

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

Felipe Cipriani Luzzi

**ADAPTAÇÃO DE USINA PARA RECICLAGEM À QUENTE E
AVALIAÇÃO LABORATORIAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS
PRODUZIDAS**

Santa Maria, RS
2019

Felipe Cipriani Luzzi

**ADAPTAÇÃO DE USINA PARA RECICLAGEM À QUENTE E AVALIAÇÃO
LABORATORIAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS**

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, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS
2019

Luzzi, Felipe

Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas / Felipe Luzzi.- 2019.

187 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, 2019


1. Reciclagem à quente de misturas asfálticas I.
Pivoto Specht, Luciano II. Título.

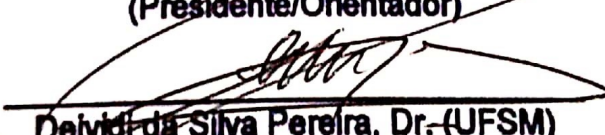
Felipe Cipriani Luzzi

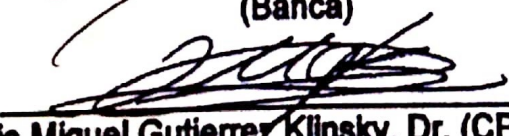
**ADAPTAÇÃO DE USINA PARA RECICLAGEM À QUENTE E AVALIAÇÃO
LABORATORIAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS**


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, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovado em 30 de maio de 2019:


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


Delvid da Silva Pereira, Dr. (UFSM)
(Banca)


Luis Miguel Gutierrez Klinsky, Dr. (CPR/CCR)
(Banca)


Kamilla Vasconcelos Savasini, Dr. (USP)
(Banca)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me proporcionou a conclusão de mais esta etapa.

Agradeço aos meus pais, Ronaldo e Neiva, por sempre incentivarem-me na busca contínua pelo aprendizado! A minha irmã Bruna e o seu noivo, Raphael, por abrirem as portas de sua casa e me darem todo o apoio possível! Ao meu irmão Fabrício, que mesmo de longe, manteve o apoio e incentivo.

A minha namorada Fabiane, por ser a principal incentivadora deste trabalho e manter-me no foco, aguentando todo o estresse e a correria, mesmo em momentos em que estávamos longe. Esta conquista é nossa!

Ao Professor Luciano Pivoto Specht pela ilustre orientação prestada, pelos conhecimentos repassados, por acreditar em mim e na possibilidade de colocarmos em prática esta pesquisa e, principalmente, pelo exemplo de pessoa e profissional!

Ao Professor Deividi da Silva Pereira pela disponibilidade de participar da banca, mas principalmente, pelas contribuições e conhecimentos para enriquecimento deste trabalho.

Aos Professores Magno Baroni e Tatiana Cureau Cervo pelo apoio, ensinamentos e participação no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos Professores Luis Miguel Gutiérrez Klinsky e Kamilla Vasconcelos por aceitarem o convite, pela avaliação e tempo disponibilizado e, principalmente, pelas importantes contribuições a este trabalho.

À CAPES pelo suporte financeiro através da bolsa, a ANP e PETROBRAS pelo investimento nos equipamentos utilizados.

A todos os colegas de GEPPASV que de alguma maneira contribuíram para a conclusão deste trabalho. Bolsistas ou voluntários, todos têm a sua importante participação e contribuição. Em especial, aos colegas Fernando Dekeper Boeira, Silvio Schuster, Lucas Bueno, Pedro Orlando Borges Almeida Jr., Chavelli Brondani, Gustavo dos Santos Pinheiro, os quais foram essenciais para a conclusão deste trabalho!

Agradeço também a Triunfo/Concepa, por entender e acreditar na importância prática desta pesquisa e viabilizar todos os recursos financeiros necessários a implementação e desenvolvimento deste trabalho. Aos Eng. Fabio Hirsch e Thiago Vitorello pela oportunidade de tirar do papel os objetivos desta pesquisa.

A toda equipe da Eldorado Mineração, em especial ao Sr. Walter (in memoriam), Fábio, Manozzo, Everton e Valdemir, por viabilizar os equipamentos e suporte, assim como a toda a dedicação para o desenvolvimento das atividades.

Agradeço ao Eng. Vinícius Alves e a toda a equipe da MV PAV pela dedicação, parceria, empenho e, principalmente, pela qualidade do trabalho desenvolvido.

Aos Eng. Guilherme Piccoli e André Franceschini e toda a equipe da CIBER, pelo aprendizado compartilhado, desenvolvimento técnico necessário, empenho e dedicação para a finalização dos trabalhos com qualidade.

Por fim, agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho, sendo com contribuições técnicas ou pela torcida e amizade!

RESUMO

ADAPTAÇÃO DE USINA PARA RECICLAGEM À QUENTE E AVALIAÇÃO LABORATORIAL DAS MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS

AUTOR: Felipe Cipriani Luzzi
ORIENTADOR: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Os pavimentos asfálticos brasileiros vêm sofrendo ao longo dos anos, com o crescente volume de tráfego, deficiências estruturais e funcionais necessitando de contínua manutenção, afetando, também, o conforto e segurança de usuários. Neste sentido, soluções para a correção desta problemática são necessárias e a reciclagem à quente de misturas asfálticas surge como uma alternativa viável do ponto de vista técnico, ambiental e na redução de custos. Desta forma, esta pesquisa buscou elaborar projetos contendo 10 (M10), 20 (M20) e 30% (M30) de material fresado (RAP), implementar uma usina volumétrica para a incorporação de RAP, avaliar em laboratório as misturas produzidas em usina e verificar a viabilidade financeira. Os projetos se enquadraram nas recomendações da Especificação de Serviço do DNIT 031/2006, utilizando ligante asfáltico (CAP) modificado por polímero (60/85), agregado de origem granítica e RAP de origem basáltica com CAP modificado. A usina foi implementada para entrada de RAP diretamente no misturador. O controle tecnológico após a usinagem demonstrou um comportamento com poucas divergências em referência ao inicialmente projetado. A avaliação mecânica foi realizada através dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR), Módulo Complexo, Resistência a Tração (RT), Flow Number (FN) e Fadiga a Tração-Compressão. Além destes, as características de Adesão/Coesão foram obtidas através de Dano por Umidade Induzida (DUI) e o Desgaste Cântabro. O ensaio de MR demonstrou 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 a M20 e M30. No Módulo Complexo, pela modelagem 2S2P1D, não se pode atribuir o comportamento elástico ou viscoso ao percentual de RAP inserido nas misturas, o que já era esperado pelos baixos teores incorporados. Na RT, notou-se um aumento de resistência com o aumento do percentual de RAP, já no FN, os valores diminuíram. Nos ensaios de DUI e desgaste não se verifica 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 M10 como tendo o melhor comportamento e, a M30, o pior. Esta análise continua na viabilidade econômica, já que o valor analisado durante a vida de fadiga encontrado é expressivamente menor em M10 comparado as outras misturas, mesmo sendo o custo unitário de M30, o menor. Denota-se a possibilidade de uso da reciclagem à quente, verificando-se os ganhos ambientais e financeiros associados a qualidade técnica das misturas, tomando-se os cuidados necessários na usinagem, aplicação e controle tecnológico.

Palavras-chave: Material Fresado. Reciclagem de Pavimentos. Misturas asfálticas recicladas à quente

ABSTRACT

ADHESION ADAPTATION FOR HOT RECYCLING AND LABORATORY EVALUATION OF ASPHALTIC MIXTURES PRODUCED

AUTHOR: Felipe Cipriani Luzzi
ADVISOR: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Brazilian asphalt pavements have suffered over the years, with the increasing volume of traffic, structural and functional deficiencies requiring continuous maintenance, affecting, also, the comfort and safety of users. In this sense, solutions to the correction of this problem are necessary and the hot recycling of asphalt mixtures appears as a viable alternative from the technical, environmental point of view and the reduction of costs. In this way, this research sought to elaborate projects containing 10 (M10), 20 (M20) and 30% (M30) of milled material (RAP), to implement a volumetric plant to incorporate RAP, to evaluate in the laboratory the mixtures produced in the plant and financial viability. The projects conformed to the recommendations of the DNIT 031/2006 Service Specification, using asphalt binder modified by polymer (60/85), aggregate of granite origin and RAP of basaltic origin with modified asphalt binder modified. The plant was implemented for RAP input directly into the mixer. The technological control after machining showed a behavior with few differences in reference to the initially designed one. The mechanical evaluation was performed through the Modulus of Resilience (MR), Complex Modulus, Tensile Strength (TS), Flow Number (FN) and Traction-Compression Failure tests. In addition, the adhesion/cohesion characteristics were obtained through induced damp damage (IDM) and cantabrian wear. The MR assay demonstrated that there is an increase in stiffness with increased RAP in the blends, but the final binder content found stands out as the decrease in stiffness between M20 and M30 is found. In the Complex Module, by the 2S2P1D modeling, the elastic or viscous behavior cannot be attributed to the percentage of RAP inserted in the mixtures, which was already expected by the low incorporated contents. In RT, an increase in stiffness was observed with increasing percentage of RAP, already in FN, values decreased. In DUI and wear tests there is no specific behavior in accordance with the incorporation of milling, but the recycled mixtures have similar results to the conventional ones. In the fatigue results, M10 was rated as having the best behavior and, at M30, the worst. This analysis continues in the economic feasibility, since the value analyzed during the life of the fatigue found is expressively smaller in M10 compared to the other mixtures, even though the unit cost of M30 is the lowest. The possibility of using the hot recycle is indicated, and the environmental and financial gains associated with the technical quality of the mixtures are observed, taking care of the machining, application and technological control.

Key words: Milling Material. Recycling of Pavements. Hot recycled asphalt mixtures.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de reciclagem à quente em usinas.....	27
Figura 2 – Fresadora realizando de remoção da camada asfáltica.....	29
Figura 3 – Diferentes texturas após fresagem de pavimentos.....	29
Figura 4 – Granulador Benninghoven MBRG 2000.....	30
Figura 5 – Croqui de usina para reciclagem à quente.....	31
Figura 6 – Processo de separação de frações (a) e o armazenamento do RAP (b).....	33
Figura 7 – Esquema de entrada de RAP em misturador de usina gravimétrica.....	37
Figura 8 – Esquema de entrada de RAP em elevador de usina gravimétrica.....	38
Figura 9 – Esquema de entrada de RAP em tambor secador paralelo.....	39
Figura 10 – Esquema de entrada de RAP em anel no secador da usina gravimétrica.....	40
Figura 11 – Funcionamento de tambor secador para 100% de RAP.....	40
Figura 12 – Modelo genérico de inserção de RAP em usinas volumétricas.....	41
Figura 13 – Entrada de RAP em tambor misturador de fluxo paralelo.....	42
Figura 14 – Entrada de RAP em tambor misturador do tipo contra fluxo.....	43
Figura 15 – Entrada de RAP em tambor duplo.....	44
Figura 16 – Sobreaquecimento de agregados para tambor duplo e contra fluxo.....	44
Figura 17 – Entrada de RAP em misturador contínuo em secador de contra fluxo.....	45
Figura 18 – Envelhecimento de ligante asfáltico.....	47
Figura 19 – Fluxograma de atividades.....	55
Figura 20 – Localização da Pedreira.....	57
Figura 21 – Curvas granulométricas dos agregados.....	58
Figura 22 – Local da retirada do material fresado.....	59
Figura 23 – Equipamento realizando serviço de fresagem (a) e detalhe do tambor de fresagem (b).....	59
Figura 24 – Granulometrias das amostras de material fresado anterior à extração de ligante asfáltico.....	60
Figura 25 – Granulometrias de RAP encontradas após a extração de ligante asfáltico.....	61
Figura 26 – Composição das curvas granulométricas definidas.....	65
Figura 27 – Usina Volumétrica utilizada para as misturas.....	68
Figura 28 – Croqui da implantação de silo para entrada de RAP.....	68
Figura 29 – Estrutura para beneficiamento RAP (a) e teste realizado (b).....	69
Figura 30 – Carregadeira realizando o processo de secagem anteriormente a usinagem das misturas.....	70
Figura 31 – Coleta de amostras.....	71
Figura 32 – Misturador (a) e compactador giratório Superpave (b) para moldagem de amostras.....	72
Figura 33 – Corpos de prova moldados para realização dos ensaios.....	73
Figura 34 – Prensa UTM-25 e posicionamento dos CP's para o ensaio de MR.....	75
Figura 35 – Amostras moldadas (a), em condicionamento (b) e ensaio de E* sendo realizado (c).....	77
Figura 36 – Modelo 2S2P1D.....	78
Figura 37 – Ensaio de Desgaste Cântabro: tambor (a) e amostras após ensaio (b).....	80
Figura 38 – Saturação (a) e preparo para congelamento (b) no primeiro grupo de amostras.....	81
Figura 39 – Processos de banho-maria necessários ao ensaio de dano por umidade induzida.....	81

Figura 40 – Regiões da curva de deformação plástica e obtenção do FN	82
Figura 41 – Ensaio de Flow Number sendo realizado	83
Figura 42 – Demonstração esquemática do ensaio de compressão diametral.....	84
Figura 43 – Ensaio de Resistência a Tração por compressão diametral sendo realizado	85
Figura 44 – processo de colagem das placas (a), ensaio sendo realizado (b) e um corpo de prova após a realização do ensaio (c).	86
Figura 45 – Processo de separação das frações do RAP: vista inferior (a) do peneiramento e posicionamento da carregadeira (b)	88
Figura 46 - Falta de envolvimento de ligante (a) e grumos nas misturas produzidas (b)	89
Figura 47 – Material retido (a) e passante (b) na peneira de malha $\frac{3}{4}$ "	90
Figura 48 – Local para armazenamento do RAP: preparação do local (a) e material fresado coberto (b)	90
Figura 49 – Instalação (a) e posicionamento do silo alimentador de RAP em relação a usina (b).....	91
Figura 50 – Detalhe da entrada do RAP: abertura superior (a) e calha instalada no final da correia (b)	92
Figura 51 – Alimentação do silo de RAP	92
Figura 52 – Curva granulométrica: M0 projetado e após a usinagem	95
Figura 53 – Curva granulométrica: M10 projetado e após a usinagem	96
Figura 54 – Curva granulométrica: M20 projetado e após a usinagem	96
Figura 55 – Curva granulométrica: M30 projetado e após a usinagem	97
Figura 56 – Resultados obtidos de Módulo de Resiliência	99
Figura 57 – Comparação dos dados de Módulo de Resiliência com os dados desta pesquisa, Bohn (2017), Centofante (2016), Rocha et al. (2012) e Lima (2003).....	101
Figura 58 – Isoterma de Módulo Dinâmico a 21°C	102
Figura 59 – Isoterma de Ângulo de fase a 37°C	102
Figura 60 – Isócrona de Módulo Dinâmico a 10Hz	103
Figura 61 – Isócrona de Ângulo de Fase a 10Hz.....	103
Figura 62 – Espaço Cole-Cole para a mistura de referência	105
Figura 63 – Diagrama Black para a mistura de referência.....	105
Figura 64 – Espaço Cole-Cole para as quatro misturas avaliadas	106
Figura 65 – Diagrama Black para as quatro misturas avaliadas.....	107
Figura 66 – Comparação das curvas log a(T) para todas as misturas	108
Figura 67 – Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas a 20°C..	109
Figura 68 – Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas em baixas frequências a 20°C	110
Figura 69 – Curvas mestras de ângulo de fase para todas as misturas	110
Figura 70 – Valores de perda em massa para as misturas avaliadas	113
Figura 71 – Comparação dos valores obtidos no Desgaste Cântabro entre Centofante (2016), Bohn (2017) e esta pesquisa.....	114
Figura 72 – Valores de Resistência a Tração Retida.....	115
Figura 73 – Comparação de valores de Resistência a Tração Retida entre esta pesquisa, Suzuki (2019), Arshad et al. (2017), Bohn (2017), Centofante (2016) e Dept. Minnesota (2002).....	117
Figura 74 – Curvas Deformação x FN para as misturas analisadas	118
Figura 75 – Valores de FN (Ciclos) para cada uma das misturas avaliadas.....	119
Figura 76 – Critério de FN para níveis de tráfego.....	121

