposta por Nascimento (2015).

Por fim, são apresentados os resultados obtidos a partir da simulação de uma estrutura típica de pavimento no software LVECD, que consistem nas curvas de dano médio acumulado para as misturas ao longo do período de projeto escolhido e permitem uma nova análise quanto ao comportamento das misturas em relação à fadiga.

4.3.3.1 Curvas de Wöhler

A análise da fadiga pelas curvas de Wöhler trata-se de uma abordagem clássica, que se utiliza dos resultados de deformação e número de ciclos correspondente à ruptura (N_f), obtidos

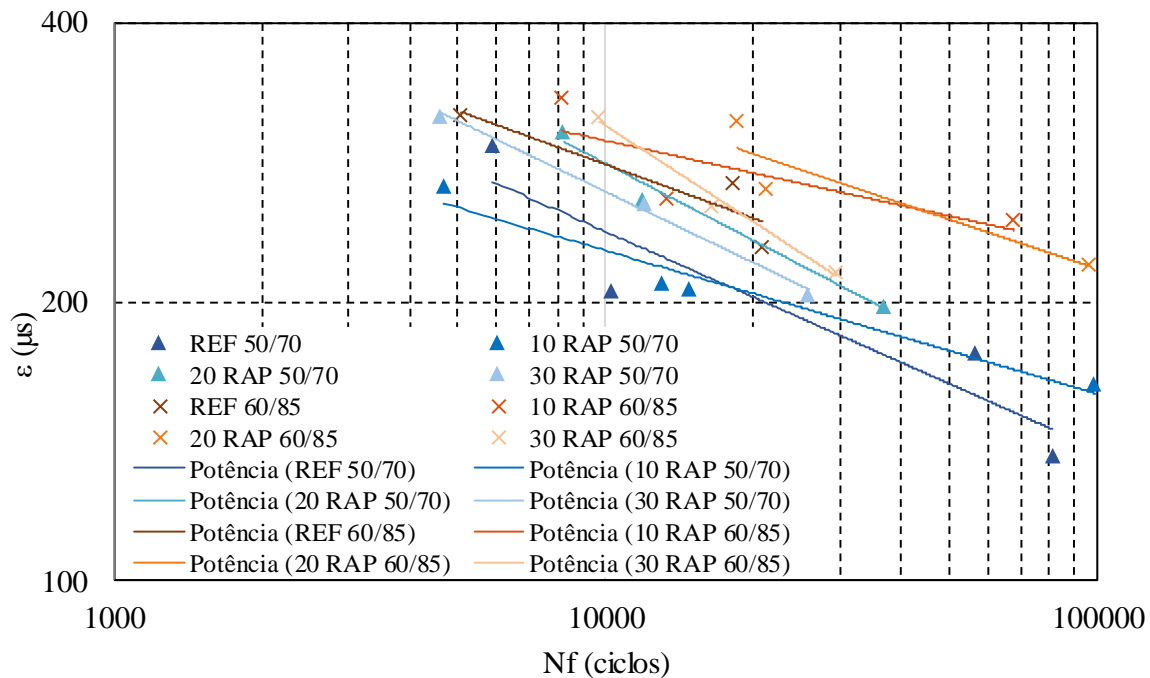
diretamente do ensaio de fadiga. O critério de ruptura utilizado neste ensaio é o de pico de ângulo de fase. A Tabela 21 apresenta os dados de deformação e ciclo de ruptura, utilizados na obtenção das curvas de Wöhler, apresentadas na Figura 54.

Tabela 21 - Dados de deformação e ciclo de ruptura para cada amostra

| Mistura | ϵ (μs) | Nf |
|----------------|---|-----------|
| REF 50/70 | 136,91 | 81434 |
| | 206,1 | 10255 |
| | 176,3 | 56451 |
| | 296 | 573 |
| 10% RAP 50/70 | 163,29 | 99180 |
| | 266,55 | 4693 |
| | 210,25 | 13085 |
| | 206,67 | 14854 |
| 20% RAP 50/70 | 198,36 | 36940 |
| | 305,81 | 8209 |
| | 258,72 | 11937 |
| 30% RAP 50/70 | 204,12 | 25956 |
| | 255,06 | 12068 |
| | 317 | 4619 |
| REF 60/85 | 318 | 5084 |
| | 229 | 20813 |
| | 269 | 18133 |
| 10% RAP 60/85 | 245 | 67661 |
| | 259 | 13289 |
| | 332 | 8120 |
| 20% RAP 60/85 | 313 | 18479 |
| | 220 | 96382 |
| | 265 | 21322 |
| 30% RAP 60/85 | 254 | 16483 |
| | 317 | 9708 |
| | 216 | 29434 |

Fonte: Autora.

Figura 54 - Curvas de Wöhler através dos dados experimentais



Fonte: Autora.

A partir das curvas de Wöhler, foi possível gerar um modelo de potência para cada mistura e obter os parâmetros A, B e R^2 , que estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Parâmetros A, B e R^2

| Mistura | Modelo de potência e R^2 | | |
|--------------|----------------------------|--------|-------|
| | A | B | R^2 |
| REF 50/70 | 2055,8 | -0,234 | 0,86 |
| 10 RAP 50/70 | 939,37 | -0,154 | 0,96 |
| 20 RAP 50/70 | 3567 | -0,276 | 0,98 |
| 30 RAP 50/70 | 2720,7 | -0,254 | 0,99 |
| REF 60/85 | 1656,8 | -0,193 | 0,83 |
| 10 RAP 60/85 | 868,32 | -0,166 | 0,63 |
| 20 RAP 60/85 | 1657,4 | -0,177 | 0,83 |
| 30 RAP 60/85 | 7413,5 | -0,345 | 0,99 |

Fonte: Autora.

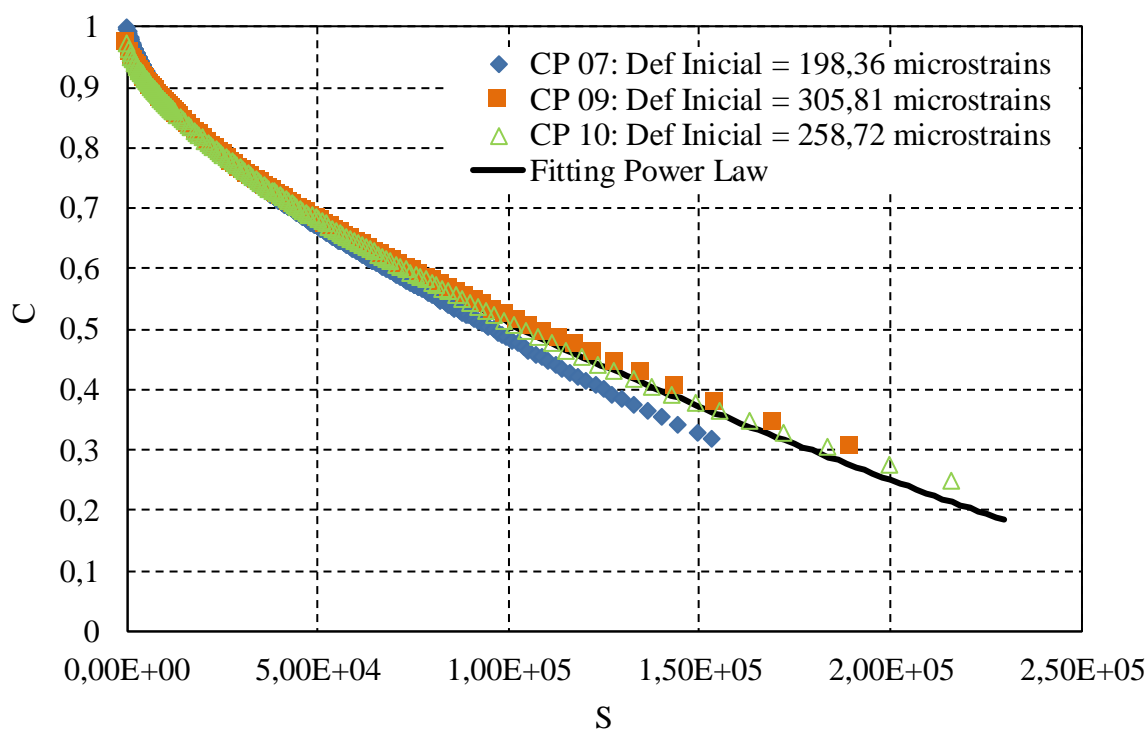
4.3.3.2 Modelo Viscoelástico de Dano Contínuo

A aplicação do modelo S-VECD foi realizada para a análise dos resultados de fadiga através de uma rotina de cálculos pelo software MATLAB, e foi possível obter uma curva característica para cada material, as curvas C versus S, sendo C a integridade do material e S o

acúmulo de dano. O modelo foi ajustado para diferentes magnitudes de deformação, com cada amostra variando entre 150 e 300 μs . Ainda, conforme Daniel e Kim (2002), as curvas C versus S devem se apresentar sobrepostas umas às outras, mesmo sendo submetidas a deformações diferentes no ensaio, pois a curva C versus S é uma propriedade do material e independe das condições de carregamento e temperatura.

Para a aplicação do modelo, foram utilizados os resultados do ensaio de módulo complexo (*fingerprint*), realizado anteriormente a cada ensaio de fadiga, e os resultados do ensaio de fadiga. Para o conjunto de curvas de cada mistura, foi realizado um *fitting*, para a obtenção da curva característica de dano de cada mistura. Além disso, a equação do modelo de potência (*power law*) utilizada é do tipo: $C = 1 - C_{11} \times S^{C_{12}}$, onde C_{11} e C_{12} são as constantes de regressão. A Figura 55 apresenta a curva da mistura 20 RAP 50/70, escolhida para exemplificar.

Figura 55 - Curva C vs. S da mistura 20 RAP 50/70

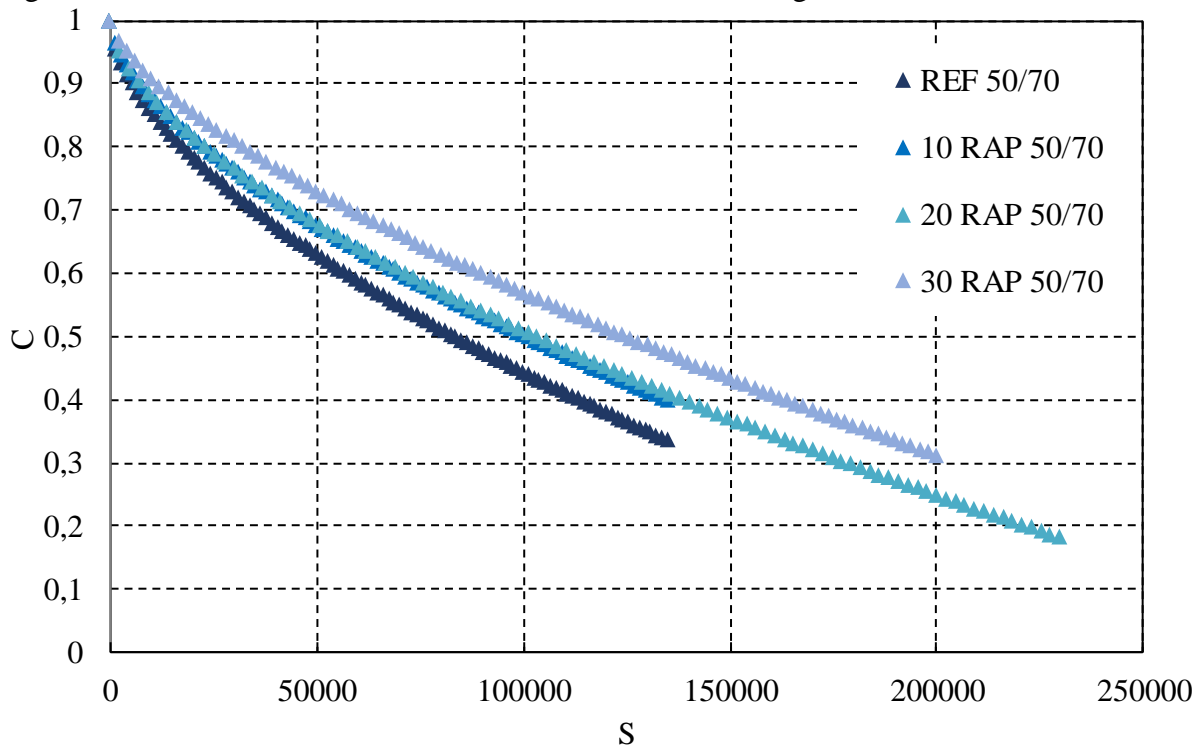


Fonte: Autora.

Pode-se observar que todas as curvas se sobrepõem, o que demonstra que, apesar das amostras serem submetidas à diferentes deformações, suas curvas tem o mesmo comportamento frente ao dano, validando, assim, a teoria do S-VECD. As demais curvas C versus S para cada mistura também obtiveram o mesmo comportamento e estão apresentadas no Apêndice B.

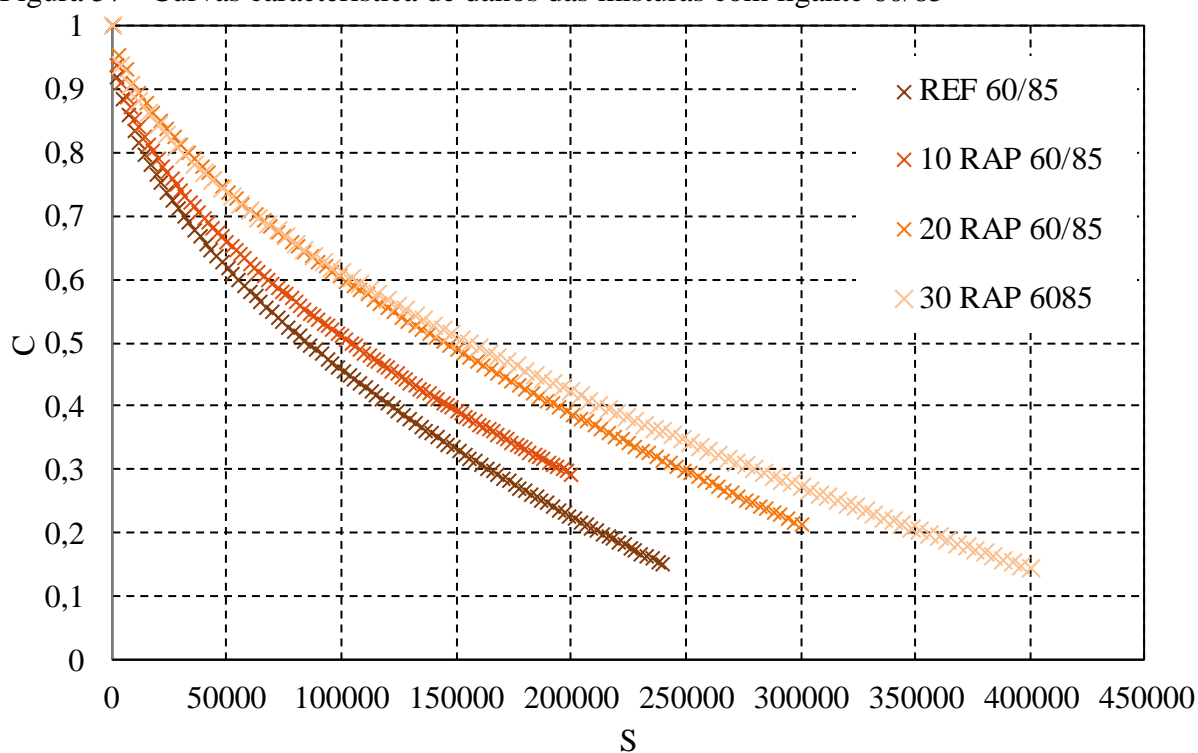
Na Figura 56, Figura 57 e Figura 58, estão apresentadas, respectivamente, o *fitting* das curvas C versus S para as misturas compostas por ligante 50/70, seguida das misturas com ligante 60/85, e, por fim, com todas as misturas.

Figura 56 - Curvas características de dano das misturas com ligante 50/70



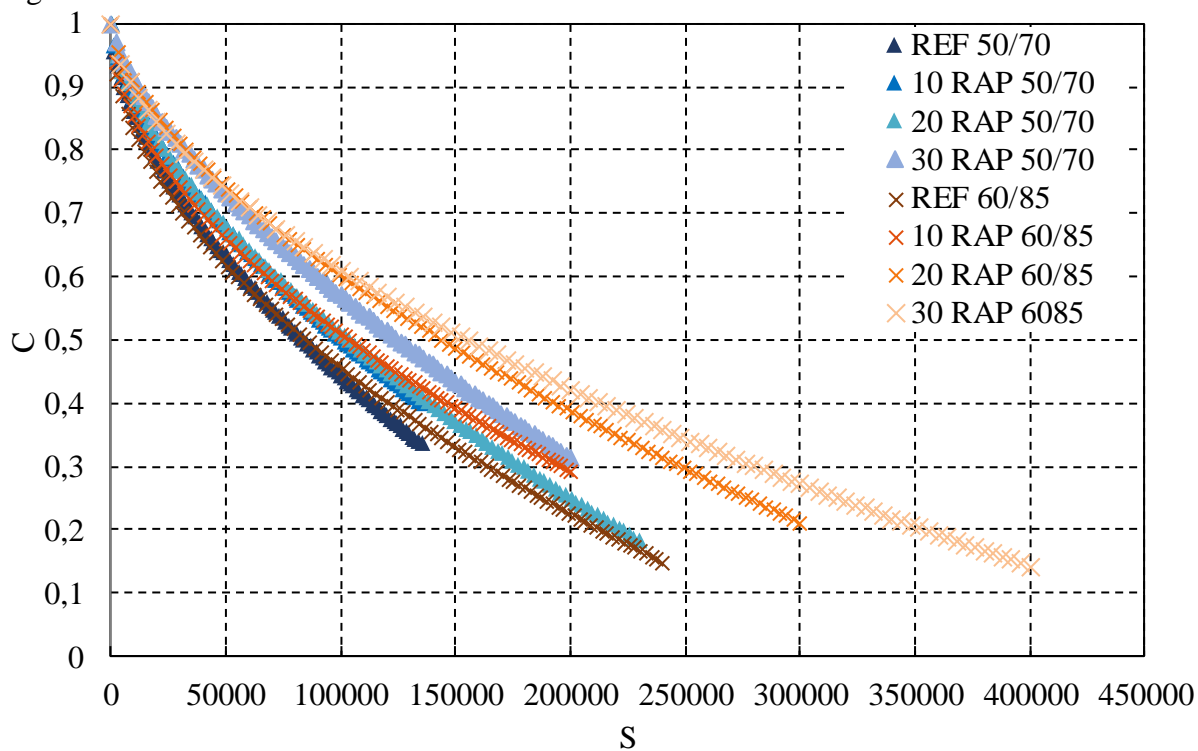
Fonte: Autora.

Figura 57 - Curvas característica de danos das misturas com ligante 60/85



Fonte: Autora.

Figura 58 - Curvas características de dano das oito misturas



Fonte: Autora.

Ao analisar as curvas características de dano, verifica-se que, para ambos os tipos de ligante, as misturas de referência foram as que apresentaram, nos ciclos iniciais, uma taxa de perda de integridade maior que as misturas com algum teor de RAP. As misturas com 30% de RAP apresentaram a concavidade menos acentuada, se comparadas com as demais, indicando uma maior resistência ao dano.

Ainda, todas misturas romperam com nível de integridade próximos, com C variando de 0,4 a 0,1, sendo a mistura 10 RAP 50/70 a que apresentou menor valor para este quesito. As misturas com ligante 50/70 apresentaram um intervalo de acúmulo de dano menor, variando o S entre 100.000 e 200.000. Já para as misturas com ligante 60/85, este intervalo ficou entre 200.000 e 400.000, sendo as misturas com 30 RAP 60/85 e 20 RAP 60/85 as que apresentaram maiores valores.