Figura 77 – Valores encontrados para RT em função do teor de fresado adicionado a mistura	123
Figura 78 – Comportamento da Resistência a Tração encontrados em Luzzi (2019), Suzuki (2019), Bohn (2017), Centofante (2016), Nascimento et al (2013) e Lima (2003) pela influência do teor de RAP	124
Figura 79 - Módulo dinâmico e ângulo de fase versus número de ciclos de ensaio de fadiga	126
Figura 80 – Curvas C vs S da mistura M0.....	127
Figura 81 – Curvas C vs S da mistura M10.....	127
Figura 82 – Curvas C vs S da mistura M20.....	128
Figura 83 – Curvas C vs S da mistura M30.....	128
Figura 84 – Curvas C vs S para todas as misturas (curvas fitting).....	129
Figura 85 – Envoltória Gr x Nf para todas as misturas.....	131
Figura 86 – Simulação da Nf a partir do critério de ruptura GR, 19°C e 10Hz – Nascimento (2016).....	132
Figura 87 – Estruturas utilizadas para análise dos dados no LVECD	133
Figura 88 – Dano acumulado de 120 meses para todas as misturas com tráfego de 5×10^6	135
Figura 89 – Dano acumulado de 120 meses para todas as misturas com tráfego de 1×10^7	136
Figura 90 – Dano acumulado de 120 meses para todas as misturas com tráfego de 5×10^7	136
Figura 91 – Dano representado em gráfico térmico – M0 com 5 cm e VDM de 5×10^6	137
Figura 92– Percentual de área trincada de todas as misturas para tráfego de 5×10^6	138
Figura 93 – Percentual de área trincada para todas as misturas de 1×10^7	139
Figura 94 – Percentual de área trincada para todas as misturas de 5×10^7	139
Figura 95 – Comparação entre Luzzi (2019), Schuster (2018) e Boeira (2018) da relação FAF x NF	143
Figura 96 – Distâncias de transporte possíveis para o RAP em função do custo das misturas.....	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperatura de aquecimento de agregados em função da % de RAP, % de umidade e temperatura final de mistura desejada	35
Tabela 2 – Taxa de reciclagem (TR) máxima em função do tipo de usina	36
Tabela 3 – Distribuição de corpos de prova por ensaio realizado	56
Tabela 4 – Granulometrias dos materiais agregados utilizados	57
Tabela 5 – Ensaio de caracterização do agregado britado	58
Tabela 6 – Granulometrias das amostras de material fresado anterior à extração de ligante asfáltico	60
Tabela 7 – Granulometrias das amostras de material fresado após extração de ligante asfáltico	61
Tabela 8 – Teor de ligante e umidade e massa específica máxima medida das amostras de RAP	61
Tabela 9 – Características do CAP do RAP após extração pelo método Abson	62
Tabela 10 – Limites estabelecidos para o ligante asfáltico para dosagem dos projetos	63
Tabela 11 - Limites estabelecidos para o ligante asfáltico para usinagem das misturas	63
Tabela 12 – Percentuais de materiais nas curvas granulométricas	64
Tabela 13 – Distribuição granulométrica das misturas definidas em projeto	65
Tabela 14 – Escolha de teores para a determinação do teor ótimo de ligante a inserir nas misturas	66
Tabela 15 – Teores ótimos de ligante asfáltico ótimo	67
Tabela 16 – Resumo de dados de projetos	67
Tabela 17 – Temperatura de aquecimento de agregados e final desejada da mistura	70
Tabela 18 – Volume de Vazios calculados para os ensaios laboratoriais	73
Tabela 19 – Tempo mínimo recomendado para equilíbrio de temperatura para amostras	77
Tabela 20 – Teor de ligante obtido depois do processo de usinagem	93
Tabela 21 – Resultados de MR à frequência de 1 Hz de carregamento	98
Tabela 22 – Parâmetros da modelagem 2S2P1D e constantes C1 e C2	104
Tabela 23 – Valores de desgaste por abrasão Cântabro	112
Tabela 24 – Valores de Resistência a Tração Retida	115
Tabela 25 – Curvas Deformação x FN para as misturas analisadas	119
Tabela 26 – Valores de Resistência a tração obtidos	122
Tabela 27 - Coeficientes C11, C12, Y e Δ para cada mistura	130
Tabela 28 – Dados da equação de GR para todas as misturas	131
Tabela 29 – Ranking de misturas pelo parâmetro FAF calculado pela equação de Nascimento (2008)	142
Tabela 30 – Custos de usinagem e aplicação por m ³ para cada uma das misturas	145
Tabela 31 – Custos das estruturas ao longo da vida útil	147

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

2S2P1D	2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot
A, B, C e D	Parâmetros Modelo Francken
a[T]	Curvas Fator de Deslocamento Dependente da Temperatura
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ARRA	Asphalt Recycling and Reclaiming Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
C	Integridade do Material
C1 e C2	Parâmetros do Modelo 2S2P1D
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado à quente
CEC	Centro de Estudios Carreteras
CGS	Compactador Giratório Superpave
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo-de-Prova
CV	Coeficiente de Variação
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DOT	Minnesota Department of Transportation
DP	Desvio Padrão
E*	Módulo Complexo
E1	Parte Real Módulo Complexo
E2	Parte Imaginária Módulo Complexo
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EM	Norma Européia
ES	Especificação de Serviço
FAF	Fator de Área de Fadiga
FHWA	Federal Highway Administration
FN	Flow Number
GEPPASV	Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária
Gr	Taxa de variação da média da energia de pseudo-deformação com respeito ao número de ciclos
HMA	Hot Mix Asphalt
INIR	Instituto de Infraestruturas Rodoviárias (Portugal)
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT	Linear Variable Differential Transducer
LVECD	Layered Viscoelastic Pavement Analysis For Critical Distresses
MARQ	Mistura Asfáltica Reciclada à quente
ME	Método de Ensaio
MPa	Mega Pascal
MR	Módulo de Resiliência
NAPA	National Asphalt Pavement Association
NBR	Norma Brasileira
NCAT	National Center for Asphalt Technology

Nf	Número de ciclos até a falha
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NLT	Norma Espanhola
NYSDOT	NEW YORK STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION
Pa.s	Pascal Segundo
PMF	Pré-misturado à frio
PMQ	Pré-misturado à quente
PG	Performance Grade
RAP	Recycled Asphalt Pavement ou Reclaimed Asphalt Pavement
RRt	Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
RT'	Resistência à Tração (Ensaio Lottman Modificado)
S	Dano no Material
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performance Asphalt Pavements
TSM	Tambor Secador Misturador
TSR	Tensile Strength Ratio
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
USACE	Corpo de Engenheiros do Exército Americano
UTM	Universal Testing Machine
Vv	Volume de Vazios
WLF	William, Landel e Ferry
WMA	Warm Mix Asphalt
ε_0	Deformação axial recuperável máxima
ε_i	Deformação inicial
ε_p	Deformação plástica
γ	Coefficiente de Poisson
ϕ	Ângulo de fase do material
μs	Microstrain

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.1. OBJETIVO GERAL	23
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	24
2. REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1. RECICLAGEM À QUENTE EM USINAS	25
2.1.1. Gestão de Estoque e Beneficiamento do RAP	32
2.1.2. Métodos de Inserção de RAP em Usinas para Misturas Asfálticas à quente	34
2.1.2.1. Usinas Gravimétricas	36
2.1.2.2. Usinas Volumétricas	41
2.1.3. Limitações do Uso de RAP em Misturas Asfálticas Recicladas à quente	46
2.1.3.1. Superaquecimento do RAP	46
2.1.3.2. Envelhecimento do Ligante Asfáltico Presente no RAP	46
2.1.3.3. Heterogeneidade do RAP	47
2.1.3.4. Reativação do Ligante Asfáltico do RAP	48
2.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS	49
2.3. PROPRIEDADES DE SENSIBILIDADE À ÁGUA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS	53
3. METODOLOGIA DA PESQUISA	55
3.1. PLANEJAMENTO DA PESQUISA	55
3.2. COLETA DE MATERIAIS E LOCAL DO ESTUDO	56
3.3. DOSAGEM DAS MISTURAS RECICLADAS À QUENTE	64
3.4. ADAPTAÇÃO DA USINA E COLETA DE AMOSTRAS	67
3.5. PROCESSO DE PREPARO E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA	71
3.6. ENSAIOS LABORATORIAIS PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS	74
3.6.1. Ensaio de Deformabilidade	74
3.6.1.1. Módulo de Resiliência	74
3.6.1.2. Módulo Complexo	76
3.6.2. Ensaio de Adesividade/Coesão	79
3.6.2.1. Desgaste por Abrasão (Cântabro)	79
3.6.2.2. Dano por Umidade Induzida (Lotmann Modificado)	80
3.6.3. Ensaio de Danificação das Misturas	82
3.6.3.1. Flow Number	82

3.6.3.2.	Resistência a Tração por Compressão Diametral	84
3.6.3.3.	Fadiga a Tração-Compressão (Ensaio Uniaxial Cíclico)	85
4.	ANÁLISE DE RESULTADOS	87
4.1.	PROCEDIMENTOS DE CAMPO	87
4.1.1.	BENEFICIAMENTO, ESTOCAGEM DO RAP E PREPARO DA USINA	87
4.1.2.	CONTROLE TECNOLÓGICO DAS AMOSTRAS USINADAS	93
4.2.	ENSAIOS LABORATORIAIS PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS	98
4.2.1.	Ensaios de Deformabilidade	98
4.2.1.1.	Módulo de Resiliência.....	98
4.2.1.2.	Módulo Complexo.....	101
4.2.2.	Ensaios de Adesão/Coesão	112
4.2.2.1.	Desgaste por Abrasão (Cântabro).....	112
4.2.2.2.	Dano por Umidade Induzida (Lotmann Modificado)	114
4.2.3.	Ensaios de Danificação nas Misturas	118
4.2.3.1.	Flow Number	118
4.2.3.2.	Resistência a Tração por Compressão Diametral	122
4.2.3.3.	Fadiga a Tração-Compressão (Ensaio Uniaxial Cíclico)	125
4.2.4.	Viabilidade econômica das estruturas propostas.....	144
5.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	148
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	150
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151
	APÊNDICE A – DADOS BRUTOS DO MÓDULO COMPLEXO	160
	APÊNDICE B – CURVAS ISOTERMAS E ISÓCRONAS MÓDULO DINÂMICO E ÂNGULO DE FASE.....	164
	APÊNDICE C – CURVAS ESPAÇO COLE-COLE, DIAGRAMA BLACK E MESTRAS	168
	APÊNDICE D – GRÁFICOS TÉRMICOS DA EVOLUÇÃO DE DANO NAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO	176

1. INTRODUÇÃO

De modo geral, os pavimentos asfálticos brasileiros vêm apresentando deficiências funcionais e estruturais com o crescimento constante do tráfego de veículos comerciais nas rodovias ao longo dos anos. Assim, a necessidade de conservação rotineira se torna indispensável para a manutenção do pavimento e da garantia da segurança e conforto aos usuários das rodovias. Ademais, a precariedade da malha rodoviária nacional aliada ao pouco recurso financeiro despendido para os serviços levanta a possibilidade de soluções alternativas de manutenção e construção de novos pavimentos.

A Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2018), em uma análise histórica de 2004 a 2018, avaliou 100% das rodovias federais brasileiras e constatou que estas melhoraram em 23 pontos percentuais, saindo de 18,7% com classificação ótimo ou bom, em 2004, para 41,6%, em 2018. Mesmo com esta ascensão, 48,5% das rodovias não apresentam condições adequadas e, em 2018, cerca de 32 mil quilômetros ainda apresentavam deficiências no pavimento, na sinalização e na geometria. Segundo o mesmo levantamento, estes problemas ainda podem causar, além do comprometimento da segurança e impactos negativos ao meio ambiente, o aumento do custo operacional da rodovia em até 97% quando o seu estado é considerado péssimo. Rocha *et al.* (2016) relata que não será possível superar as carências no Brasil, em infraestrutura viária, e é muito difícil atender a toda a demanda existente de novas construções, sem considerar o uso racional de materiais reciclados.

A promoção do uso de fontes energéticas renováveis, reforma de setores de energia e transportes, limitação de emissões de gases poluentes e a proteção do meio ambiente em geral são políticas adotadas no Protocolo de Kyoto (1997) e reafirmadas no Acordo de Paris (2015), as quais, direcionam os setores produtivos dos principais países ao redor do mundo a manter a sustentabilidade ambiental para estas e próximas gerações. Alinhado a esta preocupação com os danos causados ao meio ambiente, o setor da pavimentação avança tecnologicamente destacando-se em pesquisas relacionadas a possibilidade da redução ou mitigação destes impactos.

A engenharia de pavimentação rodoviária busca, constantemente, soluções para a redução do consumo de insumos na pavimentação, aliando aos critérios técnicos necessários, o controle de custos na aquisição, produção e aplicação de novas misturas asfálticas e as políticas de sustentabilidade viáveis para a correta

destinação e utilização dos resíduos gerados. Surgem, a partir disto, alternativas diferenciadas com a possibilidade de abranger todas as necessidades produzidas na construção, manutenção e operação de rodovias. Entre as soluções propostas, a reciclagem de pavimentos é evidenciada pela possibilidade de aliar a redução de custos e impactos nocivos ao meio sem que a qualidade técnica do produto final seja prejudicada.

A técnica de reciclagem de pavimentos, que é bastante antiga, surgiu para a resolução de problemas de ordem econômica. Devido ao grande apelo ambiental por reutilização de materiais e redução de consumo de combustíveis, na década de 90 aconteceu o renascimento da técnica. A Agência Nacional de Petróleo e Gás (ANP), que anualmente levanta dados de preços de aquisição de materiais asfálticos, verificaram que os aumentos sucessivos, os quais entre setembro de 2017 e o mesmo mês de 2018 chegaram a, aproximadamente, 45%, tornaram o fator econômico, novamente, de elevada importância, o que faz com que a técnica de reciclagem volte a ser encarada como uma forte alternativa às soluções tradicionais de reabilitação de pavimentos flexíveis degradados, uma vez que a reciclagem de pavimentos é, regra geral, mais econômica do que um reforço com uma mistura tradicional (CUNHA, 2010).

Esta técnica consiste, principalmente, na reutilização de material fresado (do inglês - Reclaimed Asphalt Pavement – RAP), originário, geralmente, de serviços de conservação e manutenção de revestimento, em novas camadas do pavimento e o foco da indústria no exterior tem sido colocar uma maior quantidade de RAP nas novas misturas (HUANG *et al.*, 2005). Os estudos avançam e as porcentagens de incorporação de RAP em novas misturas são cada vez maiores, gerando a necessidade de inovação tecnológica e pesquisas diferenciadas no que tange, não apenas as condições técnicas exigidas para a rodovia, mas também ao cuidado logístico de estoque e beneficiamento de RAP ao longo de rodovias e em pátios de usinas, assim como as condições ambientais relacionadas.

Nas pesquisas e na prática relacionadas às misturas asfálticas recicladas, o teor incorporado cerca os 40% de RAP, sendo já considerado um alto teor, pois ainda podem existir deficiências a serem exploradas como é o caso do envelhecimento do ligante asfáltico presente no fresado, durante, principalmente, a fase de usinagem das misturas. Por outro lado, a necessidade da reutilização destes materiais e a busca ininterrupta por inovações tecnológicas traz ao setor rodoviário beneficiadores de RAP

e usinas capazes de reciclar por completo o material fresado oriundo dos serviços de pavimentação, como em casos já registrados em território europeu e nos Estados Unidos (ZAUMANIS *et al.*, 2014).

Salienta-se a importância do tema exposto e é indispensável a continuação de pesquisas no âmbito do setor de engenharia de pavimentação no Brasil, avaliando as características técnicas do produto resultante da reciclagem, a reutilização de materiais provenientes da conservação e manutenção de rodovias deterioradas, a possibilidade da redução da inserção de materiais asfálticos novos e agregados virgens em novas misturas, a redução da emissão de gases bem como o menor consumo de combustíveis.

1.1. OBJETIVO GERAL

Adaptar usina volumétrica e produzir misturas asfálticas recicladas à quente avaliando o seu comportamento quanto à influência do percentual de material fresado, do peneiramento RAP e o processo de usinagem utilizado nas características mecânicas das misturas.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterizar o material fresado recolhido bem como o tipo de CAP existente;
- b) Implementar um processo simples de beneficiamento e inserção de material fresado na usina volumétrica, visando manter as características técnicas do produto final;
- c) Caracterizar o comportamento das misturas asfálticas recicladas à quente quanto a resistência, deformabilidade, adesão e coesão, bem como o desempenho a fadiga;
- d) Avaliar economicamente a possibilidade da implantação das misturas produzidas em estruturas de pavimento propostas.

1.3. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No capítulo 1 é apresentada uma introdução referente ao tema de reciclagem a quente de misturas asfálticas, as justificativas e motivações para a realização desta pesquisa, bem como os objetivos propostos.

O referencial teórico dos temas é exposto no Capítulo 2, explanando sobre os serviços necessários ao gerenciamento do RAP, os principais métodos de inserção de RAP em usinas, as limitações que são intrínsecos a estes processos e os utilizados para a caracterização de misturas recicladas a quente.

O Capítulo 3 aborda as etapas realizadas em campo e laboratório desta pesquisa, descrevendo o modo de coleta e caracterização do material fresado, o beneficiamento do RAP, o processo de adaptação da usina, as metodologias de ensaios utilizadas e a proposta de avaliação de viabilidade econômica das estruturas propostas.

No Capítulo 4 estão os resultados dos procedimentos realizados em campo e dos ensaios laboratoriais e as análises referentes. Ainda, a conclusão da avaliação da viabilidade econômica.

No Capítulo 5, por fim, estão descritas as considerações finais destacando-se as principais conclusões deste trabalho, bem como as proposições de temas relacionados a pesquisas futuras.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo retoma a assuntos referentes às misturas asfálticas recicladas. Inicialmente, aborda-se as principais utilizações do material fresado (RAP), bem como suas limitações e as técnicas de reciclagem de pavimentos utilizadas. Apresenta-se, também, os principais métodos de inserção de RAP em usinas de concreto asfáltico, quando da reciclagem à quente nestes equipamentos, tanto em usinas gravimétricas quanto em volumétricas.

2.1. RECICLAGEM À QUENTE EM USINAS

A técnica de reciclagem de pavimentos, que é estudada a mais de cem anos, teve seu uso estabelecido a partir do final da década de 1970, após os preços de ligante asfáltico subirem exponencialmente devido ao embargo de fornecimento de petróleo pelos países árabes e membros da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP). A partir deste momento, departamentos de transportes e a indústria da pavimentação iniciaram o desenvolvimento de métodos e processos de reciclagem que se tornaram rotina de reabilitação de pavimentos em alguns países (WEST *et al.*, 2013). Com um novo aumento dos preços do petróleo em 2008 e a necessidade de soluções para proteger o meio ambiente, diversos países voltaram a concentrar esforços para aprimorar as técnicas de reciclagem de materiais para a pavimentação.

A economia de agregados, espaços para descargas de materiais, redução do consumo de energia e gases do efeito estufa, são resultados do processo de reciclagem de pavimentos. Os materiais de pavimentação, quando livres de alcatrão ou fibras de amianto, são considerados inertes e tem a possibilidade de reciclagem. Cabe aqui salientar que os ensaios para a determinação da indicação destes materiais são realizados apenas em caso de suspeita, pois os mesmos representam custos adicionais e tempo de resposta elevado (BROSSEAUD, 2011).

O pavimento sofre, ao passar dos anos sob a ação de tráfego crescente e clima desfavorável, degradação funcional bem como a perda da sua capacidade estrutural. Para a restauração estrutural do pavimento asfáltico, há a necessidade de colocação de espessuras adicionais de camadas ou, ainda, o corte total ou parcial do

revestimento deteriorado - com auxílio de fresadora - e execução de nova camada (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O Manual de Restauração de Pavimentos do Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre (DNIT, 2006), descreve a técnica de reciclagem de pavimentos como solução de problemas estruturais além de oferecer inúmeras vantagens quando comparado ao uso convencional de materiais virgens.

Para o processo de reutilização de misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas para a produção de novas misturas, a técnica de reciclagem de pavimentos reaproveita os agregados e ligantes remanescentes, oriundos da fresagem, com a adição de agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, cimento asfáltico de petróleo (CAP) ou emulsões asfálticas novas, se necessário e, ainda a adição de aglomerantes hidráulicos (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A realização do serviço de reciclagem de pavimentos está diretamente ligada à economia de recursos e ao cuidado ambiental proposto pela técnica. Torna-se importante pela diminuição da utilização de agregados virgens e da quantidade de ligante asfáltico novo necessário na produção de misturas asfálticas. Além destes, pode-se citar a economia de energia e dos custos de transporte necessários para obter agregados virgens de qualidade e propõe a preservação dos recursos naturais. No CAP remanescente do fresado há a necessidade de cuidados, pois o processo de aquecimento na usinagem propicia a oxidação e volatilização do ligante, o que pode ocasionar a perda da capacidade de suas propriedades originais. Estas podem ser reestabelecidas pela utilização de ligantes novos e/ou a adição de agente rejuvenescedor.

Além dos benefícios citados anteriormente, é possível reduzir a quantidade de resíduos de construção depositada em aterros. A reciclagem de pavimentos aperfeiçoa o uso de recursos naturais e providencia à indústria da construção de pavimentos uma sustentabilidade adequada. Deste modo, nota-se que a reciclagem de pavimentos asfálticos proporciona a menor utilização de espaço em aterros sanitários e, ainda, a possibilidade de economia dos custos de transportes (FHWA, 1996). Por outro lado, no Brasil, a reutilização do material fresado é realizada de maneira menos nobre, ou seja, em camadas de aterros de pavimentação, rodovias municipais de baixo volume de tráfego – sem nenhum tipo de beneficiamento –, acessos de lindeiros a rodovias, bem como operações tapa-buraco em rodovias municipais e rurais.

Segundo Brosseau (2011), há uma gama de técnicas de reciclagem utilizando o RAP, podendo ser à quente (HMA, do inglês Hot Mix Asphalt), a frio ou morna (WMA, do inglês Warm Mix Asphalt), em usina ou in loco a frio (com ligante hidráulico, emulsão, espuma ou ainda mista), onde a escolha da técnica dependerá da natureza do material a ser reutilizado, do seu modo de tratamento e da destinação final do produto.

A reciclagem à quente pode ser realizada tanto em usinas gravimétricas (por batelada – tipo intermitente), bem como nas centrais volumétricas. A segunda citada é a mais utilizada, mas ainda é necessária a adaptação destas para incorporação do RAP em novas misturas asfálticas para que o mesmo não sofra aquecimento direto pela chama do secador, quando do processo de secagem dos materiais agregados, mantendo as características técnicas esperadas no seu comportamento.

Segundo o Asphalt Institute (1986), este método de reciclagem pode ser definido como um processo que o material recuperado proveniente do pavimento asfáltico deteriorado (RAP) é combinado com um novo ligante asfáltico (com ou sem utilização de agente rejuvenescedor) e/ou agregados virgens – de acordo com a necessidade – para a produção e distribuição de novas misturas asfálticas que atendam às especificações vigentes (Figura 1).

Figura 1 – Esquema de reciclagem à quente em usinas



Fonte: Adaptado de Baptista (2006).

No Brasil, a norma DNIT – ES 033/2005 estabelece diretrizes para a produção de concreto asfáltico reciclado à quente em usinas. O resultado da produção destas misturas asfálticas deve atender às especificações técnicas direcionadas as camadas convencionais de pavimento, como base, “binder” ou a de rolamento. Os métodos de aplicação em campo são semelhantes as utilizadas para misturas asfálticas convencionais.

Algumas vantagens podem ser destacadas na reciclagem à quente em usinas quando comparadas aos outros métodos de reciclagem, entre elas estão o reaproveitamento tanto dos agregados quanto do ligante asfáltico que permanece no RAP, a correção de possíveis erros de dosagem do projeto inicial da mistura, a reciclagem da espessura total da camada de revestimento e a possibilidade de análise laboratorial dos materiais após remoção da camada (SUZUKI, 2019).

O manual de restauração do DNIT (2006) define este processo no qual uma parte ou toda a estrutura do pavimento é removida e reduzida, normalmente, através de fresagem a frio. Após a retirada da camada deteriorada do trecho é realizado o transporte para o processo de mistura e recuperação na usina de asfalto. O mesmo manual demonstra uma sequência de serviços para o desenvolvimento de misturas recicladas à quente em usina e as etapas citadas podem ser observadas abaixo:

- Primeira etapa: Preparação do Material

Na preparação do material se insere a remoção do pavimento asfáltico existente e após a fragmentação do material até o tamanho adequado/desejado. As duas opções que têm sido mais utilizadas para a redução do tamanho do RAP são a no próprio campo e nas instalações de britagem da própria usina. Na pista, os equipamentos utilizados são os convencionais (tratores de esteira, motoniveladoras e carregadeiras) que escarificam e carregam o pavimento a ser reciclado ou, ainda, que é mais utilizada, as fresadoras a frio.

Estas máquinas foram desenvolvidas para remoção de camadas a espessuras controladas e a produção de um material com determinado tamanho em uma única operação. A Figura 2 ilustra fresadoras a frio em operação.

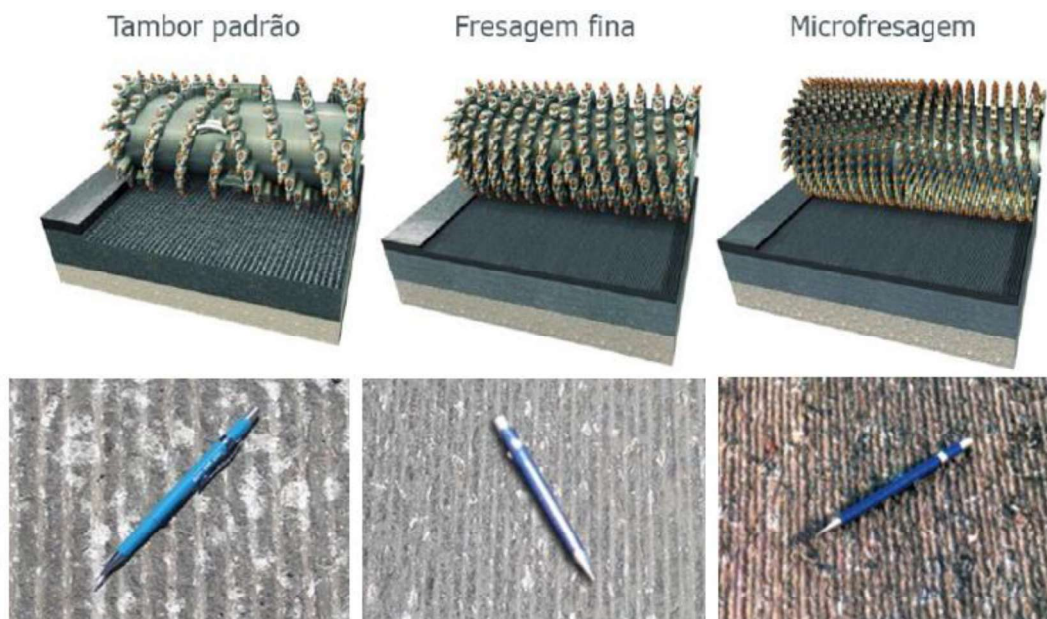
Figura 2 – Fresadora realizando de remoção da camada asfáltica



Fonte: Bonfim, 2016.

O tamanho das partículas removidas e a rugosidade resultante (Figura 3) na pista depende da espessura de corte, da direção de rotação do cilindro fresador, da velocidade de rotação do cilindro, da quantidade e espaçamento entre dentes, além da velocidade de operação. Este tamanho de partícula gerada a partir da fresagem a frio se torna importante no momento da realização das misturas recicladas em usinas, condicionando não apenas a qualidade final do produto, mas também a capacidade produtiva associada.

Figura 3 – Diferentes texturas após fresagem de pavimentos



Fonte: adaptado de Bonfim, 2016.

A diminuição de tamanhos do RAP pode também ser realizada por equipamentos de britagem e peneiramento, fixos ou portáteis. Normalmente, o RAP é rompido e fragmentado antes do carregamento, para ser recebido no britador primário. A Figura 4 expõe um novo modelo de uma nova tecnologia para britagem e separação de material fresado, a qual tritura e realiza o peneiramento do RAP que propicia a reutilização de praticamente 100% do material fresado.

A crescente utilização de fresadoras a frio tem aumentado os volumes de RAP disponíveis e, a necessidade por reciclagem cresce no mesmo ritmo. Deve-se ter atenção às diferentes origens do material ou se estes serão estocados em mesmas pilhas, o que pode ocasionar alterações prejudiciais nas características técnicas da mistura asfáltica final.

Figura 4 – Granulador Benninghoven MBRG 2000



Fonte: adaptado de Wirtgen Group, 2018.

- Segunda etapa: Avaliação dos Estoques

O material estocado precisa ter suas características conhecidas e deve-se tomar alguns cuidados como: ter o conhecimento se o material a ser utilizado é homogêneo, se o RAP foi classificado em pilhas separadas e, ainda se há, em caso de materiais diferentes em mesma pilha, critério para uniformemente misturar os materiais.

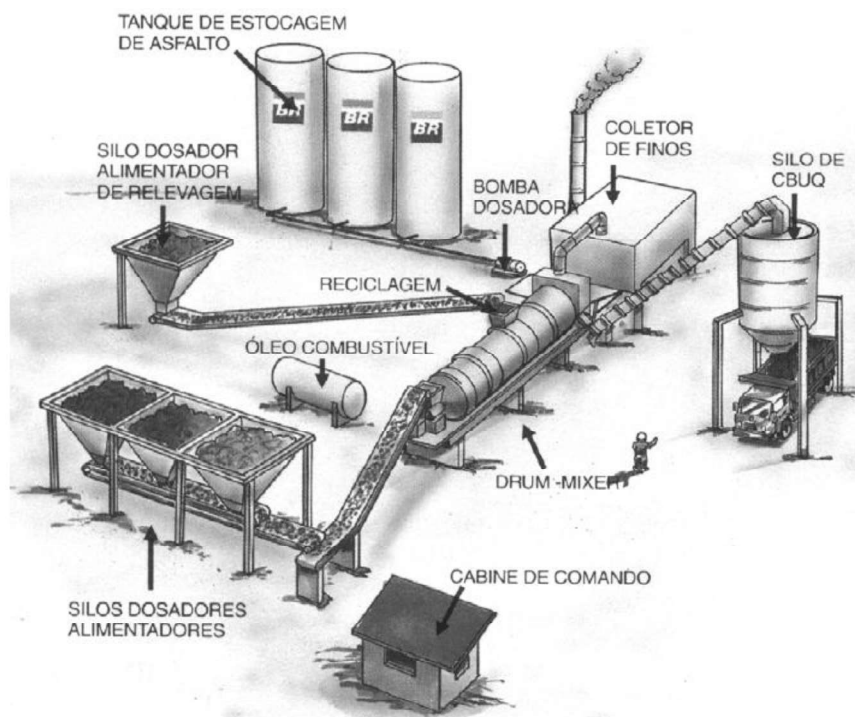
Quando o RAP é proveniente de mesma fonte, a amostragem destes são similares as de amostragem de agregados virgens britados. O manuseio do material estocado contribui com as possíveis variações das misturas asfálticas recicladas à

quente, posteriormente. Se os RAP's tiverem fontes diferentes, deve-se tomar cuidados com a utilização de uma única pilha e, ainda se existir uma grande quantidade de misturas com emulsão.