Embora as curvas C versus S sejam uma boa ferramenta para inferir sobre o comportamento quanto à fadiga das misturas, uma melhor análise pode ser realizada utilizando as envoltórias de ruptura e simulações com estruturas típicas de pavimento.

O critério de falha por fadiga utilizado nesta pesquisa foi o G^R , desenvolvido por Sabouri e Kim (2014). Neste critério são geradas as envoltórias de ruptura, G^R vs. N_f , onde G^R compreende a taxa de variação média de energia de pseudo deformação liberada por ciclo de ensaio. Estas envoltórias são ajustadas por um modelo de potência e apresenta formato linear na escala logarítmica. O ajuste segue a equação $G^R = Y \times N_f^\Delta$, sendo Y e Δ coeficientes da curva. A Tabela 23 apresenta os valores encontrados para os coeficientes C11 e C12, obtidos pelo *fitting* da curva C vs. S, e os coeficientes Y, Δ e α (taxa de evolução do dano).

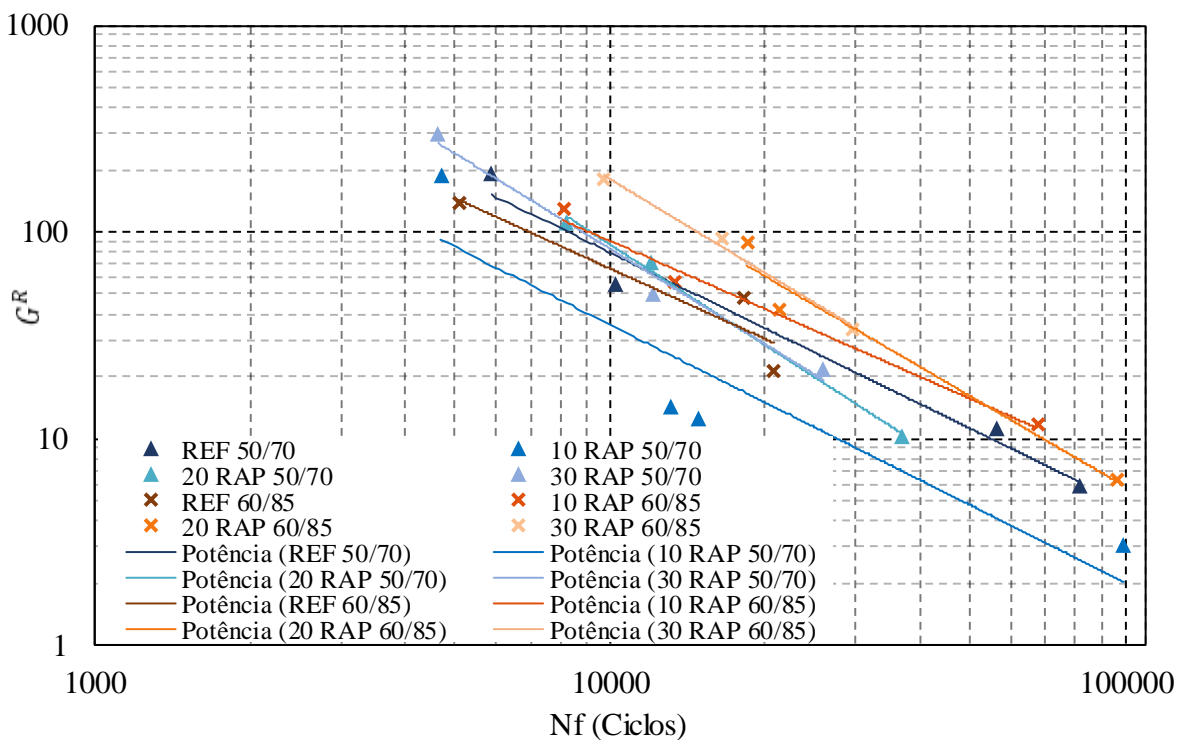
Tabela 23 - Coeficientes C11 e C12 do *fitting* das curvas C vs. S e coeficientes Y, Δ e α

| Mistura | Fitting curvas CxS | | Curva Gr x Nf | | α |
|--------------|--------------------|----------|---------------|----------|----------|
| | C11 | C12 | Y | Δ | |
| REF 50/70 | 0,000608 | 0,592042 | 5869685 | -1,22 | 3,069425 |
| 10 RAP 50/70 | 0,000385 | 0,622121 | 3515676 | -1,25 | 3,170771 |
| 20 RAP 50/70 | 0,000415 | 0,614287 | 2,51E+08 | -1,62 | 3,084277 |
| 30 RAP 50/70 | 0,000178 | 0,678288 | 63298124 | -1,47 | 3,211075 |
| REF 60/85 | 0,001505 | 0,511519 | 2206528 | -1,13 | 3,308166 |
| 10 RAP 60/85 | 0,001119 | 0,528325 | 2118931 | -1,09 | 3,128549 |
| 20 RAP 60/85 | 0,000308 | 0,622121 | 1,11E+08 | -1,46 | 3,199195 |
| 30 RAP 60/85 | 0,000558 | 0,568785 | 1,95E+08 | -1,51 | 3,327151 |

Fonte: Autora.

A Figura 59 apresenta as envoltórias de ruptura G^R vs. N_f . As misturas que tendem a um melhor desempenho a fadiga apresentam envoltórias mais acima e a direita no gráfico, além de menores inclinações.

Figura 59 - Envoltória de ruptura G^R vs. N_f



Fonte: Autora.

Ao analisar a figura com as envoltórias, pode-se perceber que as misturas 20 RAP 50/70 e 30 RAP 50/70 são as misturas que apresentam maior inclinação na curva, indicando que, possivelmente, estas apresentam um pior desempenho à fadiga. Ainda assim, as curvas apresentaram comportamentos bem parecidos, sendo necessário a análise delas com simulações em pavimentos típicos, que será realizado por meio do software LVECD e apresentado no próximo item desta pesquisa. A Tabela 24 apresenta os dados das equações de G^R para todas as misturas e os valores para o R^2 .

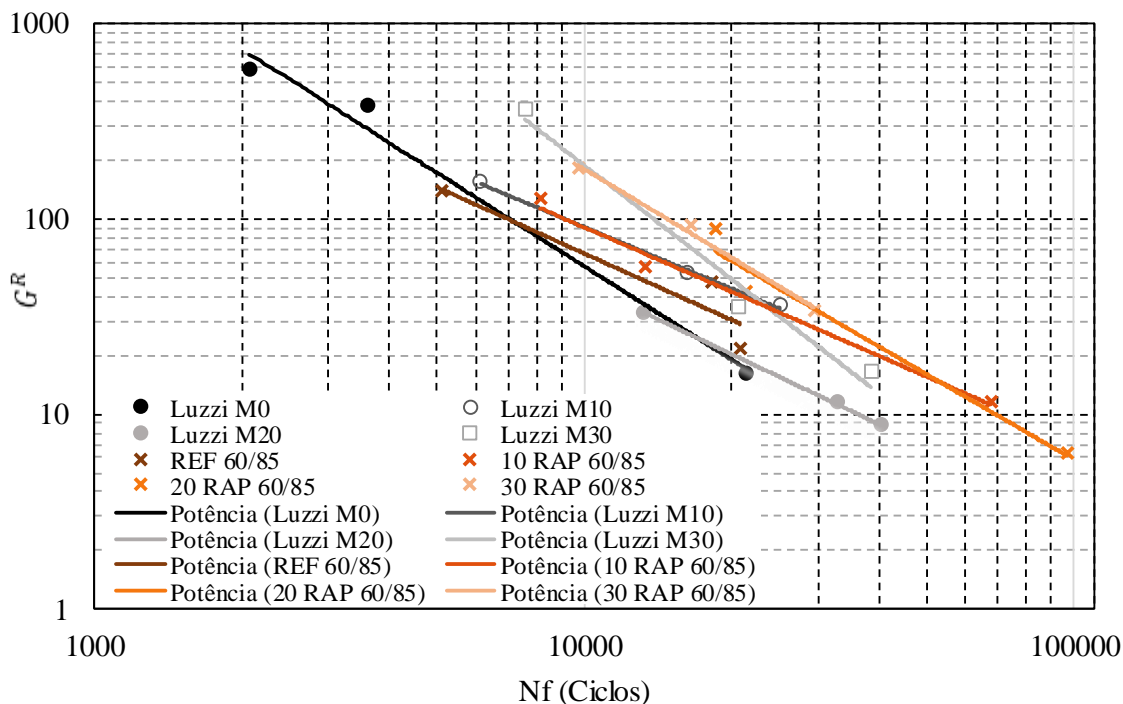
Tabela 24 - Equações das curvas GR e R²

| Mistura | Equação da curva GR | R ² |
|--------------|--|----------------|
| REF 50/70 | $GR = 5,89 \times 10^7 \times N_f^{-1,22}$ | 0,98 |
| 10 RAP 50/70 | $GR = 3,51 \times 10^6 \times N_f^{-1,25}$ | 0,85 |
| 20 RAP 50/70 | $GR = 2,51 \times 10^8 \times N_f^{-1,62}$ | 1,00 |
| 30 RAP 50/70 | $GR = 6,33 \times 10^7 \times N_f^{-1,47}$ | 0,98 |
| REF 60/85 | $GR = 2,20 \times 10^6 \times N_f^{-1,13}$ | 0,88 |
| 10 RAP 60/85 | $GR = 2,12 \times 10^6 \times N_f^{-1,09}$ | 0,99 |
| 20 RAP 60/85 | $GR = 1,10 \times 10^8 \times N_f^{-1,46}$ | 0,96 |
| 30 RAP 60/85 | $GR = 1,95 \times 10^8 \times N_f^{-1,51}$ | 0,99 |

Fonte: Autora.

A Figura 60 apresenta as envoltórias de ruptura GR vs. N_f para as misturas com ligante 60/85 desta pesquisa e as obtidas por Luzzi (2019).

Figura 60 - Envoltória de ruptura GR vs. N_f para as misturas com ligante 60/85 e as de Luzzi (2019)

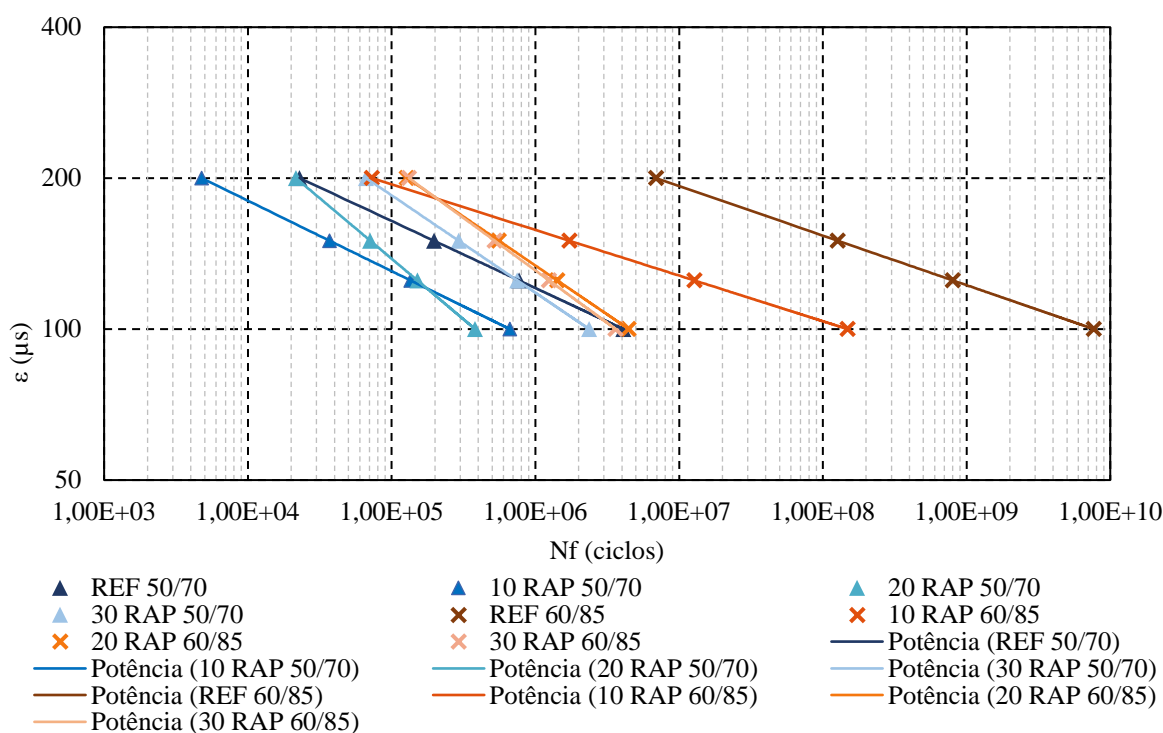


Fonte: Autora.

Comparando as envoltórias de ruptura das misturas com as misturas de Luzzi (2019), nota-se que as misturas M0 e M30 do autor apresentaram uma maior inclinação na curva se comparadas as misturas de referência desta pesquisa e a com 30% de RAP, indicando um pior desempenho à fadiga. As misturas com M10 e M20 apresentaram uma inclinação semelhante às obtidas nessa pesquisa.

Com os resultados obtidos para os parâmetros das curvas C vs. S , as envoltórias de ruptura de G^R , e os dados da caracterização viscoelástica obtidos nos resultados dos ensaios, foi possível aplicar a equação proposta por Nascimento (2016), onde o N_f encontrado se aproxima mais da realidade do ensaio. As equações e a metodologia empregadas para o cálculo deste método podem ser encontradas com mais detalhes no trabalho de Possebon (2018). A Figura 61 apresenta o resultado gráfico após a aplicação deste método e a Tabela 25 apresenta os valores encontrados para o fator de fadiga da mistura (FFM), obtidos após a aplicação da equação de Nascimento (2016).

Figura 61 - Simulação da vida de fadiga a partir do critério de ruptura G^R



Fonte: Autora.

Tabela 25 - Fator de Fadiga das Misturas

| Mistura | FFM |
|--------------|-------|
| REF 50/70 | 1,651 |
| 10 RAP 50/70 | 1,430 |
| 20 RAP 50/70 | 1,492 |
| 30 RAP 50/70 | 1,611 |
| REF 60/85 | 2,517 |
| 10 RAP 60/85 | 1,962 |
| 20 RAP 60/85 | 1,769 |
| 30 RAP 60/85 | 1,758 |

Fonte: Autora.

Nota-se que as misturas com ligante 60/85 obtiveram os maiores valores, indicando um melhor desempenho à fadiga. Ainda, pode-se perceber que a incorporação de RAP não foi favorável, porém, para as misturas com ligante 50/70, a mistura com 30% de RAP elevou o valor chegando muito próximo da mistura de referência.

De posse desses valores de FFM, foi possível comparar os valores com os encontrados por Schuster (2018), Boeira (2018) e Luzzi (2019). Dos três autores, o único que utilizou fresado foi Luzzi (2019), porém, as outras duas pesquisas utilizaram diferentes tipos de ligantes asfálticos (50/70, modificado por polímero, ecoflex e HIMA) e dois tipos de dosagem, Marshall e SUPERPAVE. A Tabela 26 apresenta a classificação das misturas estudadas neste trabalho com as outras três pesquisas.

Tabela 26 - Classificação destas misturas através do FFM com as misturas de Boeira (2018), Schuster (2018) e Luzzi (2019)

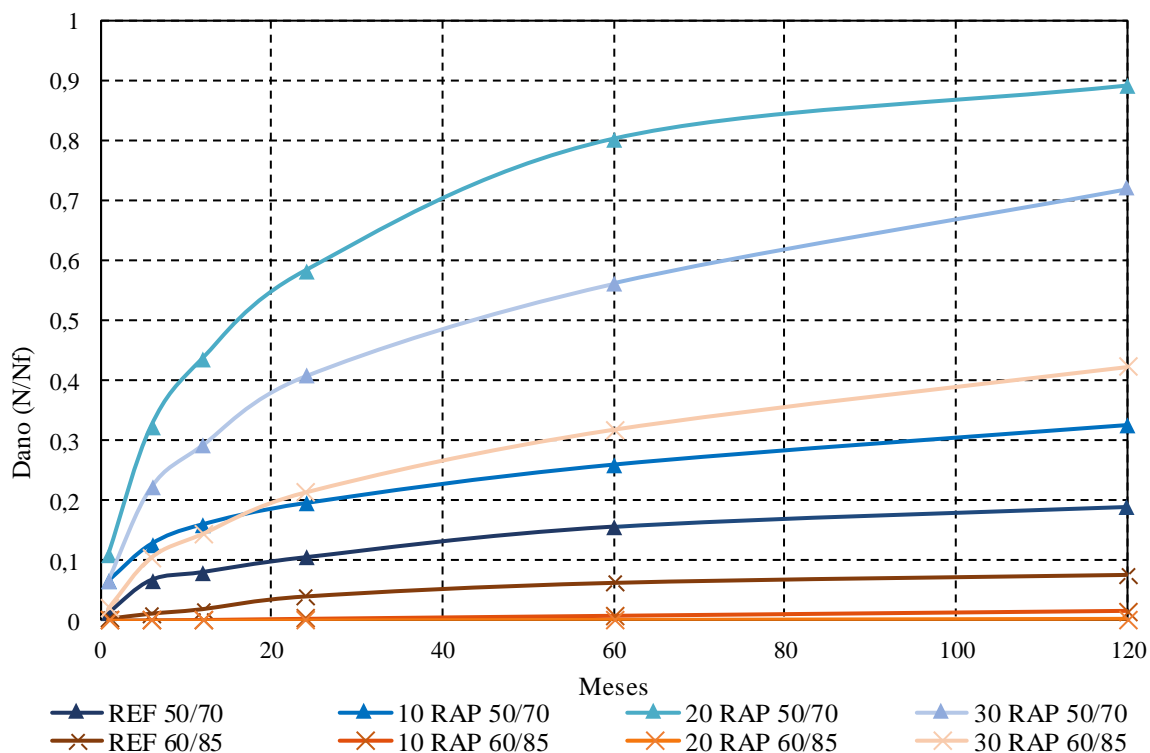
| Mistura | FFM | Posição | Mistura | FFM | Posição |
|-------------------------|--------------|----------------|-------------------------|--------------|----------------|
| REF 60/85 | 2,517 | 1° | Schuster (2018) AMP | 1,555 | 31° |
| Boeira (2018) AMP M | 2,397 | 2° | Boeira (2018) AMP M | 1,546 | 32° |
| Schuster (2018) ECO | 2,394 | 3° | Schuster (2018) ECO | 1,542 | 33° |
| Schuster (2018) AMP | 2,282 | 4° | Boeira (2018) HIMA S | 1,512 | 34° |
| Schuster (2018) ECO | 2,082 | 5° | <i>Luzzi (2019) M30</i> | <i>1,499</i> | <i>35°</i> |
| Boeira (2018) HIMA M | 2,041 | 6° | 20 RAP 50/70 | 1,492 | 36° |
| Boeira (2018) HIMA S | 2,028 | 7° | Schuster (2018) 50/70 | 1,445 | 37° |
| <i>Luzzi (2019) M10</i> | <i>1,987</i> | <i>8°</i> | <i>Luzzi (2019) M0</i> | <i>1,441</i> | <i>38°</i> |
| 10 RAP 60/85 | 1,962 | 9° | Schuster (2018) AMP | 1,436 | 39° |
| Boeira (2018) HIMA M | 1,953 | 10° | 10 RAP 50/70 | 1,430 | 40° |
| Boeira (2018) 50/70 M | 1,944 | 11° | Boeira (2018) HIMA S | 1,429 | 41° |
| Boeira (2018) 50/70 M | 1,800 | 12° | Schuster (2018) 50/70 | 1,426 | 42° |
| Boeira (2018) AMP M | 1,785 | 13° | Schuster (2018) 50/70 | 1,405 | 43° |
| 20 RAP 60/85 | 1,769 | 14° | Schuster (2018) 50/70 | 1,400 | 44° |
| 30 RAP 60/85 | 1,758 | 15° | Boeira (2018) 50/70 S | 1,383 | 45° |
| Schuster (2018) AMP | 1,750 | 16° | Schuster (2018) 50/70 | 1,382 | 46° |
| Schuster (2018) AMP | 1,725 | 17° | Schuster (2018) 50/70 | 1,376 | 47° |
| Boeira (2018) AMP M | 1,709 | 18° | Boeira (2018) HIMA M | 1,374 | 48° |
| Schuster (2018) AMP | 1,680 | 19° | Schuster (2018) 50/70 | 1,368 | 49° |
| Boeira (2018) HIMA M | 1,674 | 20° | Schuster (2018) 50/70 | 1,351 | 50° |
| Schuster (2018) 50/70 | 1,665 | 21° | Boeira (2018) HIMA S | 1,331 | 51° |
| Schuster (2018) 50/70 | 1,661 | 22° | Boeira (2018) AMP S | 1,313 | 52° |
| REF 50/70 | 1,651 | 23° | Boeira (2018) AMP S | 1,269 | 53° |
| Boeira (2018) 50/70 M | 1,647 | 24° | Boeira (2018) 50/70 S | 1,248 | 54° |
| Boeira (2018) 50/70 M | 1,638 | 25° | Boeira (2018) 50/70 S | 1,178 | 55° |
| Schuster (2018) 50/70 | 1,628 | 26° | Schuster (2018) AMP | 1,175 | 56° |
| 30 RAP 50/70 | 1,611 | 27° | Boeira (2018) AMP S | 1,175 | 57° |
| <i>Luzzi (2019) M20</i> | <i>1,584</i> | <i>28°</i> | Boeira (2018) AMP S | 1,157 | 58° |
| Schuster (2018) AMP | 1,567 | 29° | Boeira (2018) 50/70 S | 1,156 | 59° |
| Schuster (2018) AMP | 1,555 | 30° | Schuster (2018) TLAF | 1,031 | 60° |

Fonte: Autora.

É possível observar que as misturas desta pesquisa tiveram uma boa colocação, sendo que a REF 60/85 apresentou o melhor desempenho entre todas misturas, ficando em primeiro lugar. As misturas 60/85 tiveram um desempenho divergente das misturas estudadas por Luzzi (2019), sendo a pior mistura do autor a M0 (mistura de referência), e a melhor a M10 (com 10% de RAP). Novamente, o teor de ligante pode ter influenciado nos resultados, pois misturas com maior teor de ligante tendem a apresentar um melhor comportamento à fadiga. Ainda, a ativação do ligante presente no RAP também influenciou, pois em laboratório consegue-se ter um melhor controle da temperatura do material RAP. É importante ressaltar que os estudos apresentados na tabela foram realizados com metodologias e materiais diferentes, além disso, outros fatores influenciam no desempenho de uma mistura asfáltica. Dessa forma, a tabela serve apenas para comparação do desempenho à fadiga com outros estudos já realizados pelo grupo.

4.3.3.3 Avaliação e simulação de estrutura típica de pavimentos por meio do software LVECD para as misturas estudadas

A análise por meio do software LVECD permite a obtenção de gráficos com a evolução dos danos médios acumulados (N/N_f). Os valores de pseudo rigidez (C) e a relação N/N_f são calculados em pontos diferentes da espessura da camada asfáltica. A N/N_f é encontrada a partir do critério de falha GR e os valores variam de 0 a 1, sendo que esta classificação vai de não possuir dano até a completa danificação da mistura. São medidos valores médios de N/N_f para 110 pontos abaixo da área carregada e o cálculo do dano é diretamente relacionada a distribuição de tensões e deformações ao longo de toda a camada. A Figura 62 apresenta as curvas de dano acumulado das oito misturas para a estrutura apresentada no item 3.3.4.3, e para um tráfego de 1×10^7 .

Figura 62 - Dano acumulado de 120 meses para todas as misturas com tráfego de 1×10^7 

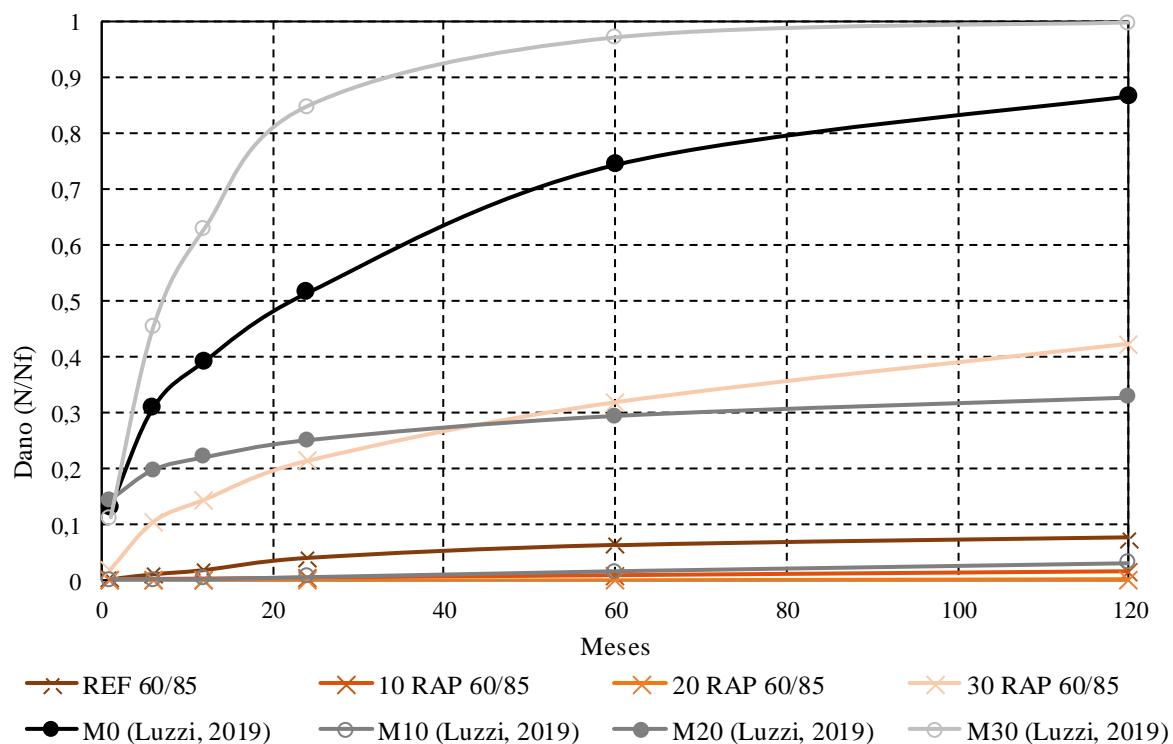
Fonte: Autora.

Observa-se que, em geral, para as misturas com ligante 50/70, a adição de RAP piorou os resultados, sendo as misturas 20 RAP 50/70 e 30 RAP 50/70, as detentoras dos piores desempenhos, o que reforça os resultados encontrados pelas envoltórias de G^R . Já as misturas contendo ligante 60/85 obtiveram um comportamento oposto, as misturas com adição de 10% e 20% de RAP obtiveram um dano acumulado até 120 meses de projeto quase nulo. Porém, a mistura com 30% de fresado apresentou o pior valor entre as misturas com ligante 60/85, confirmando o resultado encontrado anteriormente pela simulação através da equação de Nascimento (2016), FFM.

Uma possível explicação ao diferente comportamento obtido, quanto à adição de RAP, entre as misturas com ligante 50/70 e 60/85 é devido aos tipos de ligantes asfálticos presentes nos RAPs. Desta forma, é importante ressaltar mais uma vez que o ligante presente no RAP das misturas 50/70 é um ligante sem adição de polímeros e o ligante presente no RAP das misturas 60/85 possui polímero em sua composição. Assim, pode-se inferir que o ligante com polímero contido no RAP 60/85, apesar de envelhecido, conferiu às misturas um melhor desempenho à fadiga por se tratar de um ligante com comportamento mais flexível.

A Figura 63 apresenta as curvas de dano acumulado para as misturas com ligante 60/85 e as misturas de Luzzi (2019).

Figura 63 - Dano acumulado de 120 meses as misturas com ligante 60/85 e as de Luzzi (2019) com de tráfego de 1×10^7

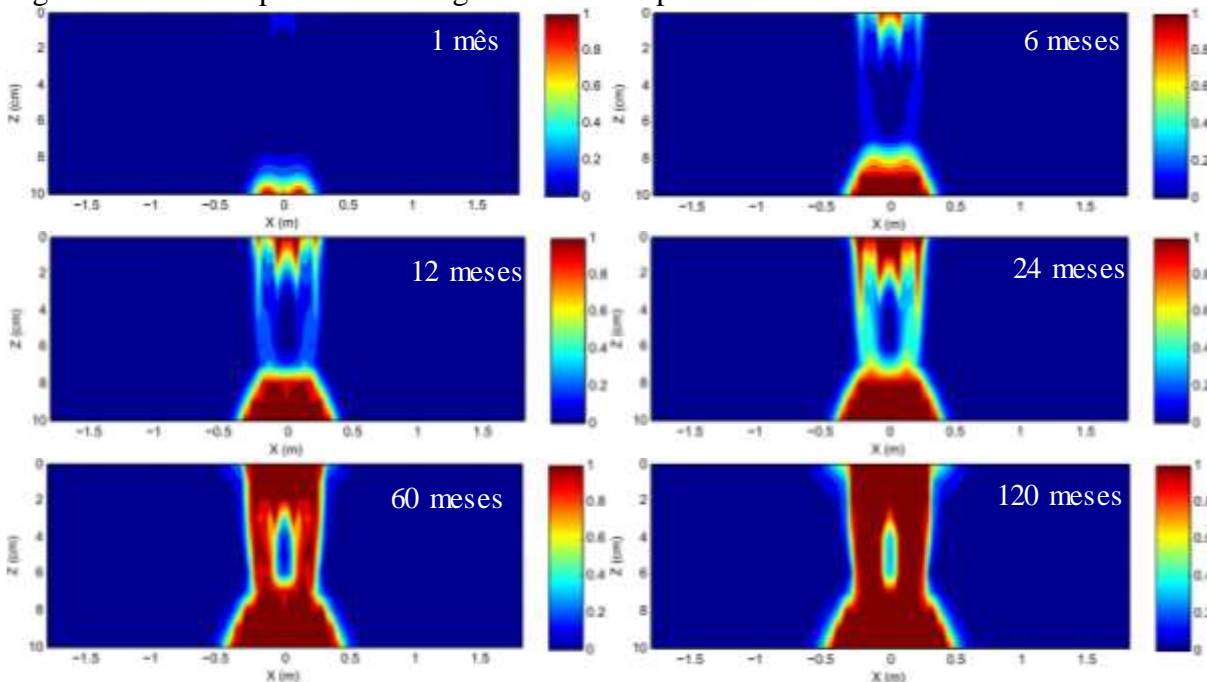


Fonte: Autora.

Ao comparar as curvas de dano das misturas estudadas nesta pesquisa e as obtidas por Luzzi (2019), observa-se que as misturas de Luzzi obtiveram pior comportamento se comparadas com as misturas desta pesquisa, possivelmente pelo fato do teor de ligante das misturas de Luzzi terem ficado abaixo do teor de projeto, devido à eficiência da usina. Ainda assim, a mistura M30 do autor também apresentou o pior comportamento, assim como a mistura com 30% de RAP desta pesquisa.

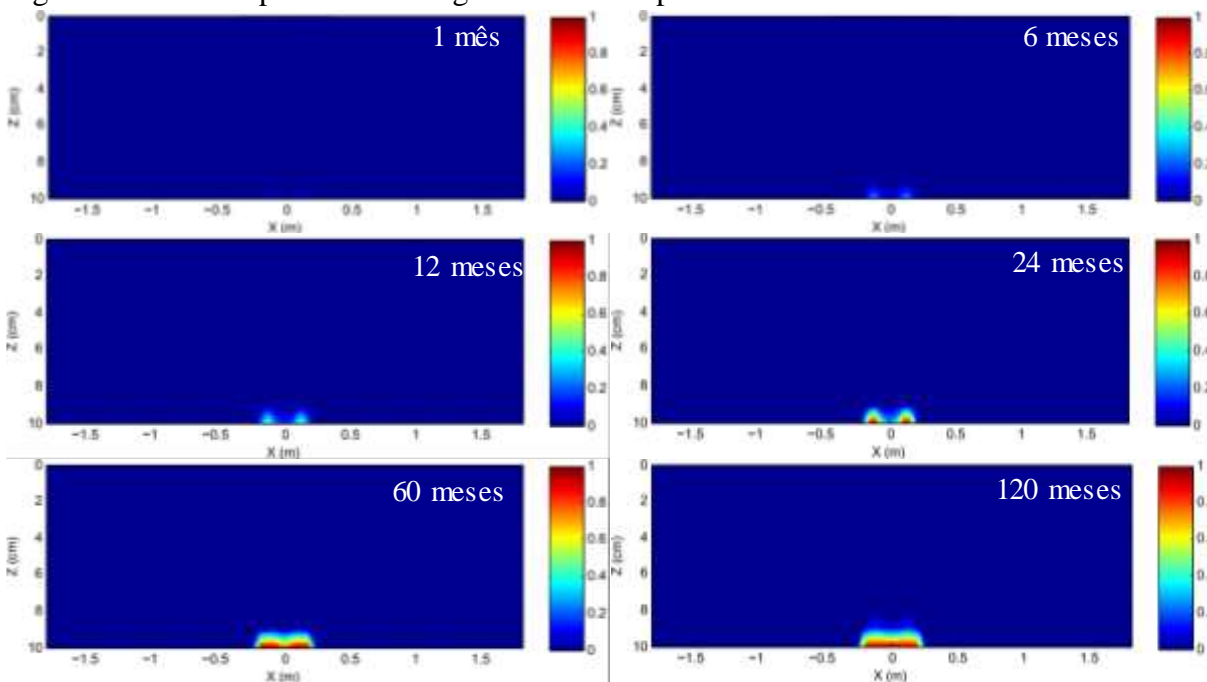
O software LVECD também fornece gráficos térmicos, que permitem a avaliação do dano dentro da espessura da camada de revestimento asfáltico pra cada período avaliado. A partir deste gráfico, pode-se observar o processo de fadiga se inicia nas fibras inferiores do revestimento. A Figura 64 e a Figura 65 apresentam, respectivamente, os gráficos térmicos gerados para as misturas 20 RAP 50/70 e REF 60/85. Estas figuras foram escolhidas para exemplificação, os demais gráficos térmicos estarão apresentados no Apêndice C.

Figura 64 - Dano representado em gráfico térmico para a mistura 20 RAP 50/70



Fonte: Autora.

Figura 65 - Dano representado em gráfico térmico para a mistura REF 60/85



Fonte: Autora.

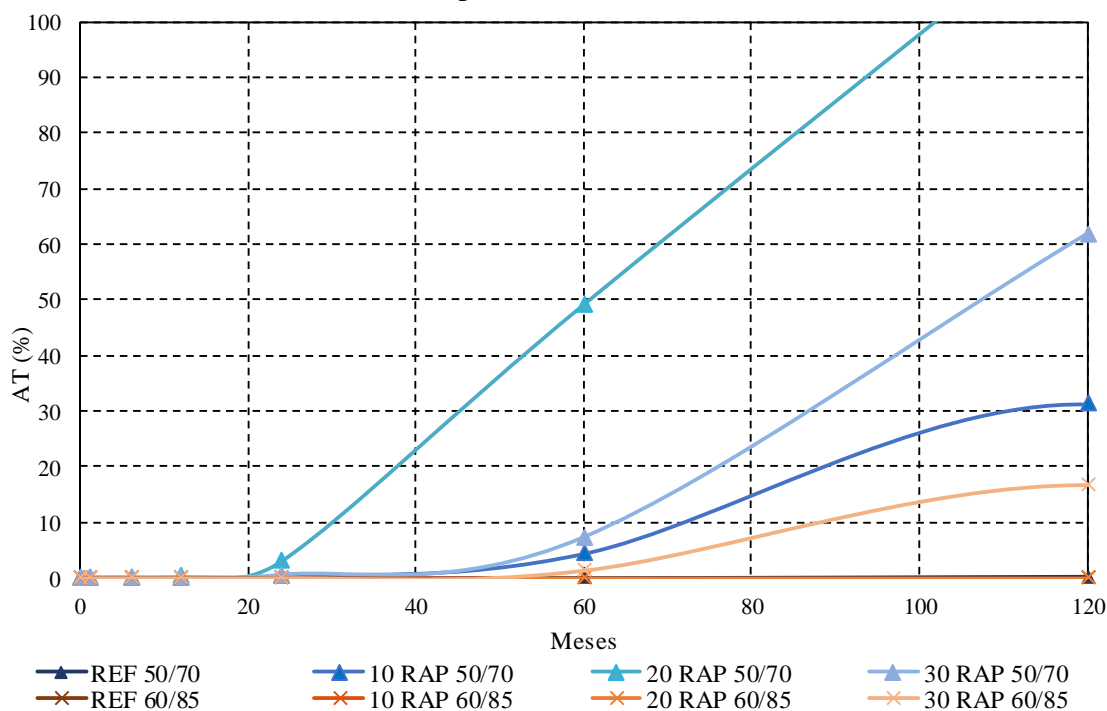
Corroborando os resultados aqui encontrados, Luzzi (2019) também encontrou o melhor comportamento em suas misturas com ligante modificado contendo 10% de RAP e 20% de RAP e que a inserção de 30% de RAP nas misturas demonstrou uma influência negativa, que o autor atribuiu ao processo de usinagem. Porém, a partir dos resultados desta pesquisa, como

todas misturas foram realizadas em laboratório, com alto controle de temperatura e de procedimentos, e a mistura com 30% de RAP também apresentou um baixo desempenho à fadiga, sugere-se que possa existir a influência do grau de ativação do ligante presente no RAP quando utilizado em uma porcentagem maior.

Suzuki (2019), para suas misturas com 25% e 50 % de RAP, ao analisar o comportamento à fadiga, encontrou um melhor desempenho para as misturas com 50% de RAP. A autora atribuiu esse comportamento ao fato de que o ligante presente no RAP possuía borracha.

A partir da função de transferência desenvolvida por Nascimento (2015), foi possível transformar o dano acumulado em percentual de área trincada. O autor observou que o início do trincamento em campo se correlaciona com o mesmo tempo que a mistura atinge 0,35 de dano simulado. Para as misturas que não atingem esse critério, o trincamento provavelmente se estabilizará com 10% ou menos de área trincada. A Figura 66 apresenta o gráfico de área trincada para as misturas estudadas neste trabalho. Seguindo o critério sugerido por Nascimento (2015), as misturas com ligante 60/85, com exceção da 30 RAP 60/85, e a mistura REF 50/70 se estabilizariam em campo e apresentariam um bom desempenho à fadiga. É importante ressaltar esta análise é válida apenas para as misturas estudadas nessa pesquisa.