- Terceira etapa: usinagem à quente

As misturas recicladas à quente em usinas necessitam de modificações no processo das convencionais. O objetivo destas modificações é o aquecimento da mistura asfáltica sem expor o RAP diretamente a chama do secador, o que pode sobreaquecer e enrijecer o ligante asfáltico remanescente contido no material fresado, bem como produzir mais gases prejudiciais ao meio. Na produção da mistura asfáltica, podem ser utilizadas usinas tanto gravimétricas quanto volumétricas, cada um com os seus métodos de introdução de RAP e limitações quanto à operação e processo de mistura. Os fabricantes de usinas de asfalto vêm produzindo usinas projetadas para a reciclagem e, em usinas mais novas, apresentam aperfeiçoamentos que eliminam os problemas de poluição e aumentam a eficiência do processo de reciclagem. A Figura 5 ilustra um exemplo de usina para reciclagem de misturas asfálticas à quente.

Figura 5 – Croqui de usina para reciclagem à quente



- Quarta etapa: lançamento e compactação

A mistura será lançada e compactada como um concreto asfáltico convencional, usando os procedimentos e equipamentos convencionais, com vibroacabadoras e rolos compactadores.

2.1.1. Gestão de Estoque e Beneficiamento do RAP

A capacidade produtiva bem como a qualidade do produto final nas usinas adaptadas para misturas recicladas asfálticas à quente passa pela qualidade da gestão e beneficiamento do estoque de material fresado a utilizar, devendo este ser tratado como um material muito nobre.

A gestão ineficiente das pilhas de RAP é uma das principais razões pelas quais os órgãos reguladores ainda são resistentes com o aumento de percentuais de RAP a serem incorporados nas misturas. Alguns órgãos reguladores dos EUA, permitem apenas RAP de projetos conhecidos e de autoria do próprio órgão. Estes fresados de projetos das próprias agências são denominados de “RAPs classificados”, enquanto, os de natureza não totalmente conhecida são chamados de RAPs “não classificados”, ou seja, que foram combinados e misturados em uma mesma pilha em pequenos projetos (WEST, 2010; ZUBARAN, 2014).

É muito importante que o RAP oriundo dos serviços de fresagem a frio deva ser mantido em estoques livres de contaminantes, pois a qualidade do RAP está diretamente relacionada a manutenção das pilhas de RAP livres de sujeira, lixo ou vegetação. Colaboradores e motoristas devem ser instruídos para que, desde o carregamento e transporte até a descarga do material fresado, a homogeneidade e integridade do RAP sejam mantidos, tomando cuidados como a limpeza de caminhões, o correto local de descarregamento e o controle de impurezas gerados no momento da fresagem e coleta. Além disto, após a estocagem do RAP é necessária a verificação de agentes nocivos e, se caso encontrado, deve o mais breve possível ser retirado.

Segundo NAPA (2015), no gerenciamento de estoques de material fresado uma das primeiras decisões a se tomar é se deve ser colocado ou não o RAP proveniente de várias fontes em uma mesma pilha ou realizar a separação inicial destes. Isto pode depender dos fatores abaixo:

- Componentes no RAP, como especial classes de agregado, escória de aço ou asfalto borracha, que garante o manuseio do material separadamente de outras fontes;
- Se órgãos reguladores permitem a utilização de diferentes fontes de RAP e se exigem estoques cativos ou permitem reabastecimento contínuo de estoques;
- Espaço disponível na usina para processamento e estocagem do RAP;
- As porcentagens de RAP a serem reutilizadas nas novas misturas;
- RAP de um único projeto.

De acordo com West *et al.* (2009), um fator importante para o aumento de taxa de incorporação de RAP em misturas asfálticas é o percentual de agregado miúdo contido no material fresado. Uma forma eficaz de beneficiamento do RAP é o seu destorroamento e peneiramento, tendendo a homogeneizar as pilhas de diferentes fontes granulométricas de RAP. Este fracionamento, geralmente, é realizado em duas ou três peneiras, o que flexibiliza o enquadramento deste material nas faixas granulométricas das especificações dos órgãos rodoviários. A Figura 6 demonstra o processo de separação em frações e armazenamento do RAP.

Figura 6 – Processo de separação de frações (a) e o armazenamento do RAP (b)



Fonte: adaptado de NAPA, 2015.

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. Isto se dá pela quebra dos agregados presentes no RAP, originando graduações mais finas do que o revestimento final que foi fresado (ESTAKHRI *et al.*,

1999). A caracterização e o manuseio correto de pilhas são indispensáveis para evitar misturas muito heterogêneas.

Análises em amostras de RAP demonstram uma grande variabilidade para teores de ligante e composição granulométrica, mais intensificada quando das frações graúdas do material. Assim, de acordo com Valdés *et al.* (2011), a separação das frações possibilita um maior percentual de material fresado e reduz a variabilidade das misturas.

2.1.2. Métodos de Inserção de RAP em Usinas para Misturas Asfálticas à quente

As misturas asfálticas recicladas à quente em usinas podem ser produzidas tanto em centrais gravimétricas (por batelada) quanto em volumétricas (contínuas) (ARRA, 1997). A porcentagem em peso de material fresado a ser inserido na mistura está diretamente ligada à tecnologia do processo de inserção de RAP na usina, o qual se define pelo tipo de transferência de calor recebido durante o processo de mistura (SUZUKI, 2019).

Segundo NAPA (1996) os principais tipos de transferência de calor podem ser descritos como: por condução, quando materiais de diferentes temperaturas se tocam e por convecção, onde partículas sólidas são expostas a correntes de gases quentes. Dependendo do método de transferência de calor a ser utilizado e quanto maior o percentual de RAP pretendido na mistura, mais detalhada deve ser a implementação da usina, pois a exposição do RAP a altas temperaturas e/ou a chama direta do secador podem ocasionar danos à estrutura da mistura final.

As usinas devem garantir precisão quando da incorporação de RAP nas misturas asfálticas. No sistema de entrada de RAP realizada a frio nas usinas, quando é necessário o superaquecimento de agregados virgens como processo de transferência de calor, é de fundamental relevância que o RAP e agregados tenham um baixo teor de umidade (FHWA, 2011).

Na Tabela 1 estão indicadas as temperaturas necessárias para o aquecimento dos agregados em função da porcentagem de RAP presente na mistura asfáltica, a temperatura final desejada e a umidade de entrada dos agregados virgens e do material fresado.

Inicialmente, as principais preocupações quanto a utilização de RAP em misturas asfálticas eram quanto à manutenção das características técnicas e as

propriedades estruturais da mistura final. Após o estabelecimento e confiabilidade destas condições, a indústria voltou-se às questões ambientais. Muitas abordagens apresentaram diferentes níveis de emissão de hidrocarbonetos e poeiras, as quais levaram ao desenvolvimento de novas tecnologias de secagem e processamento (NAPA, 1996).

Tabela 1 – Temperatura de aquecimento de agregados em função da % de RAP, % de umidade e temperatura final de mistura desejada

Teor RAP	Umidade RAP (%)	Temperatura Final Mistura Reciclada (°C)				
		104	116	127	138	165
10%	0	121	138	152	163	198
	1	127	143	154	168	202
	2	132	146	157	171	202
	3	138	149	163	174	204
	4	141	152	166	177	207
	5	143	157	168	182	213
20%	0	138	154	168	182	219
	1	146	160	177	191	228
	2	154	168	182	196	230
	3	163	177	191	204	238
	4	171	185	199	213	247
	5	179	193	207	221	255
30%	0	157	174	191	207	248
	1	168	185	202	218	259
	2	182	199	216	232	273
	3	196	213	229	246	287
	4	210	227	243	260	301
	5	224	241	257	274	315
40%	0	179	199	218	238	284
	1	199	218	238	257	303
	2	218	238	257	277	323
	3	243	260	279	299	343
	4	260	279	299	321	368
	5	285	302	321	341	385
50%	0	210	235	257	282	338
	1	241	268	288	310	365
	2	271	293	318	343	399
	3	302	327	349	374	430
	4	338	360	379	404	454
	5	366	391	413	438	494

Fonte: adaptado de NAPA, 1996.

As diferentes transmissões de calor exigidas para percentuais maiores ou menores de RAP, o controle de emissões de hidrocarbonetos e poeira distinguem o processo necessário de implementação de equipamentos em usinas para inserção de

material fresado em uma mistura de concreto asfáltico. Na Tabela 2 estão os valores de taxa de reciclagem máxima em função do modo de usinagem, encontrados por Baptista (2006), em misturas aplicadas em trechos experimentais em central descontínua utilizando o método de entrada de material fresado a frio.

Tabela 2 – Taxa de reciclagem (TR) máxima em função do tipo de usina

Tipo de central/método	TR
Descontínua (método a frio)	≤ 40%
Descontínua (método à quente)	≤ 70%
Descontínua (método recyclean)	≤ 35%
Contínua de fluxo paralelo	≤ 35%
Contínua de contrafluxo	≤ 50%
Contínua de tambor duplo	≤ 50%

Fonte: Adaptado de Baptista, 2006.

2.1.2.1. Usinas Gravimétricas

Este tipo de usina é conhecido pelo controle das bateladas das misturas asfálticas por pesagem. Os silos frios são os armazenadores e medidores da quantidade de agregado virgem, o qual passa por um processo de aquecimento e secagem utilizando-se de energia provida de um queimador. Este material é inserido em um tambor-secador do lado oposto ao do queimador, deslocando-se no sentido contrário ao da chama, denominando este processo de contra fluxo.

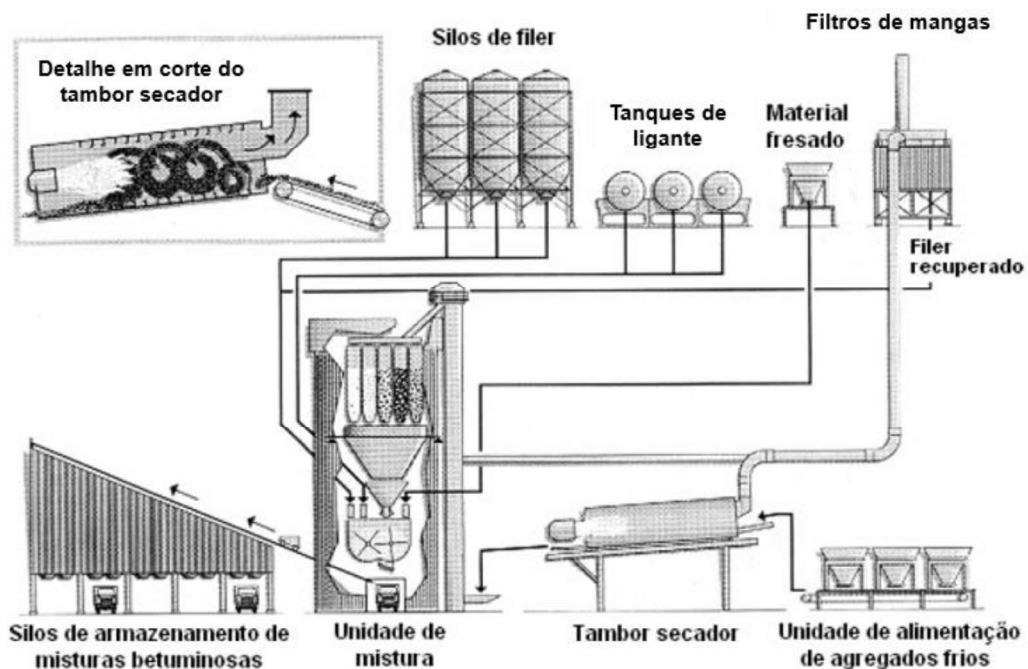
Ao passar pelo secador, é extraída a umidade do material agregado virgem e um elevador do tipo caneca transporta o agregado quente e seco até a parte superior da torre de dosagem, onde há um conjunto de peneiras vibratórias para a sua classificação granulométrica. O material é classificado conforme o tamanho das frações de agregado e é armazenado nos silos quentes. De acordo com o projeto inicial de mistura é realizada a dosagem nas peneiras destes silos, que garantem a fração desejada de cada material através de pesagem individual. O CAP (cimento asfáltico de petróleo) é armazenado em tanques externos a usina e é levado por uma tubulação até uma “balança de asfalto”, na qual é realizada a pesagem estática do material. Após a inserção de agregados e ligante asfáltico no misturador, o ciclo de mistura é iniciado, dependendo do tipo de usina agregado e ligante, acontece em torno de 40 a 60 segundos (CIBER, 2012).

Neste tipo de usina são quatro as variantes da reciclagem, podendo o RAP ser introduzido a frio junto com agregados dentro do secador ou diretamente no misturador ou, ainda, ser aquecido previamente ou em conjunto com agregados antes da entrada no misturador, quando do objetivo de maiores taxas de inserção de RAP na mistura (BAPTISTA, 2006).

Segundo EAPA (2005), nos primeiros dois casos, quando o RAP não é aquecido, os agregados necessitam de superaquecimento para uma temperatura final adequada de mistura, geralmente, impossibilitando a introdução de valores maiores que 30% de RAP. Por outro lado, quando este é aquecido, podem-se atingir 70%, no primeiro caso e 35%, no segundo.

Quando o material fresado é inserido a frio diretamente no misturador, existe um armazenamento intermediário dos agregados aquecidos, assegurado através de silos localizados acima da unidade de mistura, correspondendo cada silo a uma determinada fração granulométrica. O Departamento de Transportes de Minnessota foi o primeiro a desenvolver um modelo de misturador para misturas asfálticas recicladas, em Maplewood. Ficou conhecido como “Minnesota Method” e conseguiu comprovar a alta qualidade de misturas produzidas com material fresado (ARRA, 1997). A Figura 7 ilustra a adição do RAP no misturador de uma usina gravimétrica.

Figura 7 – Esquema de entrada de RAP em misturador de usina gravimétrica

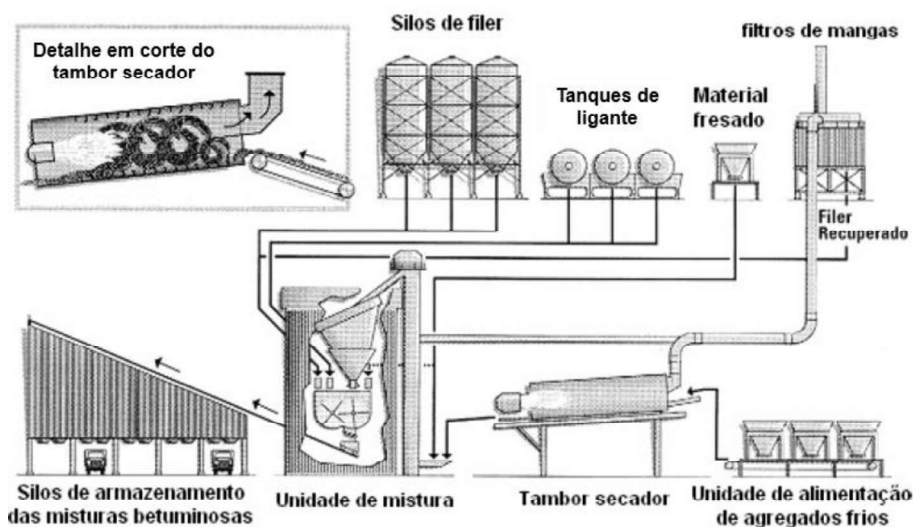


NAPA (1996) descreve esta técnica como a passagem do RAP (como um material adicional) por um funil de pesagem e a troca de calor ocorre por condução com os materiais virgens superaquecidos na unidade de pesagem dos silos quentes e ao longo do misturador. O percentual de RAP inserido nesta configuração normalmente não ultrapassa 25 a 30%, pois se a umidade dos materiais variar de 3 a 5% há a necessidade de aquecimento maior que o indicado, em função da eficiência do secador.

Na configuração de entrada de RAP a frio no elevador, o material fresado é inserido na entrada inferior do elevador e é misturado com os agregados virgens superaquecidos conforme estes saem do secador e entram no elevador. O RAP pode ainda ser adicionado em um segundo elevador.

Este método permite a incorporação de, normalmente, 10 a 30% de material fresado, pois o tempo de transporte do fresado no elevador é rápido e este necessita estar seco antes da passagem nas telas, podendo, do contrário, causar o seu entupimento e a segregação das misturas (INIR, 2009). A Figura 8 apresenta a entrada do RAP na parte inferior do elevador de uma usina gravimétrica.

Figura 8 – Esquema de entrada de RAP em elevador de usina gravimétrica



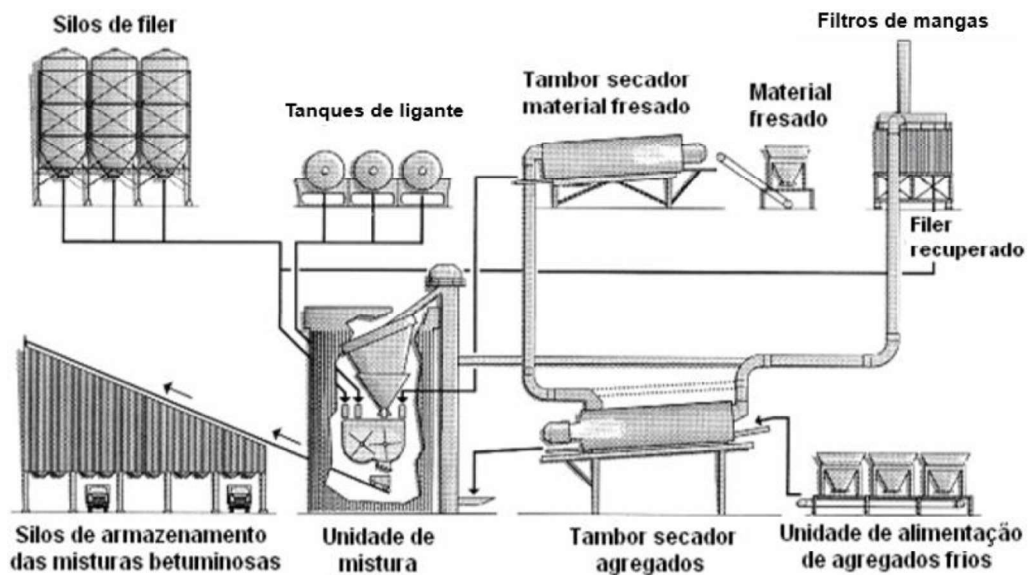
Fonte: Adaptado de EAPA, 2005.

Nos métodos de inserção a frio de material reciclado em usinas podem ter alguns inconvenientes em função do superaquecimento dos agregados, como os

gases de combustão acima de 230°C podem inutilizar as mangas dos filtros bem como a formação de nuvens de vapor no misturador, quando a umidade do RAP é elevada.

Para a utilização de percentuais maiores que 30%, alguns métodos de incorporação de material fresado em usinas foram desenvolvidos, nos quais o material é aquecido anteriormente ao processamento da mistura. No método proposto na Figura 9, onde o material fresado é pré-aquecido em tambor paralelo, o RAP é aquecido por convecção, gerando gases com vapor e hidrocarbonetos. Estes são encaminhados e reaproveitados no secador de agregados virgens. O RAP é transportado e armazenado em um silo quente próprio onde é pesado separadamente e, posteriormente, é destinado ao misturador. As variações de umidade e oxigênio presentes no aquecedor do RAP dificultam o controle do sistema, mas misturas de 30 a 40% de RAP já são utilizadas, podendo chegar aos 50% (ARRA, 1997).

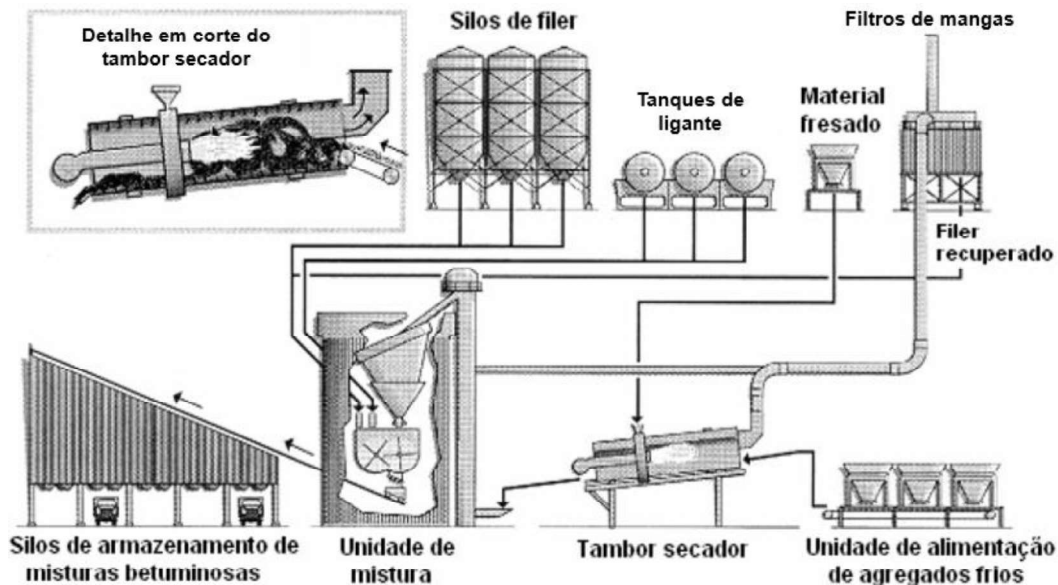
Figura 9 – Esquema de entrada de RAP em tambor secador paralelo



Fonte: Adaptado de EAPA, 2005.

Outro método que beneficia a produção de misturas recicladas em usinas gravimétricas parte do princípio de implementação de um anel de reciclagem externo ao tambor de aquecimento dos agregados virgens, conforme detalhado na Figura 10. Deste modo minimiza-se o superaquecimento do RAP e o seu aquecimento é realizado atrás da chama, o qual se consegue pelo contato com os agregados novos aquecidos pelos gases de combustão dentro do tambor secador. Com este sistema, pode-se reutilizar em torno de 35% de RAP (GOMES, 2005).

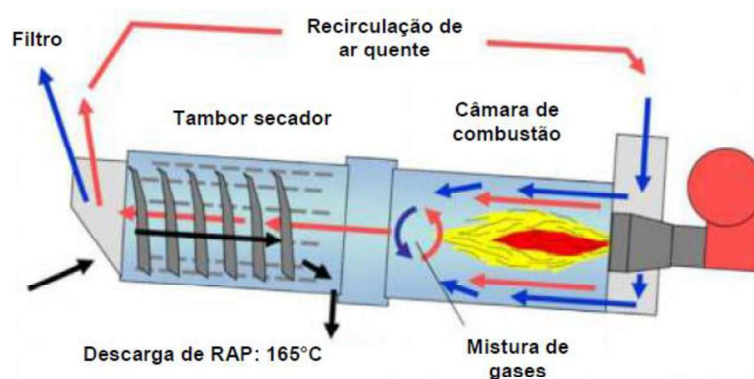
Figura 10 – Esquema de entrada de RAP em anel no secador da usina gravimétrica



Fonte: Adaptado de EAPA, 2005.

Usinas gravimétricas estão sendo inovadas para utilização de até 100% de RAP. Para isto, no tambor secador, o RAP não pode ter contato direto com a chama do secador, o que acontece no tipo contra fluxo de duas fases. A fase de aquecimento e secagem do tambor gira enquanto que é estática a câmara de combustão. O processo de aquecimento do RAP é feito por ar quente e antes do contato com a chama este é descarregado, permitindo a redução de emissões e amenizando o envelhecimento do ligante asfáltico presente no RAP (ZAUMANIS *et al.*, 2014). A Figura 11 detalha funcionamento do tambor secador para 100% RAP.

Figura 11 – Funcionamento de tambor secador para 100% de RAP



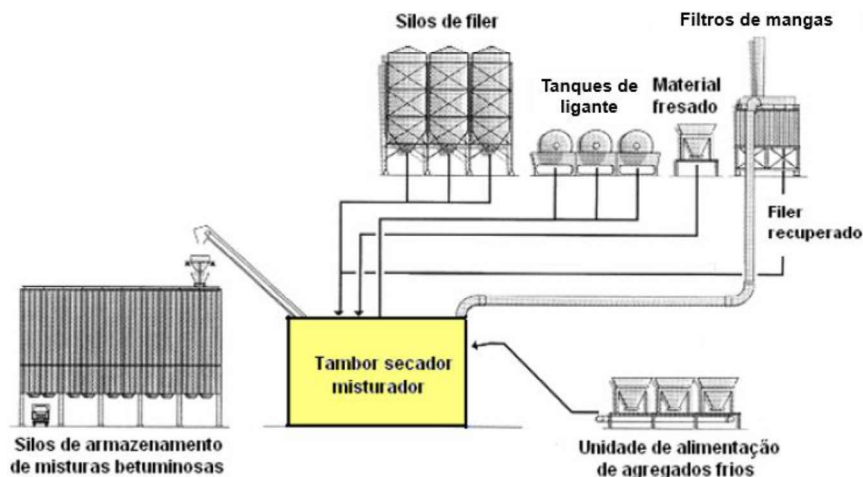
Fonte: Adaptado de Zaumanis *et al.*, 2014.

2.1.2.2. Usinas Volumétricas

Este tipo de usina produz as misturas asfálticas de maneira constante, na qual a pesagem dos agregados é realizada individualmente através de correias de velocidade variável, contínua e automaticamente na proporção indicada no sistema de controle. Os agregados entram no secador, cilíndrico rotativo com um queimador em uma de suas extremidades, onde passam por um processo de secagem, para redução de umidade e elevação da temperatura necessária para as misturas. O ligante asfáltico é então adicionado e a homogeneização da mistura pode ser feita no próprio tambor misturador ou em um misturador externo (CIBER, 2012).

De acordo com Asphalt Institute (1986) em usinas volumétricas são basicamente três métodos diferentes de transferência de calor para o material fresado anteriormente a adição de ligante asfáltico: de maneira indireta (pelos gases de exaustão), por convecção (mistura de ar quente proveniente do processo de combustão completa) e por condução e convecção (agregados – virgens e/ou recuperados – são aquecidos em frente ao tambor, o RAP é introduzido aproximadamente no centro do tambor e é aquecido). Nas usinas contínuas, anteriormente a adição de ligante asfáltico, o RAP pode ser aquecido em um tambor-secador-misturador (TSM), diretamente pelos gases de combustão ou por contato com os agregados virgens superaquecidos. Na Figura 12 encontra-se um modelo genérico de inserção de RAP em usinas contínuas.

Figura 12 – Modelo genérico de inserção de RAP em usinas volumétricas

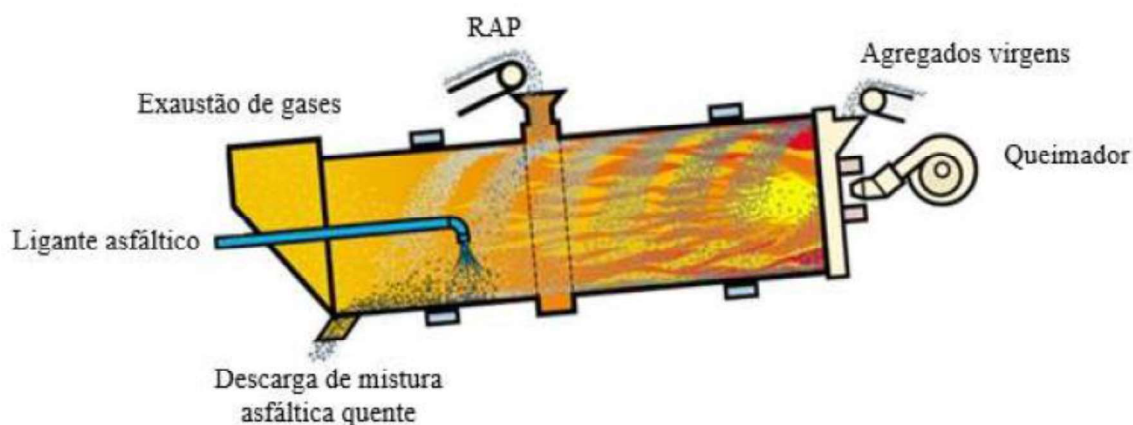


Na produção de misturas asfálticas recicladas à quente neste tipo de equipamento, as principais variantes são a usina com TSM de fluxo paralelo, com TSM de contra fluxo e a de tambor duplo (BAPTISTA, 2006).

Na configuração de usina volumétrica com tambor de fluxo paralelo, na mesma extremidade do queimador é a entrada dos agregados virgens, onde são aquecidos e secos pelos gases de exaustão que fluem no mesmo sentido. A entrada do RAP se dá a partir de um anel no centro do tambor secador, evitando assim o contato com a chama (SUZUKI, 2019). Na zona de introdução do RAP, a temperatura dos gases é menor e permite a introdução de material fresado que é aquecido por contato com os agregados superaquecidos e pelos gases de combustão à quente (BAPTISTA, 2006).

Neste método de inserção de material fresado e esta forma de transferência de calor, segundo a NAPA (1996), há a possibilidade de alcançar valores próximos a 70% de RAP, mas, por outro lado, para Kandhal & Mallick (1997), é necessário limitar este valor para no máximo 50% em usinas volumétricas. A Figura 13 ilustra a configuração de entrada de RAP via anel em tambor misturador do tipo de fluxo paralelo.

Figura 13 – Entrada de RAP em tambor misturador de fluxo paralelo

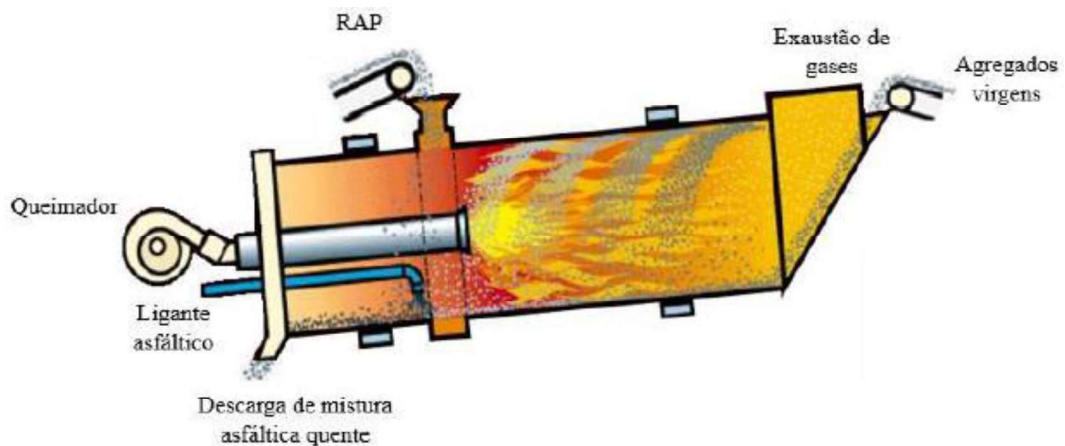


Fonte: Adaptado de Brock, 2003.

Na configuração com tambor do tipo contra fluxo em usinas contínuas, o fluxo dos gases de combustão é oposto ao sentido de deslocamento dos agregados virgens e o queimador se localiza a montante da zona de incorporação do RAP, em anel, garantindo, desta maneira, que o material fresado não entrará em contato diretamente com a chama do secador ou os gases quentes. Assim, o RAP é aquecido apenas com o contato com os agregados virgens sobreaquecidos (BAPTISTA, 2006). Segundo

EAPA (2005), essa configuração permite a introdução de, aproximadamente, 50% de RAP com pouco ou nenhum efeito observado sobre emissões. Na Figura 14 está ilustrado o método de adição de RAP via anel em tambor misturador do tipo contra fluxo, conforme método descrito anteriormente.