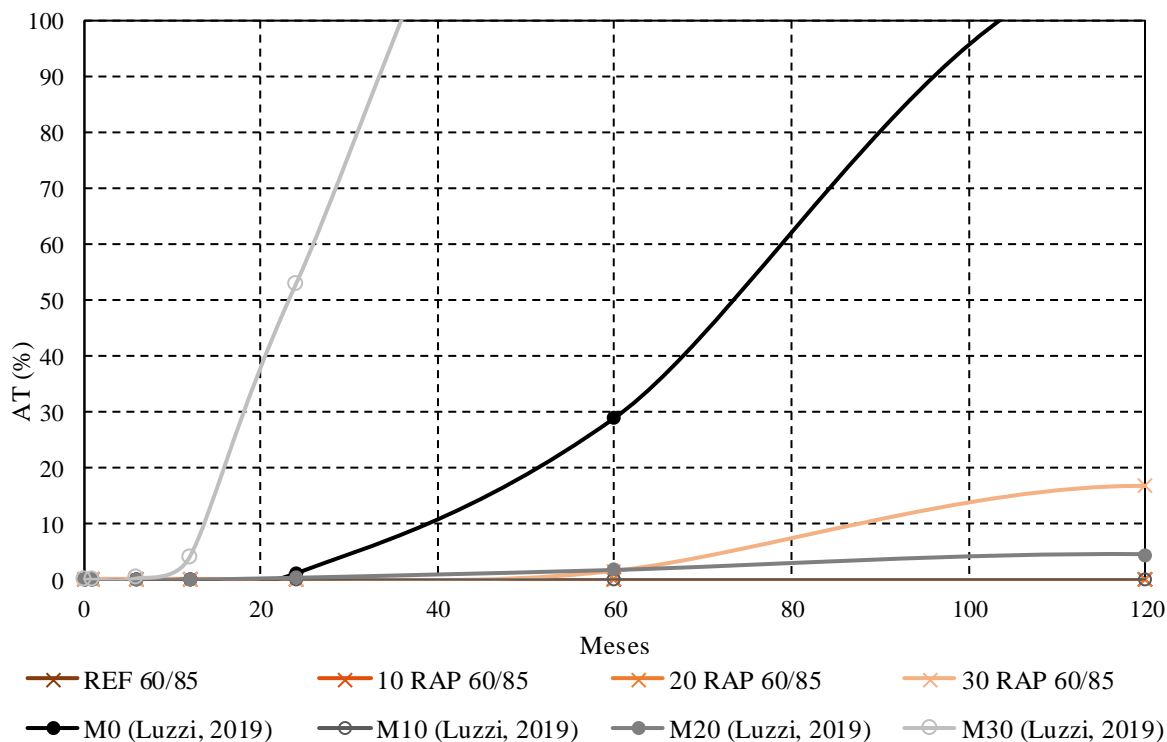
Figura 66 - Percentual de área trincada para todas as misturas



Fonte: Autora.

A Figura 67 ilustra graficamente os resultados de área trincada para as misturas com ligante 60/85 estudadas nesta pesquisa e as misturas estudadas por Luzzi (2019). Observa-se que as misturas M10 e M20 de Luzzi, (2019) não apresentaram valores significativos de área trincada. Já as misturas M0 e M30 não apresentariam um bom desempenho à fadiga em campo. Vale ressaltar que para a mistura M0, o autor obteve teor de ligante final de 5,01% após a usinagem, sendo que o teor de projeto era de 5,65%. Nota-se, novamente, a importância do controle de teor de ligante na execução de um projeto em usina e a influência desse fator no desempenho à fadiga das misturas em campo.

Figura 67 - Percentual de área trincada para as misturas com ligante 60/85 e as misturas de Luzzi (2019)



Fonte: Autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este último capítulo apresenta as conclusões observadas ao longo da pesquisa através dos dados obtidos durante os ensaios laboratoriais. Posteriormente são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÃO

Com o intuito de demonstrar o potencial de utilização do material RAP em novas misturas asfálticas, a pesquisa realizada teve como objetivos avaliar a rigidez e a danificação de misturas recicladas a quente com diferentes porcentagens e fontes de material RAP.

O teor de projeto obtido nas dosagens das misturas indica que quanto maior a porcentagem de RAP presente na mistura, menor o ligante virgem a ser inserido, confirmando que uma porcentagem do ligante presente no RAP é reativado.

Em relação à rigidez das misturas, foi observado um comportamento distinto entre os diferentes tipos de ligantes. O ensaio de módulo de resiliência indicou uma diminuição de rigidez para as misturas recicladas com ligante 50/70, uma vez que a mistura de referência apresentou os maiores valores, o que evidenciou a influência do teor de ligante, pois o aumento deste na mistura diminuiu o MR. Já para as misturas com ligante 60/85, a incorporação do RAP elevou a rigidez, sendo a mistura com 20% de RAP a que apresentou o maior valor de MR, o que era esperado devido ao ligante envelhecido presente no RAP.

Analisando os resultados de módulo complexo para as quatro misturas que continham ligante 50/70 e RAP 50/70 foi constatado que estas apresentaram maior rigidez se comparadas com as outras quatro misturas com ligante 60/85. Analisando o espaço Cole Cole e o diagrama Black, quanto à viscosidade e elasticidade foi possível constatar que o teor de incorporação de 30% de RAP aumentou a elasticidade das misturas. As curvas mestras de módulo dinâmico demonstraram que as misturas tem um comportamento muito próximo, sendo as misturas com 30% de adição de RAP as que apresentaram maior rigidez dentre as misturas recicladas.

Quanto ao ensaio de danificação por umidade induzida, o efeito deletério da água não pode ser considerado prejudicial, pois as misturas recicladas apresentaram valores de RRT dentro dos limites estabelecidos pela norma do DNIT e pela especificação Superpave.

Para a avaliação do dano das misturas, foram realizados os ensaios de *flow number*, resistência à tração e fadiga tração-compressão. No ensaio de *flow number*, as misturas

recicladas demonstraram melhor desempenho, sendo que à medida que o teor de RAP foi aumentado, os valores de FN também aumentaram. Porém, ressalta-se que os valores encontrados foram baixos, sendo que nenhuma mistura atendeu os limites propostos por Nascimento (2008) e por Faccin (2018), e apenas duas misturas atenderam o limite para tráfego médio proposto por Barros *et al.* (2017), a mistura 20 RAP 60/85 e a mistura 30 RAP 60/85. A origem mineralógica do agregado virgem e o teor de ligante das misturas podem ter contribuído para o baixo desempenho. O ensaio de resistência à tração permitiu verificar que os valores de RT aumentaram conforme o aumento do teor de RAP nas misturas, para ambos tipos de ligantes.

No ensaio de fadiga tração-compressão, os resultados das envoltórias de ruptura Gr vs. Nf, as simulações pela equação de Nascimento (2016) e o cálculo do fator de fadiga de misturas demonstraram resultados muito semelhantes quanto ao desempenho à fadiga das misturas. As misturas com ligante 60/85 apresentaram melhores resultados, sendo que a inserção de RAP diminuiu levemente os valores. As simulações pelo software LVECD permitiram a obtenção das curvas de dano acumulado, as quais corroboraram os resultados do baixo desempenho das misturas com ligante 50/70. Porém, para as misturas com ligante 60/85, as misturas com 10% e 20% de RAP apresentaram dano quase nulo. Ao analisar o gráfico de área trincada, as misturas REF 50/70, REF 60/85, 10 RAP 60/85 e 20 RAP 60/85 apresentariam um bom desempenho à fadiga.

A comparação com a pesquisa apresentada por Luzzi (2019), surgiu para a complementação deste trabalho com o objetivo de permitir uma avaliação entre as misturas usinadas e as misturas executadas em laboratório, com maior controle tecnológico. Novamente o teor de ligante apresentou grande influência no comportamento das misturas. Ao longo da pesquisa foi necessário reajustar os valores obtidos dos teores de projeto para atender o critério de Vv de 4%, assim, essa pequena diferença pode ter influenciado na comparação dos resultados, uma vez que sendo as misturas usinadas. A diferença entre a eficiência da usina e laboratório também contribuiu na diferença entre o comportamento das misturas, pois as misturas encontradas por Luzzi (2019) apresentaram um teor de ligante inferior.

Do ponto de vista prático, os resultados indicam que misturas recicladas podem ser aplicadas em campo, podendo apresentar resultados até melhores que misturas convencionais. Porém, é necessário levar em considerações as características do material RAP, como o tipo de ligante. Em relação ao teor de incorporação de RAP no meio prático, é necessário analisar a particularidade de cada projeto e tipo de usina.

Por fim, esta pesquisa permitiu concluir que a utilização das misturas recicladas é uma alternativa viável, pois a utilização do RAP elevou o desempenho das misturas em alguns parâmetros. A fonte de material RAP se mostrou um fator importante para o desempenho das misturas recicladas, uma vez que o ligante contido no material é reativado e influencia no desempenho. Além disso, o teor de ligante das misturas e o tipo de ligante virgem utilizado são os fatores que apresentaram maior influência no desempenho das misturas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a finalização da presente pesquisa, sugere-se para futuros trabalhos:

- Estudar misturas combinando ligantes bases com materiais RAPs que apresentem ligantes diferentes em sua composição;
- Elaborar uma análise de custos da utilização destas misturas recicladas;
- Aprofundar os estudos no ligante envelhecido presente no RAP;
- Realizar ensaios de fadiga à compressão diametral com estas misturas para alimentar o novo método de dimensionamento (Medina).

REFERÊNCIAS

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures.* AASHTO T 342-11. Washington, D. C., 2011.

_____. *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage.* AASHTO T 283-14. Washington, D. C., 2014.

_____. *Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests.* AASHTO TP 107-14, Washington, D. C., 2016.

_____. *Superpave Volumetric Mix Design.* AASHTO M 323-13, Washington, D. C., 2013.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Misturas Asfálticas – Determinação do Dano por Umidade Induzida.* ABNT/NBR 15617:2011. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 6576/2007** - Materiais asfálticos - Determinação da penetração, Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 6560/2008** - Materiais betuminosos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do Anel e Bola, Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 11341/2008** - Derivados de petróleo - Determinação do ponto de fulgor em vaso aberto de Cleveland, Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 6296/2012** - Produtos betuminosos semissólidos — Determinação da massa específica e densidade relativa, Rio de Janeiro, 2012.

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

ALMEIDA JÚNIOR., P. O. B. de. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem.** 2016. 217p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

ASTM - *American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous.* ASTM D4123. USA, 1982.

_____. **ASTM D 1188/2015** - *Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Compacted Bituminous Mixtures Using Coated Samples*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT - **15619/2012** - Misturas asfálticas - Determinação da massa específica máxima medida em amostras não compactadas, Rio de Janeiro, 2012.

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

BABADOPULOS, L. F. A. **Avaliação do modelo viscoelástico linear aplicado a misturas asfálticas utilizadas em revestimentos de pavimentos no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Ceará. 2013

BAHIA, H., AHMAD, S., 1999. *Evaluation and Correlation of Lab and Field Tensile Strength Ratio (TSR) Procedures and Values in Assessing the Stripping Potential of Asphalt Mixes*. Final Report No. WI/SPR-10-99, Wisconsin Department of Transportation, Madison, WI, USA. 1999.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. 2007. 558p. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BARRA, B.S. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 327p. Tese (doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2009.

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.

BASTOS, G. A. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas reforçadas com geogrelhas para pavimentos flexíveis**. 2010. 247 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA. 504 p. 2010.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

BOHN, K. A. **Avaliação das misturas asfálticas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero**. 2017. 254f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2017.

BONFIM, V. **Fresagem de pavimentos asfálticos**. 3a ed. São Paulo: Exceção editorial, 2007.

BONICELLI, A., CALVI, P., ARGUELLES, G. M., FUENTES, L., GIUSTOZZI, F. *Experimental study on the use of rejuvenators and plastomeric polymers for improving durability of high RAP content asphalt mixtures*. *Construction and Building Materials*, v. 155, p. 37-44, 2017.

BROSSEAUD, Y. **Reciclagem de misturas asfálticas: evolução após 10 anos e a situação atual na França.** 3º Salão de Inovação ABCR - 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. Foz do Iguaçu, Outubro, 2011.

CARO, S. A. *Coupled Micromechanical Model of Moisture-Induced Damage in Asphalt Mixtures: Formulation and Applications.* Tese (Doutorado), Texas A&M University, College Station, Texas. 2009.

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

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente.** 2016. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

COPELAND, A. *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice.* Report No. FHWA-HRT-11-021, n. FHWA, p. McLean, VA, 2011.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do Envelhecimento Térmico e Fotoquímico em Ligantes Asfálticos, Mástique e Matriz de agregados Finos.** Tese (Doutorado). – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2016.

DANIEL, J. S. e KIM, Y. R. *Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic Continuum Damage Model.* *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, AAPT. v. 71, p. 619-650, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 043/95: **Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall.** Rio de Janeiro, 1995, 11p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE – DNIT-**Relatório da Rede Nacional Viária. - DNIT-ME 135/2018** - Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2018.

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

DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. *Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials: from binders to mixes.* *Road Materials and Pavements Design.* *Departement Génie Civil et Bâtiment, Ecole Nationale des TPE (ENTPE)*, 2004. 41p.

DI BENEDETTO, H.; CORTÉ, J. F. *Matériaux routiers bitumineux 2: Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges.* Paris: Hermes-Lavoisier. 2005.

DI BENEDETTO, H.; NGUYEN, Q.T.; SAUZEAT, C. *Linear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures: experiment and modelling.* *Conference franco-vietnamienne CIGOS.* Lyon, France. 2013.

DOYLE, J. D.; HOWARD, I. L. *Compactability and bitumen utilization of 100% warm mixed RAP*. In: *TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING*, 89, 2010, Washington. TRB, 2010.

EAPA - *European Asphalt Pavement Association*. *The european asphalt pavement industry's – position statement on the use of secondary materials, by-products and waste in asphalt mixtures*. Bruxelas, Bélgica, 2017.

EAPA - *European Asphalt Pavement Association*. *Asphalt in figures*. Bruxelas, Bélgica, 2018.

ESTAKHRI, C. C.; SPIEGELMAN, B.; GAJEWSKI, G.; YANG, D.; LITTLE, D. *Recycled Hot-Mix Asphalt Concrete in Florida: A Variability Study*. ICAR- 401- 1/98, *International Center for Aggregates Research*, Austin, TX, 1999.

FACCIN, C. *Concretos asfálticos em utilização no Rio Grande do Sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente*. 2018. 222p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

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

HOU, T., UNDERWOOD, B.S., KIM, Y. R. *Fatigue performance prediction of Carolina mixtures using the simplified viscoelastic continuum damage model*. In: *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 79. p. 35-80, 2010

HOY, M., RACHAN, R., HORPIBULSUK, S., ARULRAJAH, A., MIRZABABAEI, M. *Effect of wetting-drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement – Fly ash geopolymers*. *Construction and Building Materials*, v. 144. P. 624-634. 2017.

KERKHOF, E.V., 2012. *Warm waste asphalt recycling in belgium: 30 years of experience and full confidence in the future*. In: *5th Euroasphalt and Eurobitume congress, 13–15 June 2012 Istanbul, Turkey*. Istanbul: *European Asphalt Pavement Association (EAPA)*, Paper No. A5EE–137.

KIGGUNDU, B. M.; ROBERTS, F. L. *Stripping in HMA Mixtures: State-of-the-Art and Critical Review of Test Methods*. Auburn University: *National Center for Asphalt Technology*. 1988.

KIM, Y.-R., Little, D. N., & Song, I. (2003). *Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics: Mechanistic evaluation*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1832, 1-8. DOI: 10.3141/1832-01.

KIM, R. Y. *Modeling of asphalt concrete*. 1º ed. McGraw-Hill. p. 460. New York. 2009.

KRINGOS, N. *Modeling of Combined Physical-Mechanical Moisture Induced Damage in Asphaltic Mixes*. Tese de Doutorado, Technische Universiteit Delft, Holanda. 2007.

LIBERATORI, L. A. CONSTANTINO, R.S. **Melhoradores de adesividade para misturas asfálticas**. Estado da Arte. 18° Encontro de Asfalto. Rio de Janeiro. 2006.

LO PRESTI, D., *On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agents*. *Road Materials and Pavement Design*, 2019.

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

MANGIAFICO, S. *Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends*. Tese de Doutorado. l'École Nationale des Travaux Publics de l'État. 2014.

McDANIEL, R., ANDERSON, R. M. *Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method*. NCHRP – National cooperative highway research program. Report 452. Project D9-12. Washington, D.C. 2001.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015, 638p.

MORAES, R., VELASQUEZ, R., BAHIA, H.U. *Measuring the effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test*. Transp. Res. Rec. J.transp. Res. Board 2209 (1), 70e81. 2011.

MURAYA, P. M. *Permanent Deformation of Asphalt Mixtures*. Dissertação de PhD. Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology. Holanda. 2007.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio de Janeiro, 2008.

NASCIMENTO, L. A. H. *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. Dissertation (Doctor of Philosophy). Graduate Faculty of North Carolina State University, 2015.

NASCIMENTO, L. A. H. **Caracterização avançada de materiais asfálticos: Dano por fadiga**. Curso. Universidade Federal de Santa Maria. 30 e 31 de março de 2016.

NOROUZI, A., SABOURI, M., KIM Y. R. *Evaluation of the fatigue performance of high RAP asphalt mixtures*. *Journal of Taylor and Francis Group – Asphalt Pavements, CRC Press*, 2014.

NOROUZI, A., KIM Y. R., KIM, S. S., YANG, J. *Effect of reclaimed asphalt pavement content and binder grade of fatigue – resisting performance of asphalt mixtures in Georgia*. *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol. 29. 2017.

OLARD, F.; DI BENEDETTO, H. *General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binders and mixes*. *Road Materials and Pavement Design*, 4, p 185-224. 2003.

ONOFRE, F. C. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente**. 2012. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2012.

ORESKOVIC, M., PIRES, G. M., BRESSI, S., VASCONCELOS, K., LO PRESTI, D. *Quantitative assessment of the parameters linked to the blending between reclaimed asphalt binder and recycling agent: A literature review*. *Construction and Building Materials*. 234. 10.1016/j.conbuildmat.2019.117323., 2020.

OSMARI, P. H. **Caracterização química, reológica e de morfologia superficial de ligantes asfálticos modificados por diferentes agentes rejuvenescedores**. 2016. 133F. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de engenharia civil, Rio de Janeiro, RJ, 2016.

PIRES, G. M., LO PRESTI, D., AIREY, G. D. *A practical approach to estimate the degree of binder activity of reclaimed asphalt materials*. *Road Materials and Pavement Design*, P.1-24, 2019.

POSSEBON, E. **Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

PRADYUMNA, T. A.; MITTAL, A.; JAIN, P. K. *Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction*. 2^o Conference of Transportation Research Group of India – *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 2013.

RENAUD, C. L. R. S. A. *Module de rigidité et comportement em fatigue desenrobésbituminuex. Expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse*. Tese de Doutorado –EcoleCentrale Paris, 1996.

RIBAS, J. **Parâmetros elásticos típicos de materiais de pavimentos flexíveis do Rio Grande do Sul e sua aplicação em uma análise de custo/benefício**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria. 2014

SABOURI, M. A., KIM, Y. R. *Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2447, 117–125. <https://doi.org/10.3141/2447-13>, 2014.

SABOURI, M., BENNERT, T., DANIEL, J. S., KIM, R. Y., *Fatigue and rutting evaluation of laboratory-produced asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2506, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2015, pp. 32–44. DOI: 10.3141/2506-04

SANTOS, T. A. **Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação de mestrado** – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

SCHUSTER, S.L. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo.** 2018. 268 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado.** 2019. 153p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. Brasil, 2019.

TEBALDI, G. *et al.* **Recommendation of RILEM TC237-SIB: protocol of characterization of recycled asphalt (RA) materials for pavement applications.** *Materials and Structures*, v.51 p. 142, 2018.