Figura 14 – Entrada de RAP em tambor misturador do tipo contra fluxo



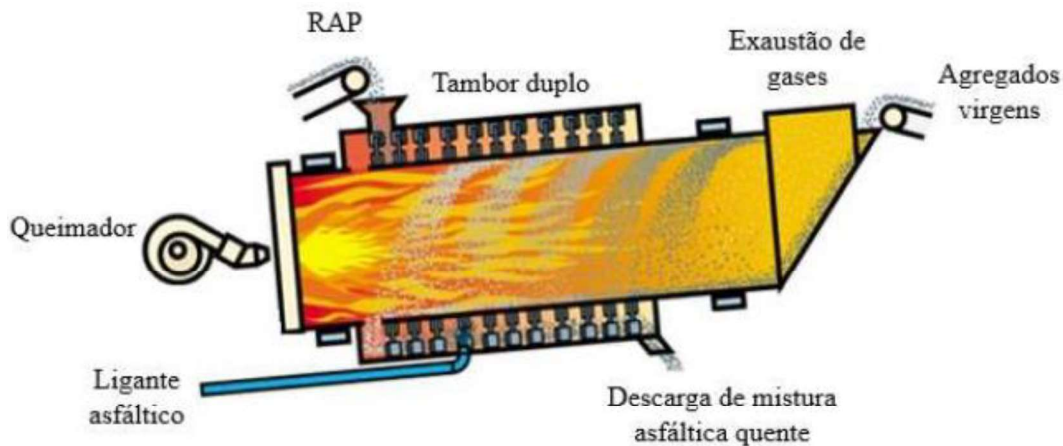
Fonte: Adaptado de Brock, 2003.

Na composição de usina volumétrica de tambor duplo, um tambor de contra fluxo é envolvido por um tambor exterior fixo. O RAP é introduzido neste tambor externo onde é misturado com os agregados após estes terem sido sobreaquecidos no tambor interno e que posteriormente são descarregados por lâminas fixadas na parte externa do secador para um leito do misturador localizado entre o invólucro de secagem rotativo e o invólucro do misturador externo fixo. Assim, o material fresado não entra em contato com os gases quentes de combustão. O RAP é então misturado com os agregados virgens, com o ligante asfáltico, finos e outros aditivos, ganhando calor também no revestimento metálico quente do secador na área de combustão (BAPTISTA, 2006).

Segundo Suzuki (2019), teores de incorporação de RAP mais altos podem ser utilizados com esta configuração, visto que este método proporciona maior tempo de contato entre RAP e agregados virgens sobreaquecidos próximos à superfície externa com maior temperatura do tambor misturador. Entretanto, há a possibilidade de limitação do percentual de material fresado a inserir em função do espaço e tempo

disponíveis para a homogeneização dentro do tambor. A Figura 15 exemplifica a configuração da entrada de RAP em um tambor duplo.

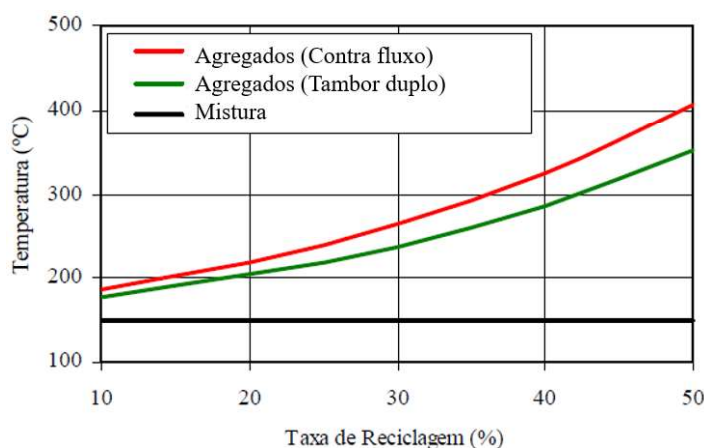
Figura 15 – Entrada de RAP em tambor duplo



Fonte: Adaptado de Brock, 2003.

Ao se comparar os métodos de contra fluxo e o de tambor duplo, verifica-se a maior eficiência energética relacionada a segunda técnica citada, ou seja, para determinada temperatura final de mistura, a configuração de tambor duplo necessita de menor sobreaquecimento dos agregados virgens, podendo esta diferença chegar a 40°C, com 5% de umidade do material fresado (BAPTISTA, 2006). No gráfico da Figura 16 verifica-se este comportamento do aquecimento dos agregados.

Figura 16 – Sobreaquecimento de agregados para tambor duplo e contra fluxo

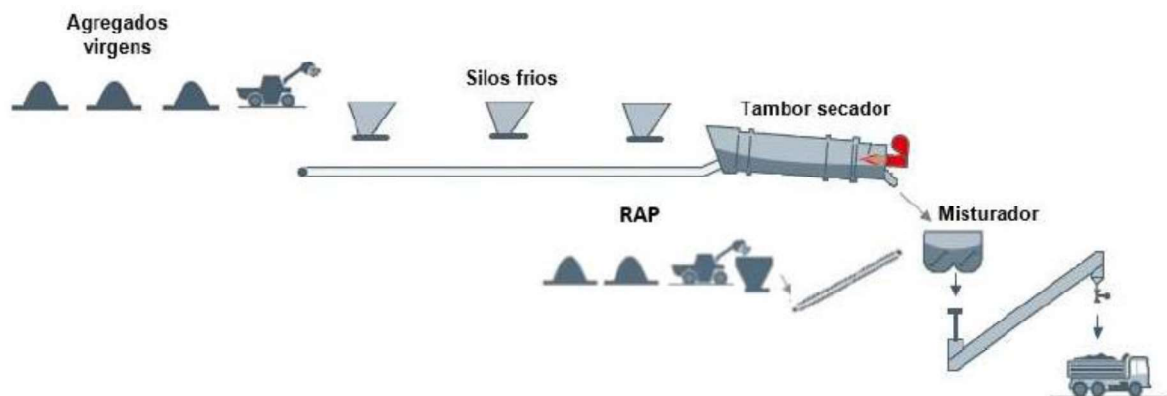


Fonte: Adaptado de BAPTISTA, 2006.

O teor de RAP na mistura é limitado dependendo da dimensão do misturador que irá afetar o tempo de homogeneização da mistura entre o RAP (frio e com baixo teor de umidade) e os agregados virgens quentes e secos.

Através de um misturador contínuo ao secador do tipo contra fluxo, o RAP pode ser adicionado na mistura. Neste caso, o teor de material fresado a inserir depende das dimensões do misturador e o tempo necessário para homogeneização da mistura entre agregados, ligante e RAP, o qual deve ser inserido no misturador a frio e com baixo teor de umidade (SUZUKI, 2019). Na Figura 17, encontra-se um modelo da configuração descrita.

Figura 17 – Entrada de RAP em misturador contínuo em secador de contra fluxo



Fonte: Adaptado de Ammann, 2012.

Em usinas contínuas, também há a possibilidade de adaptação para se realizar misturas com até 100% de material fresado. Em Nova York, a Green Asphalt é uma usina volumétrica que foi elaborada a partir de equipamentos usados e tem projeto parecido ao de uma usina com tambor contra fluxo. O material fresado é exposto a chama do queimador por pouco tempo e o ligante asfáltico não tem seu potencial prejudicado. Quanto ao controle de emissões, um dispositivo remove partículas no ar e um filtro final remove a "blue smoke". Para a utilização de misturas com aproveitamento de 100% do material fresado, há a necessidade da separação das pilhas do RAP em frações conforme o projeto desejado (SUZUKI, 2019).

2.1.3. Limitações do Uso de RAP em Misturas Asfálticas Recicladas à quente

Para o bom desenvolvimento de misturas asfálticas recicladas à quente, alguns cuidados devem ser tomados no momento da incorporação de RAP nas usinas, pois as misturas podem ter características mecânicas influenciadas negativamente em função da perda de características do material fresado e do ligante envelhecido presente.

2.1.3.1. Superaquecimento do RAP

Quando há a necessidade de utilização de taxas de reciclagem de RAP acima de 25%, o aquecimento da mistura se torna um limitador. Em pequenas porcentagens, o processo de transferência de calor se dá a partir do contato do RAP com o agregado virgem, já em taxas elevadas, este processo é energeticamente inviável, visto que se deve superaquecer o agregado natural entre 250 e 300°C. O agregado pode ainda ser degradado superficialmente gerando excesso de material fino (GENNESSEAU, 2015).

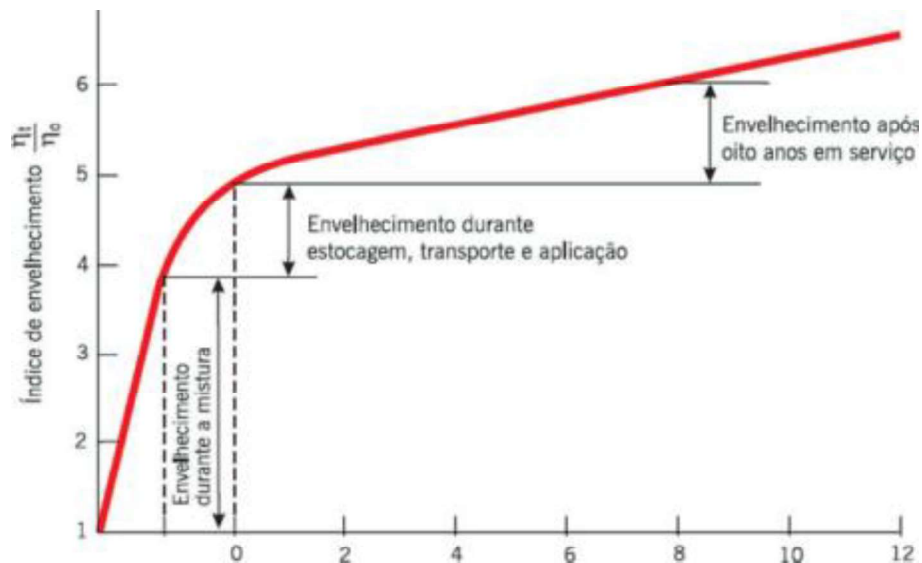
O aquecimento do RAP em usinas necessita de adaptações para que possa se manter ou aumentar a produtividade da mesma, sem prejudicar as características do ligante durante a usinagem, principalmente a de envelhecimento. As alterações podem ser feitas em usinas do tipo volumétricas (secador-misturador/contra fluxo), ou aquecimento por micro-ondas além da separação do material fresado em frações de diferentes tamanhos (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

2.1.3.2. Envelhecimento do Ligante Asfáltico Presente no RAP

O envelhecimento do CAP no material fresado é um dos problemas gerados a partir do endurecimento do ligante asfáltico. Este enrijecimento possibilita maiores resistências às deformações permanentes das misturas asfálticas recicladas, mas por outro lado, pode acentuar o dano à fadiga destas misturas. O ligante asfáltico envelhecido ainda se torna mais frágil, dúctil e menos elástico. Pode-se representar, fisicamente, o envelhecimento do ligante asfáltico através do aumento de sua viscosidade e ponto de amolecimento, bem como a diminuição da penetração e perda de capacidade aglutinante (PINTO, 1991). Na Figura 18 ilustra-se o fenômeno do

envelhecimento do CAP em todo o processo de usinagem à aplicação de mistura asfáltica. O índice de envelhecimento é dado pela relação η_a/η_0 , onde η_a é a viscosidade em uma certa condição de envelhecimento e η_0 é a viscosidade inicial do ligante.

Figura 18 – Envelhecimento de ligante asfáltico



Fonte: Adaptado de Whiteoak (1990).

Pode-se verificar, na Figura 18, três fases do envelhecimento do ligante asfáltico, sendo a primeira durante a usinagem da mistura asfáltica, correspondendo por, aproximadamente, 60% do processo, uma segunda durante o estoque, transporte, espalhamento e compactação (20%) e, por fim, a ação do meio ao longo do restante da vida útil do pavimento (SILVA *et al.*, 2011).

2.1.3.3. Heterogeneidade do RAP

Para a incorporação de maiores percentuais de RAP, normalmente acima de 20%, é necessário realizar a verificação da homogeneidade dos materiais fresados disponíveis para a reciclagem. De acordo com Genesseeux (2015), pode-se mencionar três grandes grupos de problemas provenientes da heterogeneidade do RAP, como:

- 1) Heterogeneidade propriamente dita;

- 2) Mistura entre RAP e novos materiais;
- 3) Mistura entre ligante envelhecido presente no RAP e o ligante novo a ser inserido.

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 a porção graúda. Portanto, a partir disto, verifica-se que a heterogeneidade do RAP não está apenas na composição granulométrica da mistura, mas também no teor final de ligante. A separação de frações na reciclagem, bem como o destorroamento de aglomerados de RAP, podem proporcionar melhores resultados e controles das misturas recicladas (GENESSEAU, 2015).

A origem do material fresado também precisa ser levada em conta. No momento da fresagem e estocagem do RAP, as pilhas são normalmente depositadas nos pátios das usinas com materiais proveniente de rodovias com composições granulométricas e origem mineralógica de agregados, bem como teores e tipos de ligantes de diferentes origens. O cuidado com a correta caracterização e beneficiamento do material fresado propicia o melhor controle tecnológico e resultados de parâmetros técnicos.

2.1.3.4. Reativação do Ligante Asfáltico do RAP

As misturas asfálticas recicladas podem ser classificadas de acordo com a reativação do ligante presente no RAP e podem ser descritas como (DOYLE e HOWARD, 2010):

- a) Quando considerado o RAP com comportamento apenas de agregado, ou seja, 0% do ligante é remobilizado, é chamado de agregado negro ou “Black Rock”;
- b) Caso todo o ligante contido no RAP se tornar fluido e misturar-se com o ligante virgem, considera-se que houve uma mistura completa, ou seja, 100% do ligante asfáltico foi remobilizado. O processo é chamado de mistura completa ou “full blending”; e
- c) Parcialmente utilizado: uma parte do ligante do RAP é reutilizado na nova mistura considerando fatores como as propriedades e tempo de envelhecimento do ligante, temperatura e aditivos.

Lo Presti *et al.* (2019) relatam que o percentual de reativação de ligante asfáltico presente no RAP ainda é objeto de muitos estudos e há a preocupação com a contribuição deste RAP nas propriedades mecânicas finais das misturas asfálticas recicladas. Há, deste modo, a necessidade de se considerar os projetos de misturas em laboratórios e ensaios de campo.

A norma da AASHTO M 323-13 – Superpave Volumetric Mix Design recomenda que em misturas com a incorporação de menos de 15% de RAP os projetos não devem ser alterados. Para misturas recicladas com inserção de RAP de 15 a 25%, a norma sugere a utilização de um ligante virgem de baixa viscosidade. Já para porcentagens de RAP maiores que 25, a especificação propõe o uso de gráficos de mistura (blending charts), com o objetivo de indicar o grau de desempenho (PG) que o ligante virgem deve apresentar para ser utilizado na mistura reciclada.

Estudos realizados por Doyle & Howard (2010) demonstraram que de 67 a 87% do total de ligante antigo, proveniente do RAP, é reutilizado na nova mistura, e que os materiais mais viscosos têm menores quantidades de ligante reutilizáveis. Ainda, o estudo verificou a viabilidade de uso de elevados teores de RAP em misturas mornas.

2.2. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

Os estudos e pesquisas na área de mecânica de pavimentos, estão voltados para a determinação de métodos de dimensionamento mecanísticos, os quais se utilizam de ferramentas de análise estrutural no cálculo de tensões e deformações, além da determinação dos mecanismos de fadiga, resistência e deformabilidade de misturas asfálticas (MEDINA e MOTTA, 2015).

No dimensionamento de um pavimento pelo método mecanístico é necessária a consideração de parâmetros de entrada (parâmetros de deformabilidade dos materiais, fatores ambientais, tráfego, etc.) e critérios de aceitação (vida de fadiga e afundamento de trilha de roda). Assim, torna-se indispensável a caracterização mecânica dos materiais para que o pavimento tenha o desempenho esperado ao longo de sua vida útil de serviço. Desta forma, os ensaios dinâmicos ou de cargas repetidas, que visam simular situações reais de tráfego, se mostram ferramentas importantes na caracterização dos materiais de pavimentação (CEZARO JUNIOR, 2008).

Na avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas à quente, os ensaios de laboratório são fundamentais para o melhor entendimento destas características. Estes ensaios devem reproduzir as propriedades fundamentais das misturas, bem como buscar, de maneira mais próxima possível as situações de campo, como por exemplo, temperaturas, grau de compactação, tempo de carregamento e níveis de tensão. Entretanto, as condições apropriadas de ensaios são de difícil determinação em virtude das grandes variações das características do meio (VASCONCELOS, 2004).

Para avaliação do desempenho de misturas asfálticas recicladas, podem ser realizadas análises a partir de ensaios destrutivos, como o ensaio de compressão diametral, baseados nos comportamentos elásticos e visco-plásticos das misturas, ensaios empíricos que correlacionam os seus resultados com o desempenho no campo e ensaios não destrutivos, baseados nas teorias da mecânica dos materiais (LIMA, 2003).

Em seu estudo, Bohn (2017) analisou misturas asfálticas recicladas à quente e mornas com incorporação de diferentes teores de RAP em suas composições. Verificou-se que o aumento do teor de fresado resulta em melhores resultados frente as propriedades de resistência e deformabilidade das misturas. No ensaio de Flow Number, de deformação permanente, é importante destacar o ganho de ciclos, demonstrando o bom resultado das propriedades analisadas, destacando ainda os ensaios de MR, RT e Módulo Complexo.

Maior rigidez de misturas asfálticas em função do aumento do teor de RAP foi constatada, também, em Suzuki (2019), que avaliou misturas contendo de 0 a 65% de incorporação de material fresado. Valores de resistência a tração por compressão diametral, módulo de resiliência e módulo complexo demonstraram o comportamento analisado, aumentando seus valores conforme a maior adição de RAP ao concreto asfáltico.

O efeito do RAP na rigidez de misturas asfálticas foi analisado por Basueny (2016). Misturas com 0, 15, 25 e 40% de material fresado foram submetidas ao ensaio de módulo complexo. A altas temperaturas ou baixas frequências, o comportamento das misturas é semelhante e não se evidencia melhora ou piora do parâmetro estudado. Por outro lado, nas baixas temperaturas e altas frequências do ensaio, é visível o aumento de rigidez causado pelo acréscimo de RAP, porém não há

linearidade nos resultados, sendo a mistura com 25% a mais rígida, o que pode estar ligado a heterogeneidade encontrada no material fresado.

Centofante (2016) concluiu que os valores das características de resistência a tração por compressão diametral e módulo de resiliência tiveram acréscimo conforme o aumento da incorporação de material fresado na mistura. A rigidez, através dos ensaios de módulo complexo, também teve seu comportamento melhorado. Na inferência realizada à fadiga das misturas, não se obteve valores característicos que definam o comportamento da inserção do material fresado no concreto asfáltico e necessitam de estudos mais aprofundados.

Com resultados semelhantes aos observados, Lima (2003) analisou misturas recicladas à quente com incorporação de 0 a 50% de RAP. Verificou-se que em todos os parâmetros avaliados (RT, MR e resistência à fadiga), os resultados melhoraram em função da adição do material fresado.

A vida de fadiga de um pavimento, considerada critério de aceitação no desenvolvimento de projetos de pavimentos e importante no momento de definições de vida útil de pavimento, é definida por Preussler (1983) como um processo de mudança estrutural permanente, localizada e progressiva que acontece no material quando é submetido a carregamentos que geram tensões e deformações repetidas em alguns pontos, originando trincas ou fratura completa após repetições com valor máximo menor que a resistência à tração do material. Deste modo, a avaliação deste parâmetro de misturas recicladas à quente de alto desempenho, oferece a possibilidade de atender a demanda de resistência mecânica, bem como a sustentabilidade na construção de rodovias.

Pasetto e Baldo (2017) realizaram ensaios de vida de fadiga através da viga em flexão de quatro pontos, onde avaliaram o parâmetro abordando a perda de rigidez das amostras de misturas recicladas à quente, com inserção de até 40% de RAP. As misturas asfálticas com a presença de ligante modificado por polímero demonstraram uma resistência a fadiga maior quando comparadas às misturas com ligante convencional, independente do percentual de ligante analisado. Nas misturas recicladas, verificou-se que é apenas viável a melhoria do desempenho a fadiga, quando da utilização de RAP aliado aos ligantes modificados. Ainda, constatou-se a perda de desempenho quando analisado o envelhecimento das misturas.

Genesseaux (2015) avaliou a vida de fadiga de misturas, convencionais, recicladas à quente e mornas. A partir destes estudos, chegou a conclusão que a

adição de RAP melhora o comportamento a fadiga das misturas não envelhecidas, não altera a resistência à fadiga de misturas quentes envelhecidas, mas, por outro lado, diminui a resistência das misturas mornas envelhecidas. Mesmo que este comportamento tenha sido observado, todos estão de acordo com a norma utilizada na pesquisa, relevando a importância da utilização de reciclagem de misturas asfálticas.

Izaks *et al.* (2002) analisou, a partir do ensaio de flexão em viga quatro pontos, misturas com altos percentuais de adição de RAP – entre 30 e 50% – e verificou um grande decréscimo na resistência a fadiga conforme a adição de material fresado nas misturas. Denota-se que os resultados entre uma pesquisa e outra tem uma grande variabilidade, muito provavelmente em função das diferentes características de origem e manuseio de materiais, tipos de ligantes, métodos de dosagem e preparação de amostras. Ainda, cabe salientar que pela possibilidade de ativação do ligante envelhecido do RAP à nova mistura, a utilização de agentes rejuvenescedores tem atuado como um beneficiador do desempenho a fadiga de misturas recicladas à quente (PASETTO E BALDO, 2017).

Além das características de resistência e fadiga, a durabilidade ou desgaste das misturas asfálticas – que demonstra o arrancamento progressivo de agregados pelo atrito pneu e pavimento – pode ser inferido a partir dos resultados do ensaio de desgaste Cântabro. Deste modo, Centofante (2016), observou que os resultados obtidos pelo ensaio, conforme aumenta o teor de fresado nas misturas, os valores de perda de massa, em média, também crescem, o que significa que o fresado aumenta a tendência ao desgaste.

Em outra pesquisa realizada laboratorialmente com misturas asfálticas recicladas à quente, Bohn (2017), evidenciou comportamentos diferentes no desgaste das misturas a partir do ensaio de Desgaste Cântabro em misturas utilizando CAP convencional (50/70) e CAP modificado por polímero (60/85), onde no primeiro estudo uma mistura com 25% de RAP tem menor desgaste que a mistura de 50%, enquanto no segundo estudo o comportamento se demonstrou o contrário. É importante ressaltar que todos os resultados se enquadraram nas especificações utilizadas na pesquisa. Rocha *et al.* (2015) avaliou misturas com 75 a 100% de incorporação de material fresado e, concluiu não haver influência do RAP, e os valores dentro das especificações.

2.3. PROPRIEDADES DE SENSIBILIDADE À ÁGUA DE MISTURAS ASFÁLTICAS RECICLADAS

A propriedade de adesividade das misturas asfálticas está associada à sensibilidade no contato destas misturas com a umidade. Esta relação é manifestada por uma perda gradual de resistência ao longo dos anos, propiciando o surgimento de trincas, buracos e panelas. Esta perda de resistência e coesão se deve ao enfraquecimento das ligações entre ligante asfáltico e agregados. É necessário, deste modo, determinar se a mistura é suscetível a danos causados pela água (DOT, 2015).

Furlan (2006) descreve que danos por umidade não caracterizam, propriamente, modos de ruptura nas misturas asfálticas, mas é um processo condicionante, acelerado pela presença de água, que pode levar a ruptura por outros defeitos, sendo eles: deformações permanentes, trincas por fadiga, ou ainda desagregações.

Alguns métodos podem ser utilizados para avaliação da suscetibilidade a umidade, como: avaliação visual, onde analisa-se visualmente o descolamento de película de ligante que recobre o agregado; propriedades mecânicas, que é a verificação de alguma alteração no valor de uma propriedade mecânica tomada como referência; simuladores de tráfego, verificação do efeito combinado da presença de água e das cargas do tráfego. Outras metodologias ainda podem ser empregadas na avaliação da sensibilidade à água. Algumas delas podem ser destacadas, como: Ensaio de Abrasão Deval, Ensaio Cantabro, Ensaio de Pedestal de congelamento e descongelamento, sistema de condicionamento ambiental e dano por umidade induzida (CEZARO JUNIOR, 2008).

Na avaliação da suscetibilidade à presença de água em misturas asfálticas recicladas, DOT (2015) relatou que todas as 18 misturas estudadas apontavam valores acima de 95% de RRT (Resistência Retida a Tração), quando o mínimo esperado é de 80%, seguindo os critérios Superpave. Ainda, relata que os resultados obtiveram valores maiores e menos variáveis que o esperado e que alterações de tipo de ligante asfáltico não modificaram o comportamento dos dados. Verificou-se que a adição de RAP não influenciou negativa ou positivamente quanto a suscetibilidade à presença de água.

O comportamento das misturas asfálticas frente a sensibilidade ao efeito da umidade e a incorporação de diferentes teores de material fresado, entre 0 e 35%, foi

investigada por Arshad *et al.* (2017). Os autores descrevem a influência do RAP no comportamento quanto ao dano produzido pela água, através do ensaio de Lottmann Modificado, como negativo, ou seja, os valores de RRT diminuem com os maiores percentuais adicionados, mas ainda dentro dos parâmetros utilizados na normativa vigente.

Centofante (2016) avaliou o dano causado pela água em misturas recicladas com 10, 20 e 30% de fresado. Verificou-se que a RRT das amostras com 20 e 30%, não alcançaram o mínimo estipulado pela metodologia Superpave, mas a de 20% se enquadraria na maior parte das especificações americanas. Nota-se que a inserção de RAP nas misturas expõe um comportamento negativo ao dano produzido pela ação da água.

Estudando, também, misturas recicladas mornas, Bohn (2017) analisou o efeito deletério da água. Ao contrário da pesquisa citada anteriormente, a incorporação de fresado mostrou-se benéfica para os resultados de RRT. Isto pode estar ligado aos diferentes tipos de ligante asfáltico utilizado: em Centofante (2016), convencional do tipo 50/70 e em Bohn (2017), modificado por polímero. Corrobora para esta conclusão o fato de que nesta última pesquisa, os valores de RRT para CAP 50/70 utilizados estarem abaixo dos parâmetros previstos.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

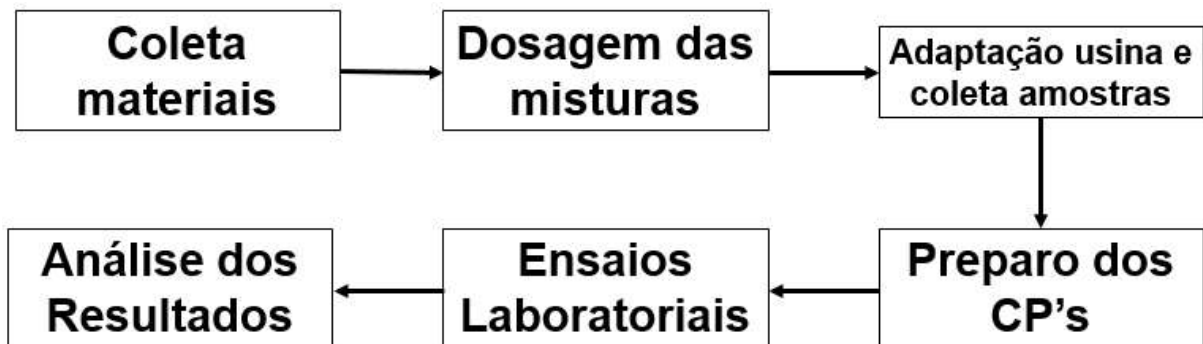
Neste capítulo serão abordados o planejamento da pesquisa, os materiais necessários, assim como os procedimentos que serviram de base para a implementação e gestão da usina e elaboração e realização de ensaios laboratoriais.

3.1. PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Esta pesquisa consistiu na elaboração de um projeto de concreto asfáltico convencional e mais três misturas asfálticas recicladas à quente com a incorporação de 10, 20 e 30% em massa de material fresado.

A adaptação de uma usina volumétrica foi necessária para a produção destas misturas. Analisou-se as características da usinagem e gestão dos materiais e procedimentos, e, posteriormente, a avaliação, através de ensaios de laboratório, do material produzido. A sequência para a realização das atividades referentes a metodologia está ilustrada no fluxograma da Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma de atividades



Fonte: Autor, 2018.

Resumidamente, as etapas da pesquisa estão descritas abaixo:

- a) Coleta e caracterização de materiais agregados na unidade de britagem e material fresado (RAP) em campo;
- b) Dosagem das misturas asfálticas convencional e recicladas enquadrando as curvas granulométricas na faixa C da especificação de serviço DNIT 031/2006;

- c) Beneficiamento e gerenciamento do uso RAP para introdução do material de melhor qualidade na usina;
- d) Adaptação e implementação da usina com silos e correia transportadora para a entrada de RAP;
- e) Usinagem das misturas e acompanhamento da qualidade do material produzido;
- f) Realização de ensaios para verificação das propriedades de deformabilidade (Módulo de Resiliência e Módulo Complexo), ensaios de adesão/coesão (Lottman Modificado e Resistência ao Desgaste Cântabro) e de danificação das misturas (Flow Number, Resistência a Tração e Fadiga a Tração-compressão). Para a realização dos ensaios, foram moldados em torno de 25 corpos de prova por mistura, distribuídos de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Distribuição de corpos de prova por ensaio realizado

Ensaio Realizado	Misturas	Qtde de CP's por mistura	Total de CP's	Dimensão CP	Volume de vazios
MR/RT	4	3	12	10 x 6,4	4±1%
Cântabro	4	3	12	10 x 6,4	4±1%
DUI	4	6	24	10 x 6,4	7±1%
Módulo Complexo	4	5	20	10 x 15	5,5±0,5%
Flow Number	4	3	12	10 x 15	7±1%
Fadiga a TC	4	5	20	10 x 13	5,5±0,5%
Total de CP's			100		

Fonte: autor, 2018

- g) Avaliação do custo/benefício da implantação das estruturas de pavimento propostas, relacionando a vida de fadiga com os custos dos serviços de pavimentação.

3.2. COLETA DE MATERIAIS E LOCAL DO ESTUDO

Os materiais agregados utilizados nesta pesquisa são de origem granítica de unidade de britagem do Município de Eldorado do Sul/RS (conforme localização ilustrada na Figura 20) onde também está localizada a usina. O ligante asfáltico é modificado por polímero SBS, do tipo 60/85.

Figura 20 – Localização da Pedreira



Fonte: Adaptado de Google Maps, 2018.

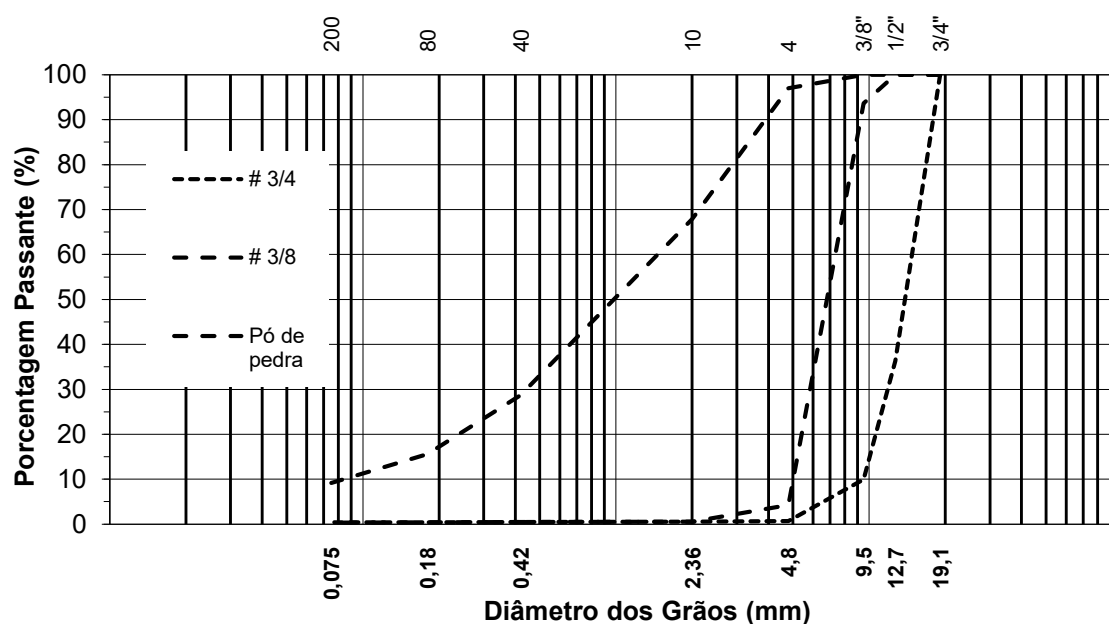
Para a composição das misturas foram utilizadas as frações de agregados, 3/4", 3/8" e pó-de-pedra. Foi realizada a análise granulométrica, através da norma do DNER ME 83/99, em cinco amostras e a média destas está descrita na Tabela 4 e as curvas dispostas na Figura 21.