TERREL, R; AI-SWAILMI, S. **Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: test selection.** *Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C. (USA).* 1994.

TRAN, N. H., TAYLOR, A., WILLIS, R., **Effect of rejuvenator on performance of HMA mixtures with high RAP and RAS contents.** In: NCAT Report 12-05, *National Center for Asphalt Technology*, Auburn, Alabama, USA, 2012.

TRICHÊS, G.; LORENA, M.; SANTOS, A. **Reciclagem de pavimento com adição de cimento: estudo do desempenho da rodovia SC 303, trecho BR 282 - Capinzal (SC).** 40ª RAPV: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2010, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 2010.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R. **Analytical techniques for determining the endurance limit of hot mix asphalt concrete.** In: *2nd International Conference on Perpetual Pavements.* Columbus, Ohio, Estados Unidos, 2009.

UNDERWOOD, B. S., **Multiscale Constructive Modeling of Asphalt Concrete.** Tese (Doutorado), *North Carolina State University* – Raleigh, North Carolina, 2011.

UNDERWOOD, B. S., BAEK, C., & KIM, Y. R., **Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis.** *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2296, 36–45. <https://doi.org/10.3141/229604>, 2012.

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

VASCONCELOS, K. L.; BHASIN, A.; LITTLE, D. N.; SOARES, J. B. **Avaliação do dano por umidade induzida e da recuperação de trincas em mástique.** 18º Encontro de Asfalto, maio de 2006. Anais... Rio de Janeiro, RJ. 2006.

WANG, Y. D., KESHAVARZI, B., KIM, R. Y., *Fatigue performance analysis of pavement with RAP using viscoelastic continuum damage theory. Mechanistic Evaluation of Asphalt Paving Materials and Structures. KSCE Journal of Civil Engineering.* v. 22(6) p. 2118-2125, 2018.

WEST, R. C., *Reclaimed Asphalt Pavement Management: Best Practices. NCAT Report. Auburn University,* 2010.

WEST R., WILLIS JR., MARASTEANU M. *Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content.* NCHRP; University of Minnesota, Minneapolis, 2013.

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

WOLDEKIDAN, M. F. *Response modelling of bitumen, bituminous mastic and mortar.* Tese de Doutorado. Delft University of Technology, Delft, Holanda, 2011.

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

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

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

ZAUMANIS, M., POULIKAKOS, L. D., PARTL, M. N., *Performance-based design of asphalt mixtures and review of key parameters. Materials and Design.* v. 141, p. 185-201, 2018.

ZHANG, J., SABOURI, M., KIM, Y. R., GUDDATI, M. N. *Development of a failure criterion for asphalt mixtures under fatigue loading.* In: *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 14, Supplement 2, pp.1-15, 2013.

ZUBARAN, M. *Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto.* 2014. 151p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

ZUBARAN, M., MOTTA, L. M. G. *Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto.* 2015. 42º RAPv – Reunião Anual de Pavimentação, Foz do Iguaçu, PR, 2015.

APÊNDICE A

APÊNDICE A - Dados Brutos Módulo Complexo

Valores experimentais de Módulo Dinâmico e ângulo de fase da mistura de referência 50/70

| Mistura Referência 50/70 | | | | | |
|--------------------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|
| Temp (°C) | Freq. (hz) | E* (MPa) CP 1 | δ (°) CP 1 | E* (MPa) CP 2 | δ (°) CP 2 |
| -10 | 0,01 | 19984 | 8,06 | 21823 | 6,57 |
| -10 | 0,1 | 22059 | 6,44 | 22967 | 5,93 |
| -10 | 0,2 | 22856 | 5,86 | 23711 | 5,48 |
| -10 | 0,5 | 24026 | 5,16 | 25009 | 4,88 |
| -10 | 1 | 24866 | 4,60 | 25914 | 4,37 |
| -10 | 2 | 25644 | 4,18 | 26800 | 3,89 |
| -10 | 5 | 26584 | 3,57 | 27860 | 3,34 |
| -10 | 10 | 27210 | 3,13 | 28587 | 2,93 |
| -10 | 20 | 27751 | 2,75 | 29256 | 2,48 |
| -10 | 25 | 27854 | 2,63 | 29421 | 2,24 |
| 4 | 0,01 | 8611 | 19,62 | 8802 | 20,29 |
| 4 | 0,1 | 12539 | 14,66 | 12698 | 15,10 |
| 4 | 0,2 | 13778 | 13,34 | 13972 | 13,78 |
| 4 | 0,5 | 15505 | 11,65 | 15818 | 12,09 |
| 4 | 1 | 16835 | 10,51 | 17240 | 10,93 |
| 4 | 2 | 18157 | 9,48 | 18666 | 9,80 |
| 4 | 5 | 19837 | 8,16 | 20499 | 8,47 |
| 4 | 10 | 21051 | 7,30 | 21866 | 7,47 |
| 4 | 20 | 22210 | 6,38 | 23202 | 6,58 |
| 4 | 25 | 22561 | 6,06 | 23981 | 6,13 |
| 21 | 0,01 | 804 | 35,58 | 1114 | 35,75 |
| 21 | 0,1 | 2317 | 33,57 | 2737 | 32,61 |
| 21 | 0,2 | 3075 | 31,99 | 3498 | 30,97 |
| 21 | 0,5 | 4248 | 29,37 | 4725 | 28,40 |
| 21 | 1 | 5273 | 27,38 | 5781 | 26,43 |
| 21 | 2 | 6413 | 25,35 | 6943 | 24,37 |
| 21 | 5 | 8090 | 22,49 | 8681 | 21,63 |
| 21 | 10 | 9462 | 20,54 | 10095 | 19,59 |
| 21 | 20 | 10948 | 18,49 | 11602 | 17,59 |
| 21 | 25 | 11412 | 17,95 | 12092 | 16,99 |
| 37 | 0,01 | 57 | 22,23 | 78 | 21,31 |
| 37 | 0,1 | 130 | 36,00 | 148 | 32,24 |
| 37 | 0,2 | 169 | 37,67 | 213 | 35,19 |
| 37 | 0,5 | 169 | 41,15 | 347 | 38,17 |
| 37 | 1 | 350 | 43,64 | 506 | 39,90 |
| 37 | 2 | 500 | 44,89 | 760 | 40,54 |
| 37 | 5 | 855 | 44,41 | 1291 | 39,36 |
| 37 | 10 | 1275 | 43,46 | 1863 | 38,17 |
| 37 | 20 | 1876 | 41,77 | 2590 | 36,65 |
| 37 | 25 | 2087 | 41,94 | 2822 | 36,96 |
| 54 | 0,01 | - | - | 9 | 24,26 |
| 54 | 0,1 | 30 | 23,92 | 18 | 21,75 |
| 54 | 0,2 | 36 | 37,89 | 11 | 35,28 |
| 54 | 0,5 | 41 | 51,76 | 30 | 34,91 |
| 54 | 1 | 58 | 52,51 | 69 | 18,15 |
| 54 | 2 | 90 | 23,24 | 138 | 29,66 |
| 54 | 5 | 157 | 37,65 | 236 | 27,32 |
| 54 | 10 | 228 | 42,22 | 307 | 35,76 |
| 54 | 20 | 326 | 45,51 | 408 | 41,48 |
| 54 | 25 | 374 | 45,67 | 447 | 43,13 |

Valores experimentais de Módulo Dinâmico e ângulo de fase da mistura 10 RAP 50/70

| Mistura 10 RAP 50/70 | | | | | | |
|----------------------|------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|--|
| Temp (°C) | Freq. (hz) | E* (MPa) CP 1 | δ (°) CP 1 | E* (MPa) CP 2 | δ (°) CP 2 | |
| -10 | 0,01 | 19406 | 7,40 | 19464 | 6,79 | |
| -10 | 0,1 | 20637 | 6,40 | 21014 | 5,76 | |
| -10 | 0,2 | 21285 | 6,05 | 21717 | 5,28 | |
| -10 | 0,5 | 22360 | 5,36 | 22820 | 4,62 | |
| -10 | 1 | 23185 | 4,84 | 23620 | 4,19 | |
| -10 | 2 | 24002 | 4,38 | 24349 | 3,75 | |
| -10 | 5 | 25004 | 3,79 | 25238 | 3,20 | |
| -10 | 10 | 25688 | 3,32 | 25818 | 2,83 | |
| -10 | 20 | 26292 | 2,91 | 26341 | 2,48 | |
| -10 | 25 | 26496 | 2,72 | 26496 | 2,26 | |
| 4 | 0,01 | 8509 | 18,54 | 8441 | 18,51 | |
| 4 | 0,1 | 12560 | 13,34 | 12024 | 13,99 | |
| 4 | 0,2 | 13791 | 12,20 | 13117 | 12,92 | |
| 4 | 0,5 | 15449 | 10,74 | 14685 | 11,48 | |
| 4 | 1 | 16691 | 9,75 | 15928 | 10,46 | |
| 4 | 2 | 17922 | 8,85 | 17166 | 9,53 | |
| 4 | 5 | 19477 | 7,69 | 18779 | 8,33 | |
| 4 | 10 | 20596 | 6,92 | 19955 | 7,51 | |
| 4 | 20 | 21591 | 6,18 | 21060 | 6,70 | |
| 4 | 25 | 21874 | 5,95 | 21426 | 6,42 | |
| 21 | 0,01 | 915 | 35,00 | 950 | 35,22 | |
| 21 | 0,1 | 2508 | 31,82 | 2467 | 31,86 | |
| 21 | 0,2 | 3232 | 29,98 | 3180 | 30,33 | |
| 21 | 0,5 | 4343 | 27,49 | 4262 | 27,80 | |
| 21 | 1 | 5303 | 25,50 | 5202 | 25,88 | |
| 21 | 2 | 6361 | 23,60 | 6245 | 23,93 | |
| 21 | 5 | 7908 | 21,07 | 7798 | 21,31 | |
| 21 | 10 | 9187 | 19,22 | 9063 | 19,38 | |
| 21 | 20 | 10524 | 17,36 | 10420 | 17,52 | |
| 21 | 25 | 10981 | 16,86 | 10861 | 16,97 | |
| 37 | 0,01 | 83 | 24,84 | 75 | 23,11 | |
| 37 | 0,1 | 171 | 34,26 | 156 | 34,20 | |
| 37 | 0,2 | 242 | 36,44 | 222 | 36,61 | |
| 37 | 0,5 | 384 | 38,87 | 358 | 38,89 | |
| 37 | 1 | 554 | 40,37 | 522 | 40,07 | |
| 37 | 2 | 810 | 40,54 | 760 | 40,65 | |
| 37 | 5 | 1322 | 39,13 | 1245 | 39,72 | |
| 37 | 10 | 1861 | 37,86 | 1770 | 38,71 | |
| 37 | 20 | 2533 | 36,19 | 2426 | 37,25 | |
| 37 | 25 | 2770 | 36,37 | 2641 | 37,55 | |
| 54 | 0,01 | 14 | 43,23 | 44 | 17,75 | |
| 54 | 0,1 | - | 15,08 | 63 | 11,96 | |
| 54 | 0,2 | 45 | 10,92 | 74 | 17,26 | |
| 54 | 0,5 | 83 | - | 91 | 23,90 | |
| 54 | 1 | 121 | - | 110 | 30,05 | |
| 54 | 2 | 163 | 33,80 | 143 | 35,25 | |
| 54 | 5 | 255 | 37,72 | 239 | 37,67 | |
| 54 | 10 | 385 | 38,17 | 358 | 38,95 | |
| 54 | 20 | 553 | 40,73 | 525 | 41,27 | |
| 54 | 25 | 608 | 42,44 | 578 | 43,08 | |

Valores experimentais de Módulo Dinâmico e ângulo de fase da mistura 20 RAP 50/70

| Mistura 20 RAP 50/70 | | | | | | |
|----------------------|------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|--|
| Temp (°C) | Freq. (hz) | E* (MPa) CP 1 | δ (°) CP 1 | E* (MPa) CP 2 | δ (°) CP 2 | |
| -10 | 0,01 | 19428 | 6,29 | 17903 | 6,51 | |
| -10 | 0,1 | 20540 | 5,79 | 20457 | 5,10 | |
| -10 | 0,2 | 21218 | 5,48 | 21283 | 4,68 | |
| -10 | 0,5 | 22309 | 4,84 | 22299 | 4,05 | |
| -10 | 1 | 23108 | 4,45 | 22980 | 3,66 | |
| -10 | 2 | 23924 | 4,04 | 23623 | 3,29 | |
| -10 | 5 | 24919 | 3,47 | 24378 | 2,81 | |
| -10 | 10 | 25605 | 3,04 | 24901 | 2,51 | |
| -10 | 20 | 26252 | 2,66 | 25342 | 2,16 | |
| -10 | 25 | 26322 | 2,53 | - | - | |
| 4 | 0,01 | 8710 | 16,86 | 8189 | 17,06 | |
| 4 | 0,1 | 12775 | 12,38 | 11601 | 12,98 | |
| 4 | 0,2 | 13953 | 11,35 | 12621 | 11,97 | |
| 4 | 0,5 | 15530 | 10,12 | 14064 | 10,65 | |
| 4 | 1 | 16750 | 9,20 | 15168 | 9,80 | |
| 4 | 2 | 17943 | 8,38 | 16259 | 8,91 | |
| 4 | 5 | 19480 | 7,33 | 17671 | 7,86 | |
| 4 | 10 | 20600 | 6,54 | 18668 | 7,09 | |
| 4 | 20 | 21636 | 5,83 | 19638 | 6,25 | |
| 4 | 25 | 21876 | 5,43 | 19725 | 5,82 | |
| 21 | 0,01 | 1229 | 34,42 | 1230 | 33,93 | |
| 21 | 0,1 | 2761 | 31,07 | 2704 | 29,88 | |
| 21 | 0,2 | 3420 | 29,49 | 3331 | 28,48 | |
| 21 | 0,5 | 4478 | 27,25 | 4321 | 26,17 | |
| 21 | 1 | 5388 | 25,39 | 5174 | 24,48 | |
| 21 | 2 | 6380 | 20,49 | 6123 | 22,74 | |
| 21 | 5 | 7860 | 20,86 | 7537 | 20,37 | |
| 21 | 10 | 9033 | 19,01 | 8648 | 18,71 | |
| 21 | 20 | 10294 | 17,27 | 9839 | 17,03 | |
| 21 | 25 | 10736 | 16,61 | 10225 | 16,58 | |
| 37 | 0,01 | 84 | 26,71 | 104 | 13,74 | |
| 37 | 0,1 | 187 | 35,34 | 195 | 36,09 | |
| 37 | 0,2 | 273 | 37,06 | 280 | 37,41 | |
| 37 | 0,5 | 446 | 38,69 | 450 | 39,20 | |
| 37 | 1 | 644 | 39,12 | 645 | - | |
| 37 | 2 | 933 | 38,89 | 927 | 39,52 | |
| 37 | 5 | 1487 | 37,35 | 1463 | 38,11 | |
| 37 | 10 | 2056 | 35,75 | 2007 | 36,69 | |
| 37 | 20 | 2742 | 34,02 | 2580 | 35,36 | |
| 37 | 25 | 2946 | 34,20 | 2863 | 35,32 | |
| 54 | 0,01 | 29 | 10,87 | 29 | 11,88 | |
| 54 | 0,1 | 52 | 22,80 | 33 | 19,81 | |
| 54 | 0,2 | 61 | 24,01 | 30 | 29,46 | |
| 54 | 0,5 | 83 | 52,44 | 37 | 31,20 | |
| 54 | 1 | 108 | 24,25 | 55 | 44,96 | |
| 54 | 2 | 141 | 33,91 | 99 | 23,75 | |
| 54 | 5 | 239 | 37,76 | 166 | 40,35 | |
| 54 | 10 | 360 | 38,75 | 251 | 41,56 | |
| 54 | 20 | 527 | 40,44 | 361 | 44,13 | |
| 54 | 25 | 591 | 41,82 | 401 | 45,66 | |

Valores experimentais de Módulo Dinâmico e ângulo de fase da mistura 30 RAP 50/70

| Mistura 30 RAP 50/70 | | | | | | |
|----------------------|------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|--|
| Temp (°C) | Freq. (hz) | E* (MPa) CP 1 | δ (°) CP 1 | E* (MPa) CP 2 | δ (°) CP 2 | |
| -10 | 0,01 | 20400 | 6,74 | 19607 | 6,45 | |
| -10 | 0,1 | 22027 | 5,74 | 21211 | 5,42 | |
| -10 | 0,2 | 22847 | 5,32 | 21913 | 5,05 | |
| -10 | 0,5 | 23990 | 4,74 | 22973 | 4,48 | |
| -10 | 1 | 24824 | 4,33 | 23739 | 4,10 | |
| -10 | 2 | 25634 | 3,91 | 24447 | 3,69 | |
| -10 | 5 | 26591 | 3,36 | 25301 | 3,21 | |
| -10 | 10 | 27279 | 3,05 | 25867 | 2,90 | |
| -10 | 20 | 27856 | 2,59 | 26392 | 2,56 | |
| -10 | 25 | 28011 | 2,45 | 26465 | 2,40 | |
| 4 | 0,01 | 9448 | 16,53 | 8880 | 16,42 | |
| 4 | 0,1 | 12943 | 12,60 | 12017 | 12,46 | |
| 4 | 0,2 | 14004 | 11,70 | 13000 | 11,57 | |
| 4 | 0,5 | 15574 | 10,44 | 14451 | 10,35 | |
| 4 | 1 | 16788 | 9,60 | 15567 | 9,45 | |
| 4 | 2 | 18010 | 8,75 | 16667 | 8,67 | |
| 4 | 5 | 19578 | 7,77 | 18094 | 7,62 | |
| 4 | 10 | 20728 | 6,95 | 19126 | 6,91 | |
| 4 | 20 | 21826 | 6,25 | 20079 | 6,06 | |
| 4 | 25 | 22153 | 5,98 | 20308 | 5,92 | |
| 21 | 0,01 | 1638 | 31,33 | 1363 | 33,90 | |
| 21 | 0,1 | 3359 | 28,47 | 3188 | 29,36 | |
| 21 | 0,2 | 4068 | 27,06 | 3945 | 27,83 | |
| 21 | 0,5 | 5182 | 24,67 | 5144 | 25,50 | |
| 21 | 1 | 6164 | 23,04 | 6154 | 23,68 | |
| 21 | 2 | 7303 | 21,36 | 7256 | 21,80 | |
| 21 | 5 | 8925 | 19,01 | 8883 | 19,17 | |
| 21 | 10 | 10280 | 17,26 | 10149 | 17,30 | |
| 21 | 20 | 11697 | 15,57 | 11494 | 15,47 | |
| 21 | 25 | 12277 | 14,93 | 11950 | 14,93 | |
| 37 | 0,01 | 114 | 28,69 | 123 | 36,57 | |
| 37 | 0,1 | 284 | 35,18 | 298 | 36,97 | |
| 37 | 0,2 | 406 | 35,89 | 422 | 37,24 | |
| 37 | 0,5 | 671 | 36,94 | 658 | 38,42 | |
| 37 | 1 | 900 | 37,17 | 915 | 38,68 | |
| 37 | 2 | 1263 | 36,73 | 1280 | 37,95 | |
| 37 | 5 | 1922 | 35,36 | 1922 | 36,52 | |
| 37 | 10 | 2558 | 33,99 | 2548 | 35,20 | |
| 37 | 20 | 3314 | 32,35 | 3282 | 33,60 | |
| 37 | 25 | 3536 | 32,62 | 3484 | 33,70 | |
| 54 | 0,01 | 50 | 14,69 | 56 | 13,31 | |
| 54 | 0,1 | 69 | 17,92 | 86 | 19,29 | |
| 54 | 0,2 | 89 | 23,61 | 107 | 23,92 | |
| 54 | 0,5 | 116 | 28,32 | 142 | 29,79 | |
| 54 | 1 | 147 | 32,50 | 181 | 33,28 | |
| 54 | 2 | 189 | 37,16 | 237 | 37,10 | |
| 54 | 5 | 309 | 39,11 | 386 | 39,06 | |
| 54 | 10 | 455 | 39,67 | 580 | 38,94 | |
| 54 | 20 | 654 | 41,14 | 838 | 40,00 | |
| 54 | 25 | 726 | 42,07 | 942 | 40,81 | |

Valores experimentais de Módulo Dinâmico e ângulo de fase da mistura de referência 60/85

| Mistura Referência 60/85 | | | | | | |
|--------------------------|------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|--|
| Temp (°C) | Freq. (hz) | E* (MPa) CP 1 | δ (°) CP 1 | E* (MPa) CP 2 | δ (°) CP 2 | |
| -10 | 0,01 | 19797 | 7,69 | 17958 | 9,52 | |
| -10 | 0,1 | 22043 | 6,16 | 20947 | 6,79 | |
| -10 | 0,2 | 22911 | 5,62 | 21930 | 6,20 | |
| -10 | 0,5 | 24081 | 4,92 | 23252 | 5,41 | |
| -10 | 1 | 24926 | 4,42 | 24206 | 4,86 | |
| -10 | 2 | 25693 | 3,94 | 25077 | 4,33 | |
| -10 | 5 | 26646 | 3,35 | 26120 | 3,72 | |
| -10 | 10 | 27293 | 2,97 | 26856 | 3,30 | |
| -10 | 20 | 27842 | 2,61 | 27509 | 2,89 | |
| -10 | 25 | 27907 | 2,51 | 27731 | 2,75 | |
| 4 | 0,01 | 7606 | 19,71 | 8044 | 17,32 | |
| 4 | 0,1 | 10406 | 16,80 | 12058 | 14,35 | |
| 4 | 0,2 | 11588 | 15,54 | 13453 | 12,93 | |
| 4 | 0,5 | 13334 | 13,74 | 15194 | 11,21 | |
| 4 | 1 | 14714 | 12,50 | 16496 | 10,07 | |
| 4 | 2 | 16130 | 11,36 | 17790 | 9,12 | |
| 4 | 5 | 17962 | 10,00 | 19436 | 7,84 | |
| 4 | 10 | 19267 | 8,90 | 20609 | 7,08 | |
| 4 | 20 | 20484 | 7,98 | 21733 | 6,26 | |
| 4 | 25 | 20857 | 7,65 | 22046 | 5,83 | |
| 21 | 0,01 | 594 | 33,84 | 367 | 34,05 | |
| 21 | 0,1 | 1641 | 33,60 | 1038 | 35,65 | |
| 21 | 0,2 | 2162 | 32,38 | 1440 | 34,95 | |
| 21 | 0,5 | 3032 | 30,42 | 2150 | 33,68 | |
| 21 | 1 | 3819 | 28,72 | 2830 | 32,32 | |
| 21 | 2 | 4745 | 26,88 | 3647 | 30,63 | |
| 21 | 5 | 6099 | 24,39 | 4904 | 28,10 | |
| 21 | 10 | 7265 | 22,55 | 5986 | 26,18 | |
| 21 | 20 | 8499 | 20,73 | 7153 | 23,94 | |
| 21 | 25 | 8940 | 20,36 | 7526 | 23,76 | |
| 37 | 0,01 | 81 | 17,80 | 83 | 24,20 | |
| 37 | 0,1 | 218 | 36,87 | 194 | 30,50 | |
| 37 | 0,2 | 306 | 36,87 | 275 | 32,55 | |
| 37 | 0,5 | 464 | 38,45 | 418 | 34,97 | |
| 37 | 1 | 638 | 39,69 | 573 | 37,09 | |
| 37 | 2 | 896 | 38,99 | 817 | 37,70 | |
| 37 | 5 | 1403 | 36,96 | 1298 | 37,07 | |
| 37 | 10 | 1924 | 35,45 | 1801 | 36,48 | |
| 37 | 20 | 2562 | 34,20 | 2418 | 35,83 | |
| 37 | 25 | 2766 | 34,48 | 2592 | 36,74 | |
| 54 | 0,01 | - | - | - | - | |
| 54 | 0,1 | - | - | - | - | |
| 54 | 0,2 | - | - | - | - | |
| 54 | 0,5 | - | - | - | - | |
| 54 | 1 | - | - | - | - | |
| 54 | 2 | - | - | - | - | |
| 54 | 5 | - | - | - | - | |
| 54 | 10 | - | - | - | - | |
| 54 | 20 | - | - | - | - | |
| 54 | 25 | - | - | - | - | |

Valores experimentais de Módulo Dinâmico e ângulo de fase da mistura 10 RAP 60/85

| Mistura 10 RAP 60/85 | | | | | | |
|----------------------|------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|--|
| Temp (°C) | Freq. (hz) | E* (MPa) CP 1 | δ (°) CP 1 | E* (MPa) CP 2 | δ (°) CP 2 | |
| -10 | 0,01 | 20961 | 7,21 | 20635 | 6,68 | |
| -10 | 0,1 | 24366 | 4,86 | 23543 | 5,01 | |
| -10 | 0,2 | 25231 | 4,36 | 24551 | 4,49 | |
| -10 | 0,5 | 26281 | 3,74 | 25646 | 3,90 | |
| -10 | 1 | 27026 | 3,34 | 26454 | 3,45 | |
| -10 | 2 | 27696 | 2,98 | 27202 | 3,08 | |
| -10 | 5 | 28496 | 2,54 | 28069 | 2,57 | |
| -10 | 10 | 29021 | 2,18 | 28691 | 2,24 | |
| -10 | 20 | 29505 | 1,94 | 29260 | 1,94 | |
| -10 | 25 | 29595 | 1,87 | 29333 | 1,76 | |
| 4 | 0,01 | 7935 | 19,72 | 8689 | 19,51 | |
| 4 | 0,1 | 11370 | 14,81 | 12433 | 14,24 | |
| 4 | 0,2 | 12567 | 13,67 | 13666 | 13,08 | |
| 4 | 0,5 | 14304 | 12,17 | 15410 | 11,54 | |
| 4 | 1 | 15644 | 11,06 | 16740 | 10,52 | |
| 4 | 2 | 16988 | 10,04 | 18077 | 9,57 | |
| 4 | 5 | 18700 | 8,77 | 19790 | 8,30 | |
| 4 | 10 | 19968 | 7,89 | 21114 | 7,14 | |
| 4 | 20 | 21195 | 7,03 | 22277 | 6,62 | |
| 4 | 25 | 21577 | 6,71 | 22771 | 5,89 | |
| 21 | 0,01 | 380 | 38,08 | 710 | 34,52 | |
| 21 | 0,1 | 1106 | 39,54 | 2169 | 31,68 | |
| 21 | 0,2 | 1518 | 39,19 | 2855 | 30,10 | |
| 21 | 0,5 | 2243 | 37,47 | 3898 | 27,72 | |
| 21 | 1 | 2940 | 35,68 | 4786 | 25,97 | |
| 21 | 2 | 3771 | 33,41 | 5782 | 24,10 | |
| 21 | 5 | 5074 | 29,85 | 7273 | 21,67 | |
| 21 | 10 | 6199 | 27,27 | 8484 | 19,81 | |
| 21 | 20 | 7434 | 24,45 | 9834 | 18,00 | |
| 21 | 25 | 7840 | 24,06 | 10309 | 17,53 | |
| 37 | 0,01 | 65 | 26,76 | 87 | 26,68 | |
| 37 | 0,1 | 161 | 35,42 | 242 | 33,03 | |
| 37 | 0,2 | 234 | 37,85 | 356 | 34,17 | |
| 37 | 0,5 | 374 | 40,17 | 559 | 35,66 | |
| 37 | 1 | 536 | 41,61 | 784 | 36,62 | |
| 37 | 2 | 775 | 42,25 | 1090 | 36,87 | |
| 37 | 5 | 1251 | 41,24 | 1645 | 36,13 | |
| 37 | 10 | 1736 | 40,15 | 2188 | 35,27 | |
| 37 | 20 | 2345 | 38,60 | 2853 | 34,11 | |
| 37 | 25 | 2516 | 39,13 | 3061 | 34,61 | |
| 54 | 0,01 | 12 | 12,35 | - | - | |
| 54 | 0,1 | 51 | 25,72 | 48 | 19,90 | |
| 54 | 0,2 | 31 | 18,60 | 56 | 21,96 | |
| 54 | 0,5 | 76 | 23,22 | 69 | 25,20 | |
| 54 | 1 | 92 | 29,26 | 81 | 28,87 | |
| 54 | 2 | 119 | 34,65 | 99 | 32,84 | |
| 54 | 5 | 197 | 37,53 | 163 | 35,05 | |
| 54 | 10 | 288 | 39,20 | 232 | 37,03 | |
| 54 | 20 | 412 | 41,47 | 323 | 40,30 | |
| 54 | 25 | 467 | 42,06 | 631 | 40,06 | |

Valores experimentais de Módulo Dinâmico e ângulo de fase da mistura 20 RAP 60/85

| Mistura 20 RAP 60/85 | | | | | | |
|----------------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|--|
| Temp (°C) | Freq. (hz) | E* (MPa) CP 1 | δ (°) CP 1 | E* (MPa) CP 2 | δ (°) CP 2 | |
| -10 | 0,01 | 19050 | 7,19 | 20111 | 7,85 | |
| -10 | 0,1 | 21995 | 5,47 | 22562 | 6,42 | |
| -10 | 0,2 | 22949 | 4,85 | 23549 | 5,92 | |
| -10 | 0,5 | 24263 | 4,20 | 24912 | 5,26 | |
| -10 | 1 | 25073 | 3,74 | 25926 | 4,75 | |
| -10 | 2 | 25852 | 3,33 | 26932 | 4,29 | |
| -10 | 5 | 26720 | 2,81 | 28060 | 3,65 | |
| -10 | 10 | 27323 | 2,44 | 28828 | 3,24 | |
| -10 | 20 | 27869 | 2,15 | 29571 | 2,79 | |
| -10 | 25 | 29041 | 1,94 | 29547 | 2,65 | |
| 4 | 0,01 | 8441 | 16,97 | 8750 | 18,18 | |
| 4 | 0,1 | 12195 | 11,84 | 13183 | 12,70 | |
| 4 | 0,2 | 13382 | 11,22 | 14544 | 11,67 | |
| 4 | 0,5 | 15008 | 10,11 | 16318 | 10,30 | |
| 4 | 1 | 16224 | 9,20 | 17703 | 9,36 | |
| 4 | 2 | 17444 | 8,29 | 18998 | 8,51 | |
| 4 | 5 | 18997 | 7,24 | 20690 | 7,36 | |
| 4 | 10 | 20117 | 6,66 | 21909 | 6,74 | |
| 4 | 20 | 21200 | 5,79 | 22866 | 5,45 | |
| 4 | 25 | 21345 | 4,32 | 22182 | 4,26 | |
| 21 | 0,01 | 864 | 34,19 | 762 | 34,85 | |
| 21 | 0,1 | 2606 | 30,52 | 2291 | 31,56 | |
| 21 | 0,2 | 3367 | 28,75 | 3017 | 29,92 | |
| 21 | 0,5 | 4496 | 26,20 | 4109 | 27,54 | |
| 21 | 1 | 5431 | 24,40 | 5029 | 25,76 | |
| 21 | 2 | 6466 | 22,52 | 6072 | 23,91 | |
| 21 | 5 | 7964 | 20,09 | 7608 | 21,44 | |
| 21 | 10 | 9187 | 18,32 | 8890 | 19,62 | |
| 21 | 20 | 10488 | 16,71 | 10316 | 17,77 | |
| 21 | 25 | 10947 | 16,17 | 10835 | 17,32 | |
| 37 | 0,01 | 91 | 26,52 | 88 | 26,38 | |
| 37 | 0,1 | 238 | 32,66 | 210 | 33,31 | |
| 37 | 0,2 | 339 | 33,85 | 295 | 35,14 | |
| 37 | 0,5 | 521 | 35,43 | 451 | 36,85 | |
| 37 | 1 | 720 | 36,21 | 626 | 37,85 | |
| 37 | 2 | 997 | 36,39 | 880 | 38,06 | |
| 37 | 5 | 1514 | 35,77 | 1360 | 37,37 | |
| 37 | 10 | 2028 | 35,00 | 1844 | 36,62 | |
| 37 | 20 | 2659 | 33,87 | 2459 | 35,33 | |
| 37 | 25 | 2839 | 34,28 | 2659 | 35,84 | |
| 54 | 0,01 | - | - | 37 | 14,75 | |
| 54 | 0,1 | 66 | 21,31 | 62 | 20,17 | |
| 54 | 0,2 | 81 | 24,08 | 76 | 23,05 | |
| 54 | 0,5 | 106 | 27,20 | 98 | 26,38 | |
| 54 | 1 | 132 | 29,98 | 120 | 30,08 | |
| 54 | 2 | 169 | 33,47 | 153 | 33,97 | |
| 54 | 5 | 277 | 34,83 | 247 | 35,67 | |
| 54 | 10 | 397 | 36,08 | 357 | 37,41 | |
| 54 | 20 | 552 | 37,60 | 498 | 39,33 | |
| 54 | 25 | 600 | 39,54 | 554 | 41,05 | |

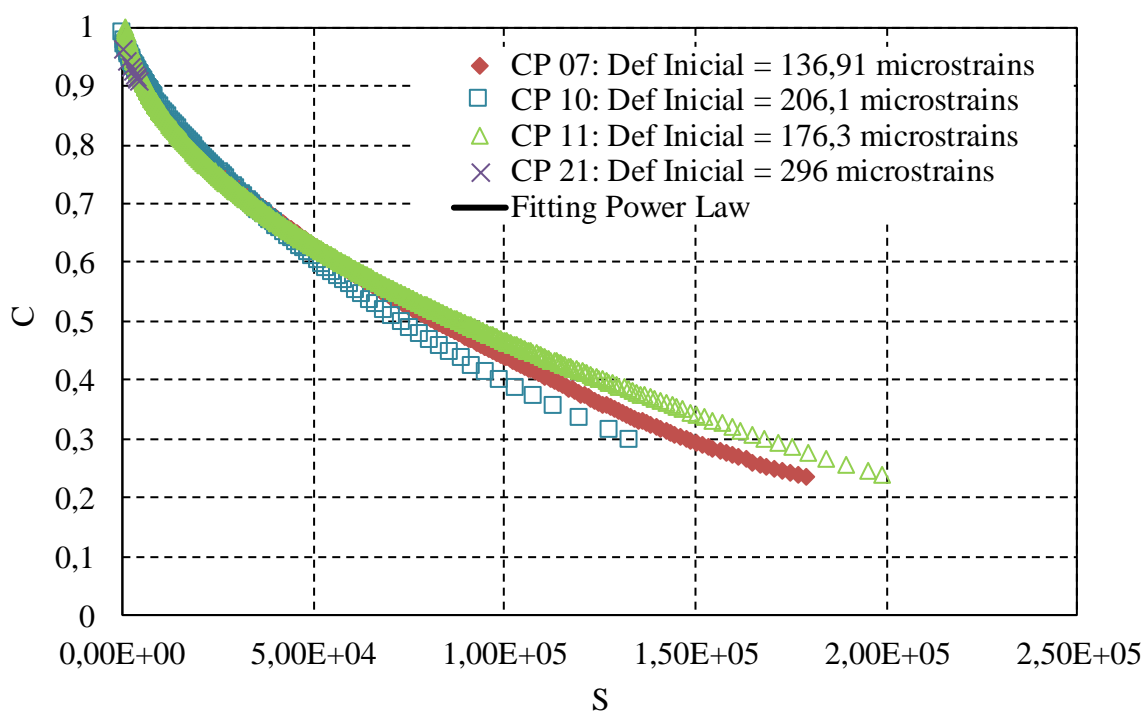
Valores experimentais de Módulo Dinâmico e ângulo de fase da mistura 30 RAP 60/85

| Mistura 30 RAP 60/85 | | | | | | |
|----------------------|------------|----------------|-------------------|----------------|-------------------|--|
| Temp (°C) | Freq. (hz) | E* (MPa) CP 1 | δ (°) CP 1 | E* (MPa) CP 2 | δ (°) CP 2 | |
| -10 | 0,01 | 24338 | 4,81 | 21644 | 6,56 | |
| -10 | 0,1 | 25225 | 4,40 | 24203 | 5,29 | |
| -10 | 0,2 | 26271 | 3,88 | 25101 | 4,84 | |
| -10 | 0,5 | 27072 | 3,49 | 26342 | 4,23 | |
| -10 | 1 | 27789 | 3,15 | 27180 | 3,81 | |
| -10 | 2 | 28628 | 2,75 | 27978 | 3,42 | |
| -10 | 5 | 29216 | 2,44 | 28957 | 2,92 | |
| -10 | 10 | 29778 | 2,16 | 29632 | 2,58 | |
| -10 | 20 | 29335 | 1,69 | 30304 | 2,18 | |
| -10 | 25 | 11219 | 15,57 | 30897 | 2,03 | |
| 4 | 0,01 | 15357 | 10,78 | 10505 | 16,64 | |
| 4 | 0,1 | 16513 | 9,93 | 14092 | 12,46 | |
| 4 | 0,2 | 18109 | 8,87 | 15407 | 11,39 | |
| 4 | 0,5 | 19311 | 8,08 | 17189 | 10,04 | |
| 4 | 1 | 20483 | 7,45 | 18522 | 9,11 | |
| 4 | 2 | 21922 | 6,41 | 19826 | 8,33 | |
| 4 | 5 | 23018 | 5,81 | 21519 | 7,30 | |
| 4 | 10 | 24109 | 5,25 | 22748 | 6,57 | |
| 4 | 20 | 24065 | 5,10 | 23926 | 5,89 | |
| 4 | 25 | 686 | 31,96 | 24178 | 5,55 | |
| 21 | 0,01 | 3473 | 28,17 | 1104 | 32,25 | |
| 21 | 0,1 | 4638 | 25,55 | 3116 | 29,43 | |
| 21 | 0,2 | 6009 | 23,04 | 4113 | 27,42 | |
| 21 | 0,5 | 7113 | 21,31 | 5466 | 24,98 | |
| 21 | 1 | 8262 | 19,64 | 6555 | 23,24 | |
| 21 | 2 | 9910 | 17,55 | 7750 | 21,49 | |
| 21 | 5 | 11214 | 16,04 | 9432 | 19,21 | |
| 21 | 10 | 12543 | 14,34 | 10811 | 17,50 | |
| 21 | 20 | 13025 | 14,02 | 12267 | 15,93 | |
| 21 | 25 | 157 | 29,67 | 12765 | 15,45 | |
| 37 | 0,01 | 480 | 33,24 | 156 | 26,27 | |
| 37 | 0,1 | 694 | 33,84 | 408 | 32,74 | |
| 37 | 0,2 | 1064 | 34,13 | 579 | 34,08 | |
| 37 | 0,5 | 1437 | 34,13 | 884 | 35,48 | |
| 37 | 1 | 1908 | 33,61 | 1203 | 35,99 | |
| 37 | 2 | 2702 | 32,22 | 1629 | 35,74 | |
| 37 | 5 | 3444 | 30,79 | 2371 | 34,53 | |
| 37 | 10 | 4296 | 29,12 | 3089 | 33,15 | |
| 37 | 20 | 4545 | 29,27 | 3945 | 31,58 | |
| 37 | 25 | 60 | 17,31 | 4262 | 31,92 | |
| 54 | 0,01 | 107 | 24,50 | 66 | 15,19 | |
| 54 | 0,1 | 137 | 27,43 | 113 | 25,58 | |
| 54 | 0,2 | 191 | 30,81 | 144 | 27,79 | |
| 54 | 0,5 | 249 | 33,24 | 198 | 31,32 | |
| 54 | 1 | 335 | 35,82 | 253 | 33,70 | |
| 54 | 2 | 531 | 36,34 | 343 | 36,65 | |
| 54 | 5 | 749 | 36,91 | 534 | 36,73 | |
| 54 | 10 | 1037 | 37,68 | 745 | 36,97 | |
| 54 | 20 | 1151 | 38,40 | 1031 | 37,65 | |
| 54 | 25 | 24338 | 4,81 | 1149 | 38,65 | |

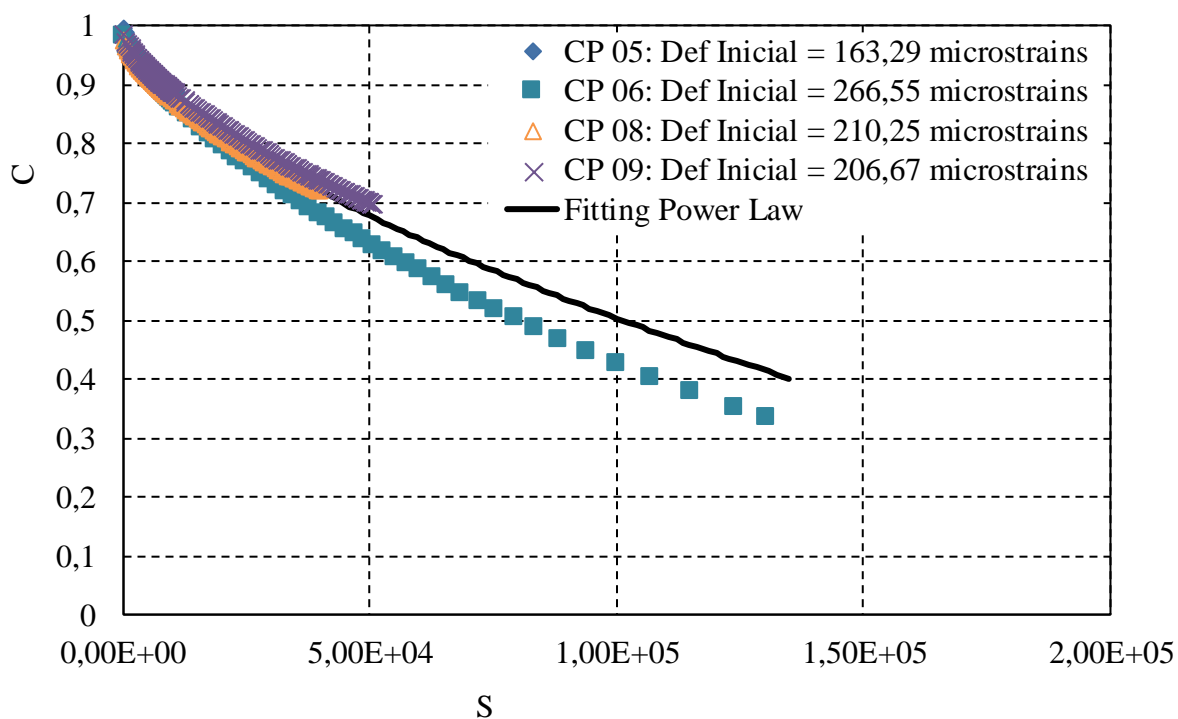
APÊNDICE B

APÊNDICE B – Curvas características de dano (C vs. S)

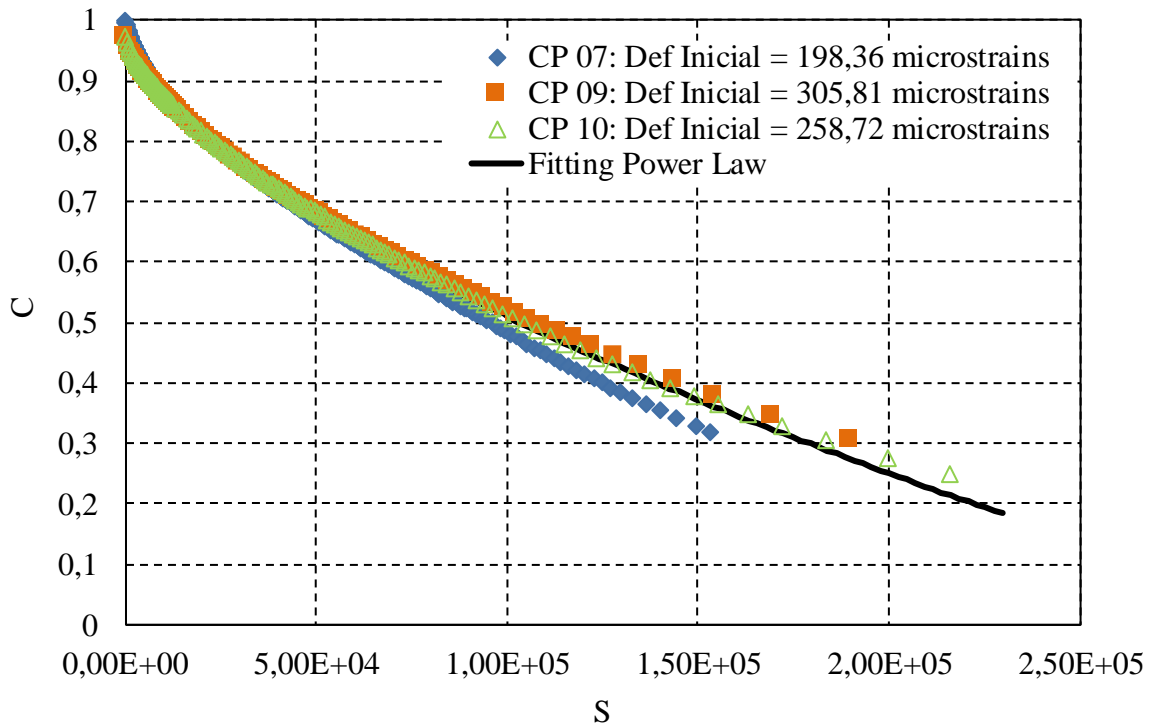
Curva C vs. S da mistura de referência 50/70



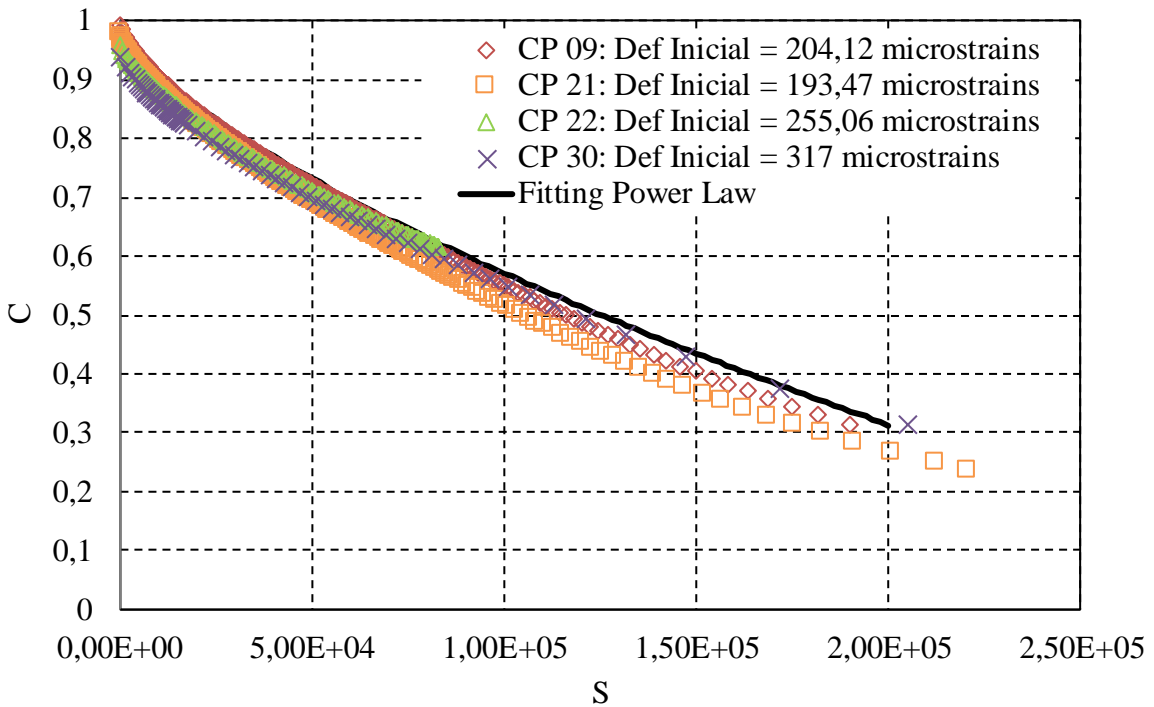
Curva C vs. S da mistura 10 RAP 50/70



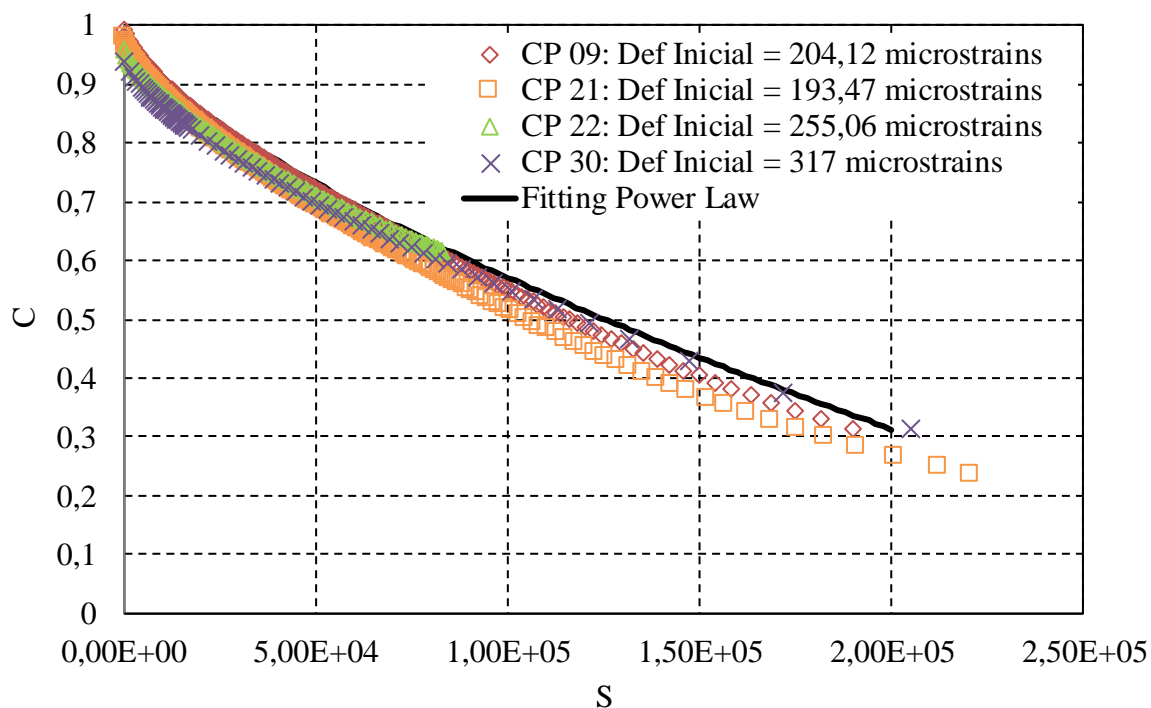
Curva C vs. S da mistura 20 RAP 50/70



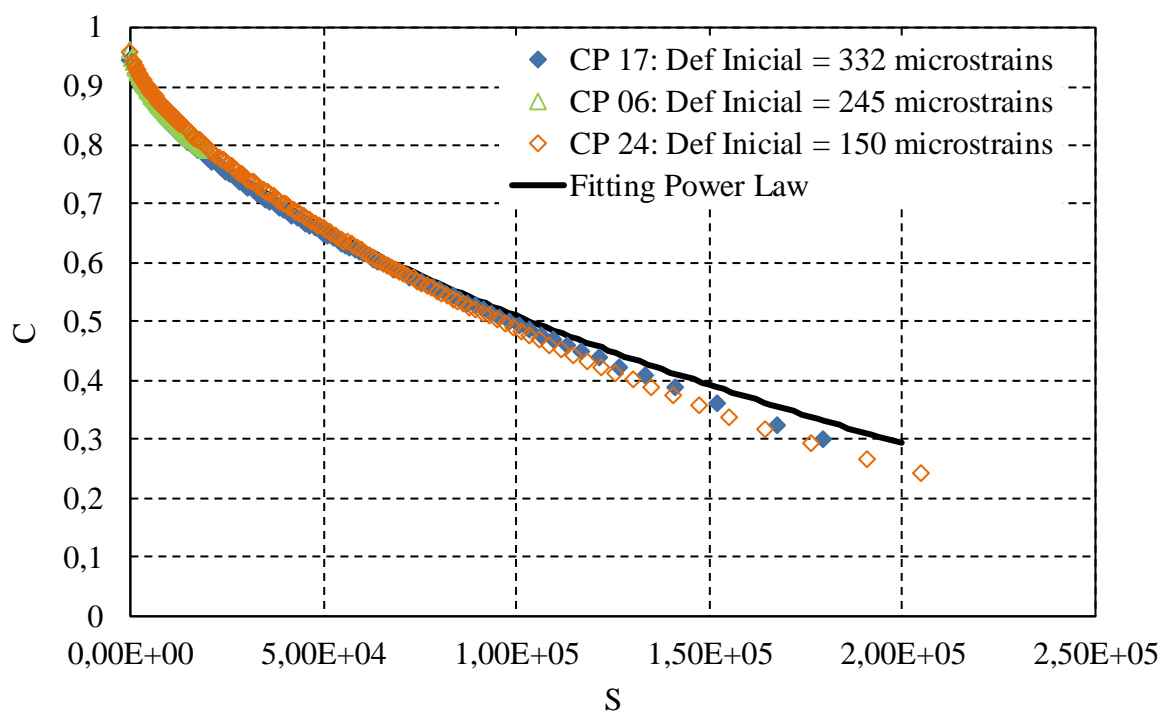
Curva C vs. S da mistura 30 RAP 50/70



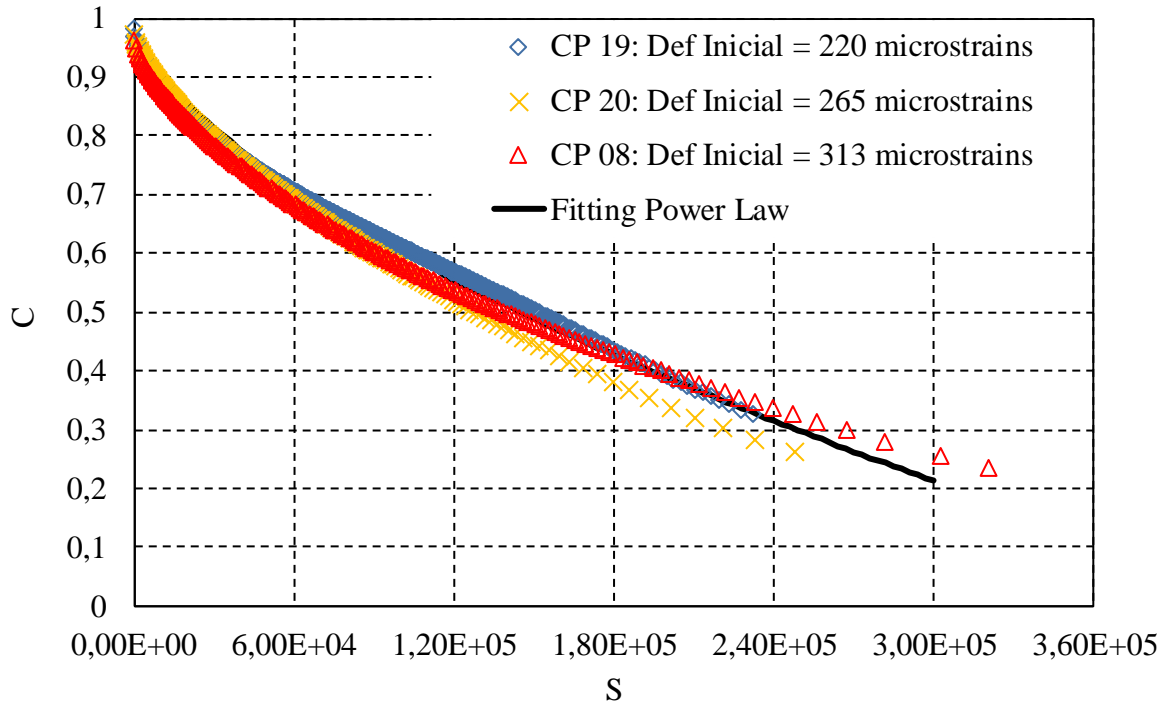
Curva C vs. S da mistura de referência 60/85



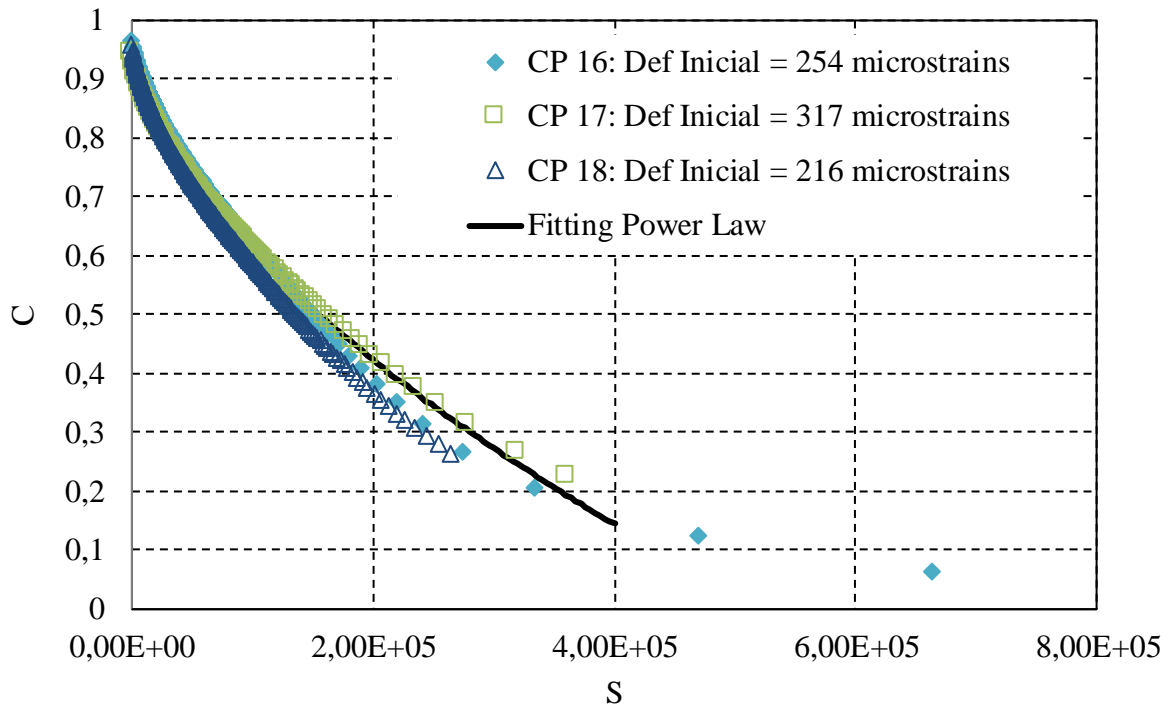
Curva C vs. S da mistura 10 RAP 60/85



Curva C vs. S da mistura 20 RAP 60/85



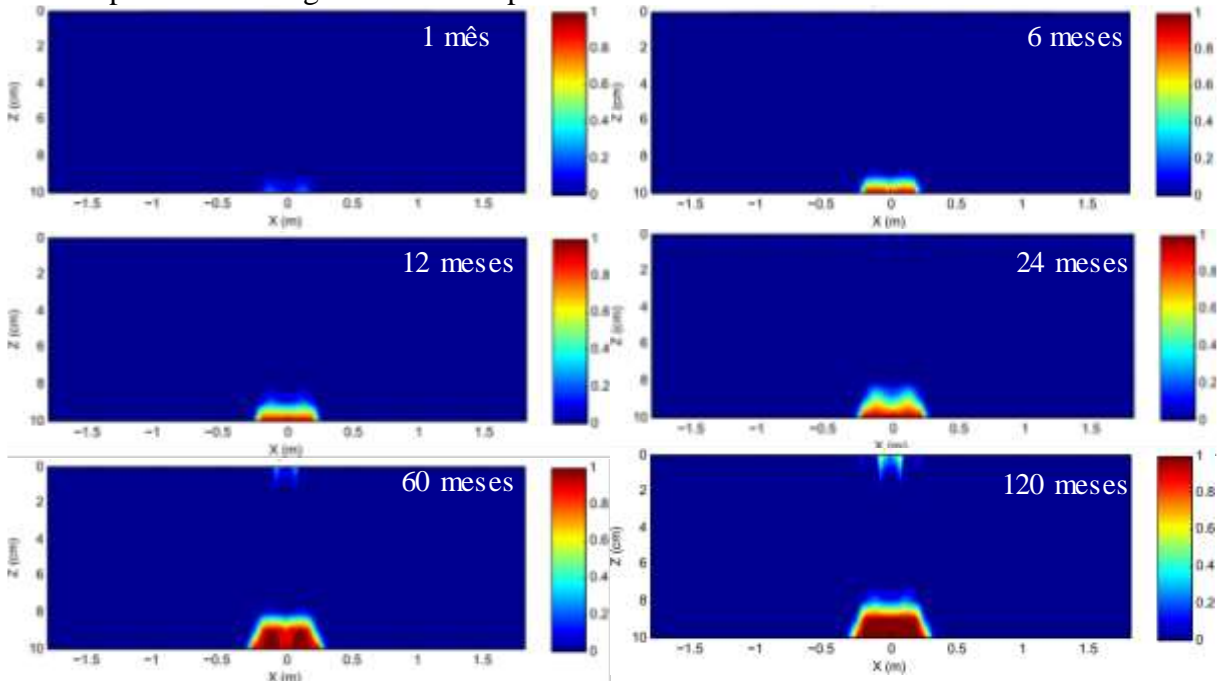
Curva C vs. S da mistura 30 RAP 60/85



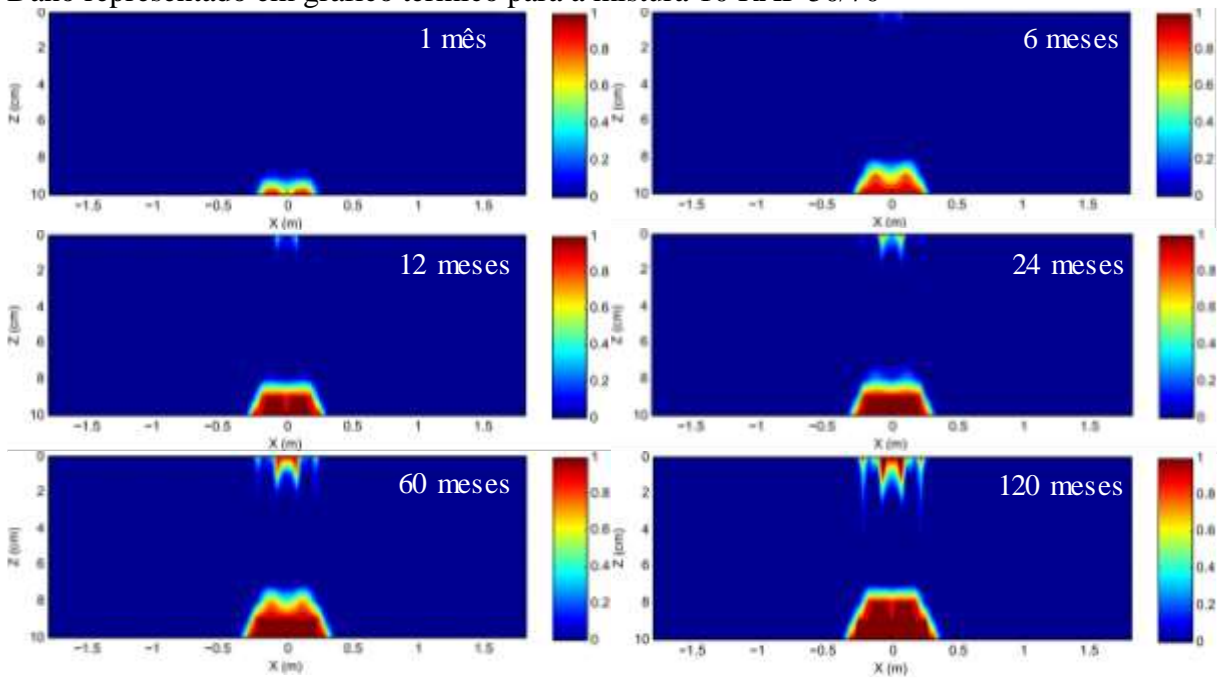
APÊNDICE C

APÊNDICE C – Gráficos térmicos da evolução de dano nas estruturas de pavimento

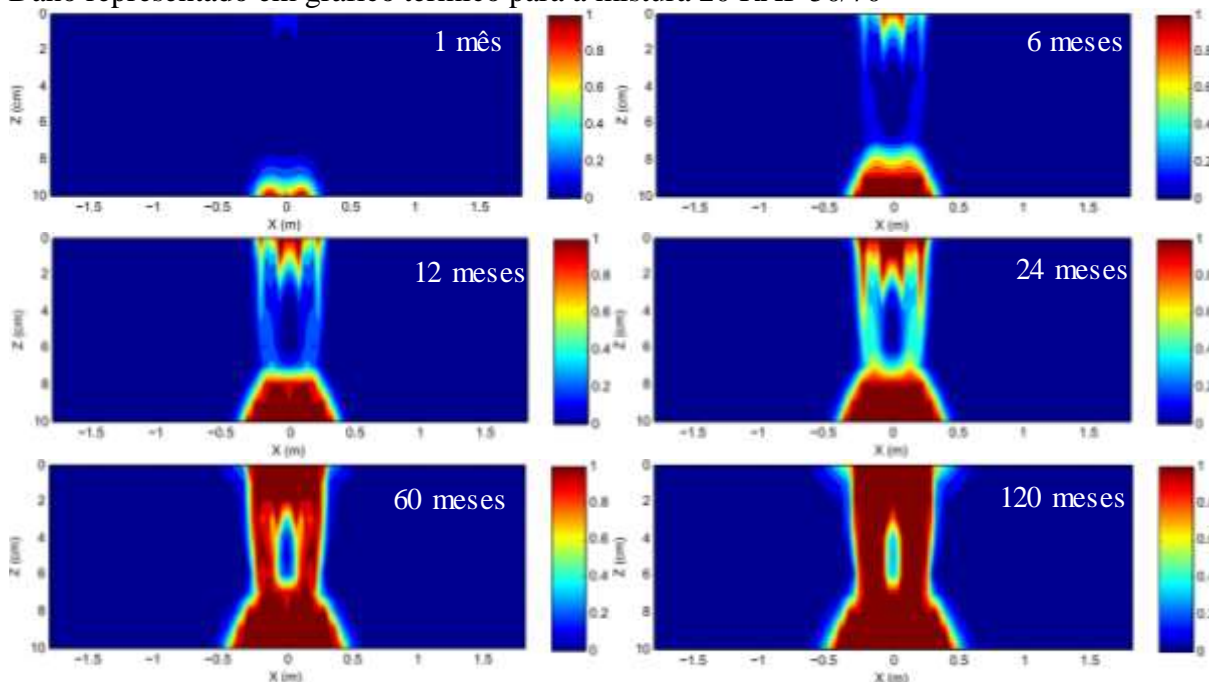
Dano representado em gráfico térmico para a mistura Referência 50/70



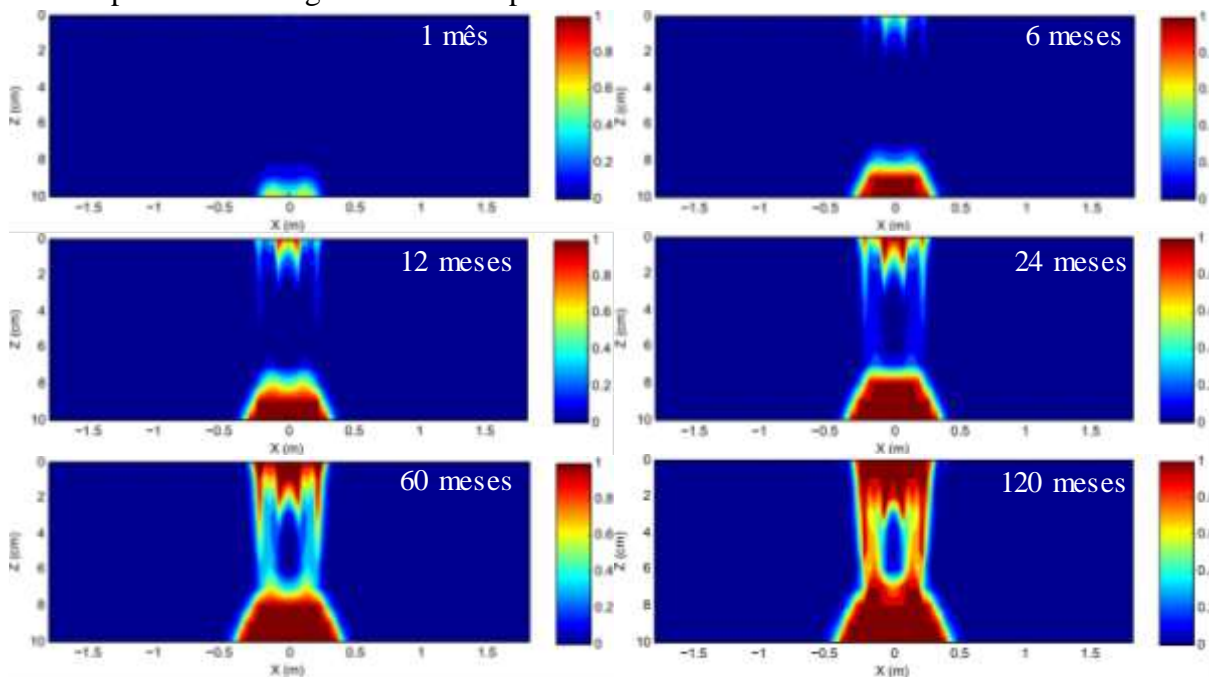
Dano representado em gráfico térmico para a mistura 10 RAP 50/70



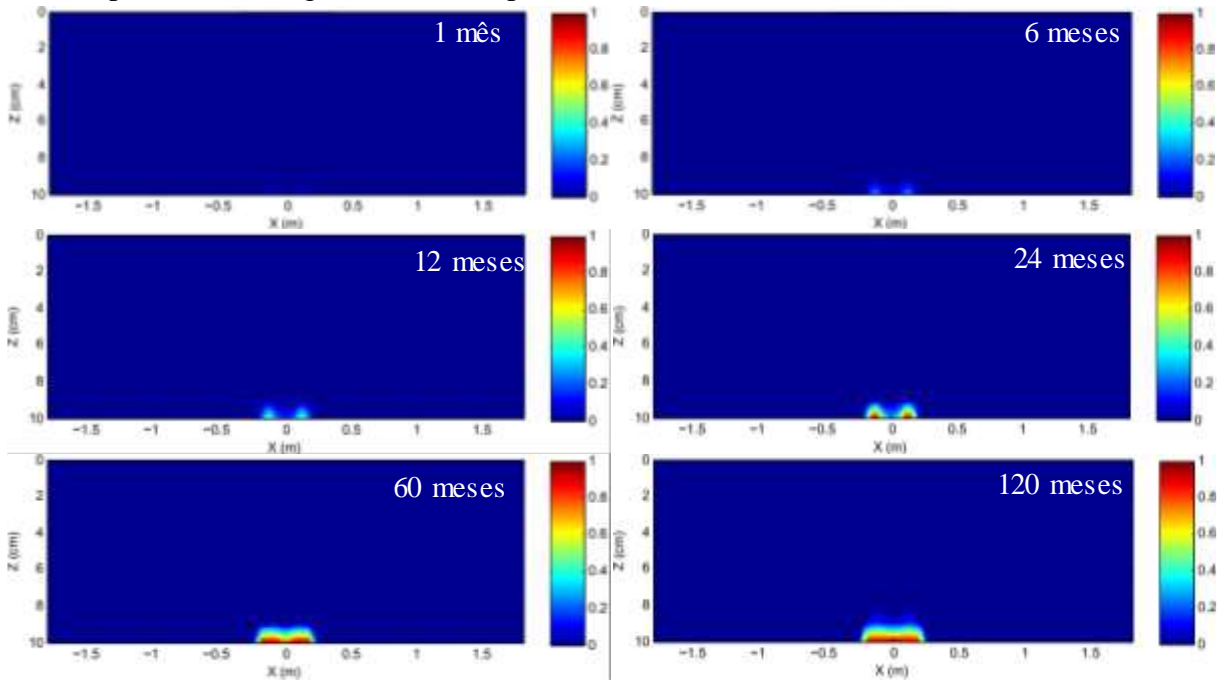
Dano representado em gráfico térmico para a mistura 20 RAP 50/70



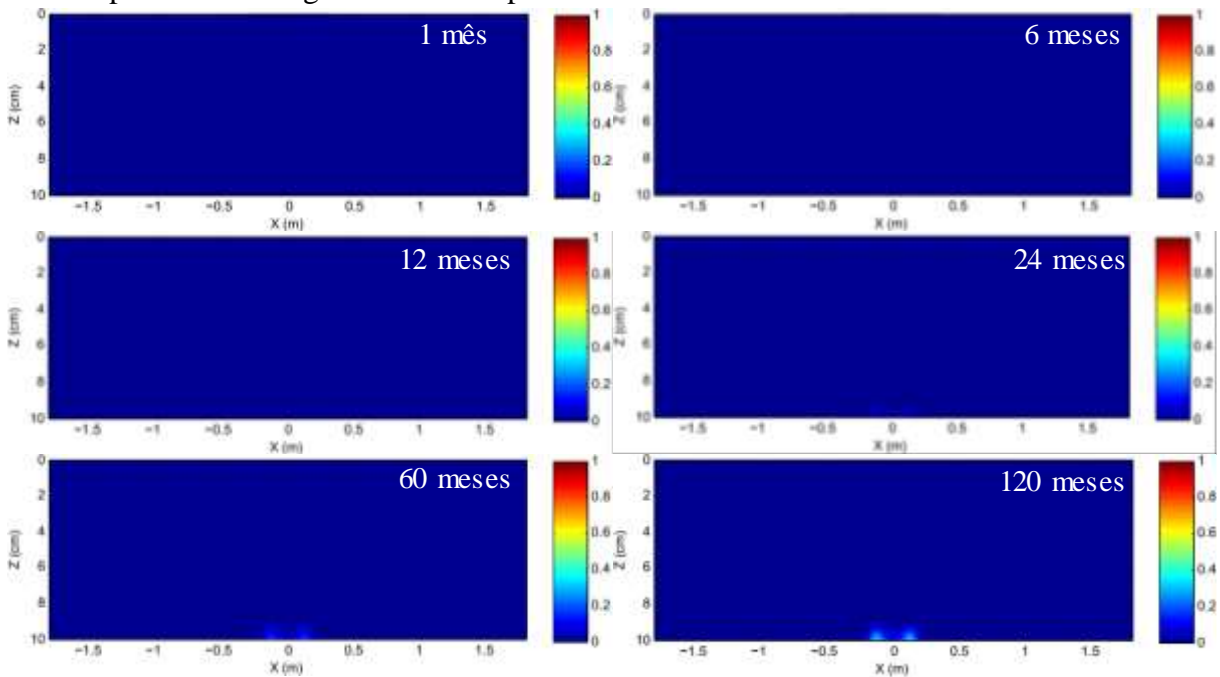
Dano representado em gráfico térmico para a mistura 30 RAP 50/70



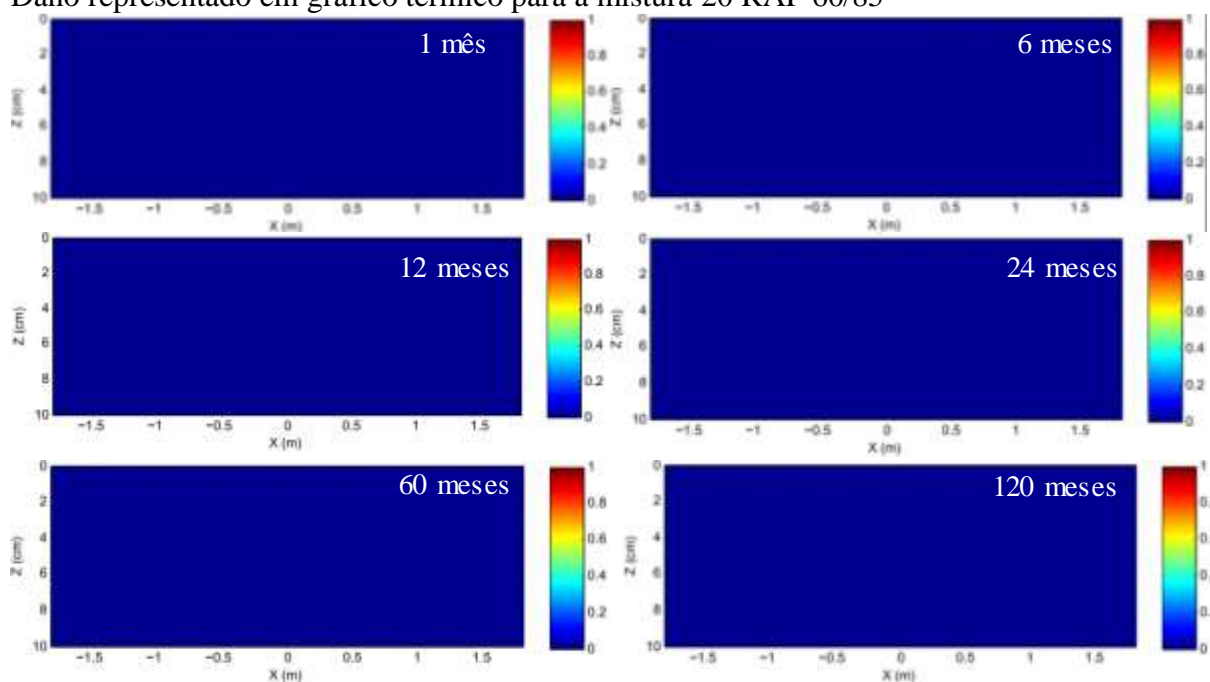
Dano representado em gráfico térmico para a mistura de Referência 60/85



Dano representado em gráfico térmico para a mistura 10 RAP 60/85



Dano representado em gráfico térmico para a mistura 20 RAP 60/85



Dano representado em gráfico térmico para a mistura 30 RAP 60/85