Tabela 4 – Granulometrias dos materiais agregados utilizados

Peneira	mm	% passante		
		# 3/4	# 3/8	Pó de pedra
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	0,66	4,22	97,00
n 10	2	0,53	0,55	67,85
n 40	0,42	0,46	0,47	28,67
n 80	0,18	0,43	0,39	15,55
n 200	0,075	0,39	0,35	9,17

Fonte: autor, 2018

Figura 21 – Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: Autor, 2018.

Para a determinação de algumas propriedades dos agregados, ainda foram realizados ensaios de laboratório, descritos na Tabela 5, os quais serviram de auxílio na dosagem das misturas asfálticas.

Tabela 5 – Ensaios de caracterização do agregado britado

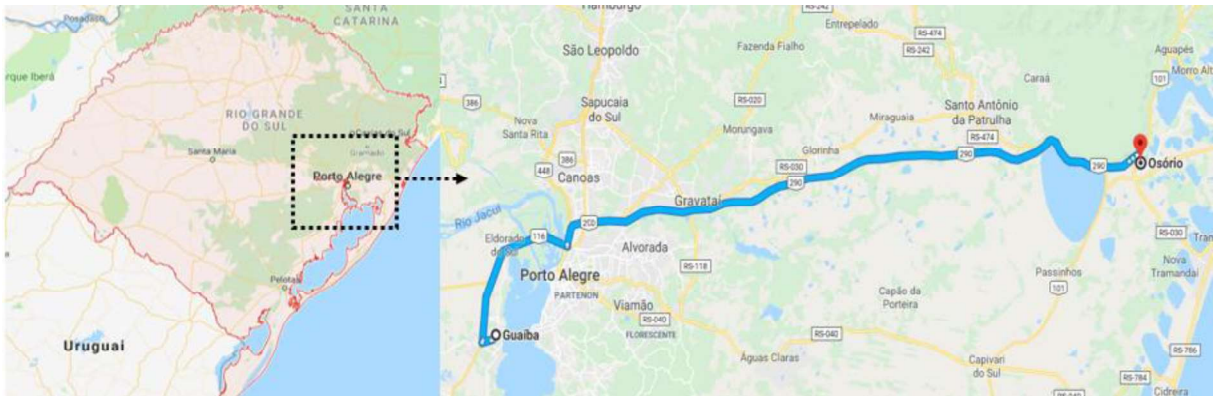
Ensaio	Am1	Am2	Am3	Média
Avaliação da durabilidade pelo emprego de sulfato de sódio - DNER ME 089/94 (Perda média em %)	4,61	4,68	12,14	7,14
Índice de forma - DNER ME 086/94	0,70	0,74	0,71	0,72
Abrasão Los Angeles (NBR 035/98) (%)	19,99	16,31	23,12	19,81
Equivalente de areia - DNER ME 054/97 (%)	62,90	62,30	62,20	62,47
Massa específica real ag. gráudo - DNER 81/98 (g/cm ³)	2,648	2,651	2,649	2,649
Massa específica aparente ag. gráudo - 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: Autor, 2018.

O material fresado foi coletado a partir dos serviços de conservação e manutenção de pavimentos da rodovia BR-290/RS e BR-116/RS, entre os municípios de Guaíba e Osório/RS, os quais estavam sob a responsabilidade da Triunfo/Concepa, Concessionária da Rodovia à época, de acordo com o detalhamento da Figura 22.

O equipamento utilizado na fresagem do pavimento, foi uma minifresadora, conforme ilustrado na Figura 23, a qual gera um RAP de composição granulométrica fina em comparação a uma fresadora tradicional.

Figura 22 – Local da retirada do material fresado



Fonte: Adaptado de Google Maps, 2018.

Figura 23 – Equipamento realizando serviço de fresagem (a) e detalhe do tambor de fresagem (b)



Fonte: autor, 2018.

Com o intuito de avaliar o comportamento do material fresado, foram realizadas granulometrias considerando-o apenas como agregado (Black Rock) e também como

se todo o ligante presente no RAP fosse reaproveitado (Full Blending). Isto se torna importante no momento da análise das curvas granulométricas das misturas finais. Nos dois casos foram realizadas granulometrias de 4 amostras, as quais, junto da média encontrada estão nas Tabelas 6 e 7 e as curvas granulométricas ilustradas nos gráficos da Figuras 24 e 25.

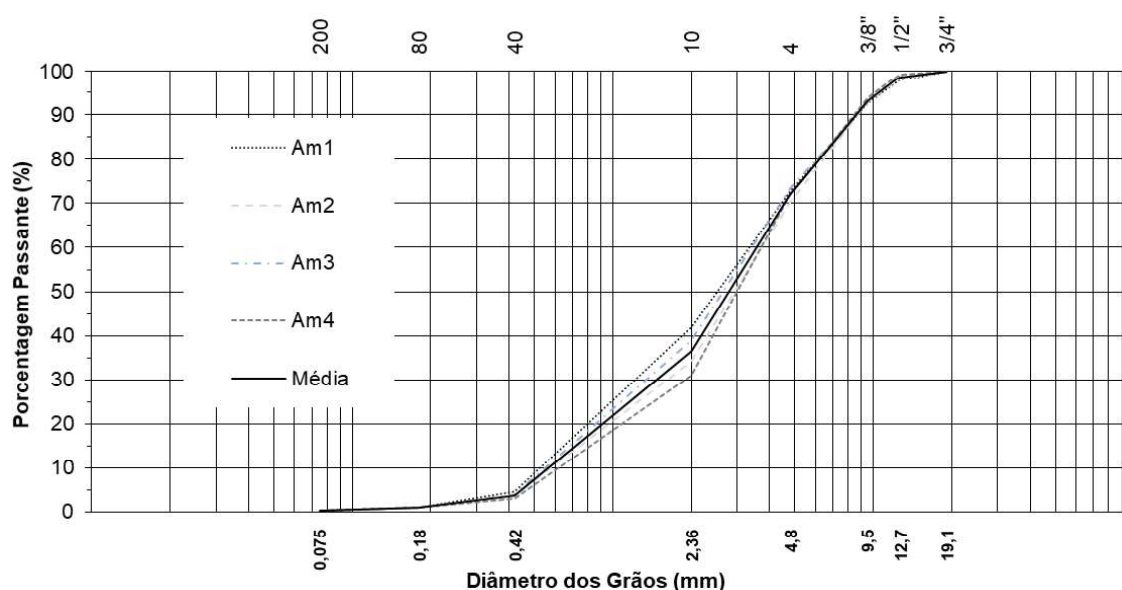
Cabe aqui ressaltar que as granulometrias das amostras foram realizadas após o peneiramento na malha de 3/4, que foi utilizada no processo de beneficiamento do RAP anteriormente a entrada deste na usina.

Tabela 6 – Granulometrias das amostras de material fresado anterior à extração de ligante asfáltico

Peneira	mm	% passante				
		Am1	Am2	Am3	Am4	Média
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	97,91	98,17	98,92	99,22	98,56
3/8"	9,5	92,60	92,98	92,88	93,81	93,07
n 4	4,8	72,66	70,19	73,33	72,06	72,06
n 10	2	41,80	34,06	38,80	30,84	36,38
n 40	0,42	4,64	3,58	3,82	3,02	3,77
n 80	0,18	1,00	0,91	0,92	0,85	0,92
n 200	0,075	0,19	0,20	0,23	0,22	0,21

Fonte: autor, 2018.

Figura 24 – Granulometrias das amostras de material fresado anterior à extração de ligante asfáltico



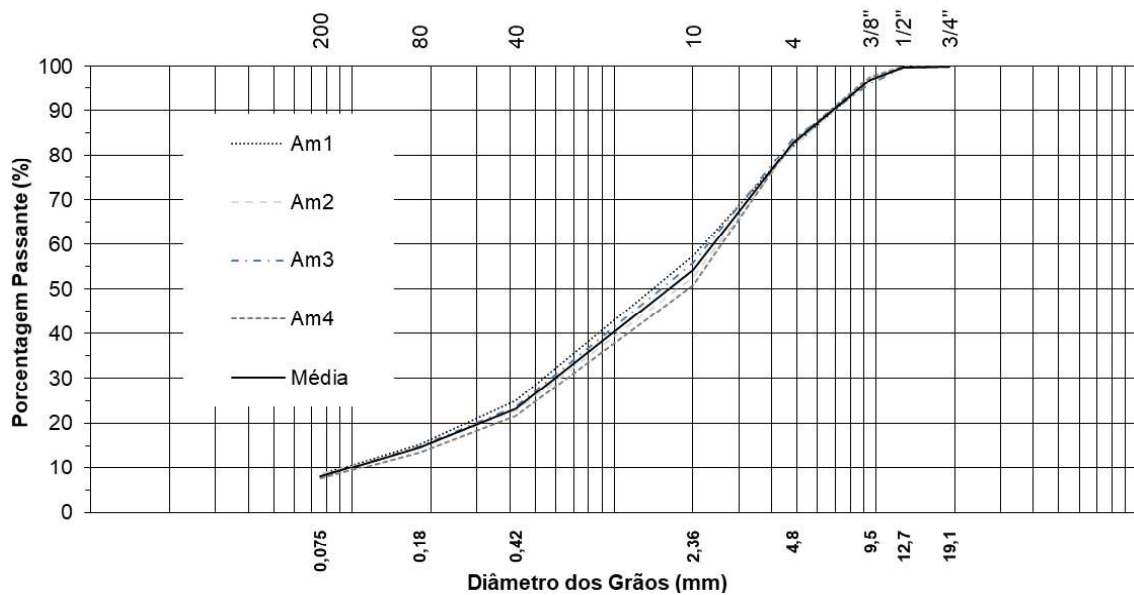
Fonte: autor, 2018.

Tabela 7 – Granulometrias das amostras de material fresado após extração de ligante asfáltico

Peneira	Mm	% passante					Média
		Am1	Am2	Am3	Am4		
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
1/2"	12,7	99,63	99,63	99,69	100,00	99,74	
3/8"	9,5	97,04	96,94	96,09	97,60	96,92	
n 4	4,8	82,02	81,96	83,72	83,00	82,68	
n 10	2	57,54	52,70	55,87	50,80	54,23	
n 40	0,42	24,96	22,62	23,55	21,50	23,16	
n 80	0,18	15,33	14,55	14,71	13,50	14,52	
n 200	0,075	8,40	8,44	7,95	7,40	8,05	

Fonte: Autor, 2018.

Figura 25 – Granulometrias de RAP encontradas após a extração de ligante asfáltico



Fonte: Autor, 2018.

O RAP foi ainda caracterizado para conhecimento do teor de ligante (DNER 053/94) e umidade presente, os quais estão resumidos na Tabela 8.

Tabela 8 – Teor de ligante e umidade e massa específica máxima medida das amostras de RAP

Ensaio	Am1	Am2	Am3	Am4	Média	DP
Teor de Ligante	5,13%	4,81%	5,10%	4,75%	4,95%	0,20%
Teor de umidade	4,44%	4,23%	4,60%	4,30%	4,39%	0,16%
Gmm	2,536	2,545	2,543	2,552	2,544	0,007

Fonte: autor, 2018.

O material fresado necessitou de cuidados especiais para redução de umidade no momento da usinagem, pois esta também é fator determinante para a condição de temperatura de sobreaquecimento dos agregados no tambor secador.

A determinação do tipo de CAP existente no RAP também é importante e foi realizada através da recuperação do CAP pelo método Abson e, no CAP recuperado, os ensaios de recuperação elástica a 25°C, ponto de amolecimento, penetração a 25°C, viscosidade Brookfield em 3 temperaturas foram realizados, e os resultados resumidos na Tabela 9.

Tabela 9 – Características do CAP do RAP 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	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: Autor, 2018.

Verifica-se, a partir dos dados relacionados na Tabela 9, que as amostras de RAP coletadas são de misturas asfálticas que se utilizavam de ligante asfáltico com polímero em sua composição, de acordo com dados de ponto de amolecimento, penetração, viscosidade e recuperação elástica, os quais, mesmo que um pouco diferentes da referência, são condizentes com asfaltos modificados. É importante aqui ressaltar que nos últimos anos a Concessionária administradora da rodovia utilizava apenas soluções em concreto asfáltico com ligante modificado por polímero, corroborando com os resultados encontrados nos ensaios. A presença do ligante asfáltico polimérico, comprovadamente, beneficia os resultados de desempenho das misturas.

O ligante asfáltico utilizado é modificado por polímero do tipo SBS, distribuído pela empresa Betunel, denominado Stylink PG 76-22. Abaixo, na Tabela 10, estão destacados os valores certificados para utilização do material asfáltico no momento da dosagem das misturas. Os agregados, tanto para o processo de moldagem quanto

para usinagem, foram aquecidos em, aproximadamente, 10°C acima da temperatura do ligante asfáltico.

Tabela 10 – Limites estabelecidos para o ligante asfáltico para dosagem dos projetos

Ensaio	Limites	Encontrado
Recuperação Elástica (%)	> 85	87
Ponto de Amolecimento (°C)	> 60	72
Penetração a 25°C (mm)	40 a 70	56
Viscosidade Brookfield 135°C (cP)	<3000	1572
Viscosidade Brookfield 150°C (cP)	<2000	502
Viscosidade Brookfield 177°C (cP)	<1000	201
Ponto de Fulgor (°C)	> 235	236
Densidade Relativa a 20/4°C	NA	1,004
Temperatura mistura (°C)	Indicativo	161 a 167
Temperatura compactação (°C)	Indicativo	143 a 149

Fonte: Autor, 2018

Devido às datas um pouco afastadas entre moldagem em laboratório e a produção das misturas em usina, o processo de implementação da entrada de RAP na usina de asfalto e a evolução produtiva desta, um novo lote de ligante precisou ser utilizado no momento da usinagem e, os dados deste estão expostos na Tabela 11, ainda de acordo com os ensaios fornecidos pela distribuidora.

Tabela 11 – Limites estabelecidos para o ligante asfáltico para usinagem das misturas

Ensaio	Limites	Encontrado
Recuperação Elástica (%)	> 85	87
Ponto de Amolecimento (°C)	60	64,5
Penetração a 25°C (mm)	40 a 70	65,9
Viscosidade Brookfield 135°C (cP)	<3000	1097
Viscosidade Brookfield 150°C (cP)	<2000	530
Viscosidade Brookfield 177°C (cP)	<1000	177
Ponto de Fulgor (°C)	> 235	236
Densidade Relativa a 20/4°C	NA	1,004
Temperatura mistura (°C)	Indicativo	158 a 164
Temperatura compactação (°C)	Indicativo	139 a 145

Fonte: Autor, 2018.

3.3. DOSAGEM DAS MISTURAS RECICLADAS À QUENTE

Para a elaboração dos projetos, utilizou-se da norma DNER ME 043/1995 e a dosagem realizada a partir da metodologia Marshall. A técnica foi escolhida 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 produzidas.

Ainda, soma-se a isto, a possibilidade de indicação de um maior teor de ligante asfáltico resultante da utilização desta metodologia na elaboração de projetos, que por sua vez representa, segundo Bernucci *et al.* (2008) melhor resultado frente a fadiga e reflexão de trincas nos revestimentos asfálticos, que são as principais patologias encontradas nas rodovias brasileiras e a fragilidade das misturas recicladas.

A partir das granulometrias definidas dos agregados e RAP, as curvas das misturas asfálticas foram definidas respeitando a faixa C (DNIT ES 31/2006) e as suas respectivas tolerâncias. Buscando manter a qualidade do produto final e respeitando as condicionantes impostas pela usina de asfalto (conforme mencionado no item 3.4, a seguir), de acordo com o processo de incorporação de RAP proposto, o limitante de quantidade de RAP a utilizar nos projetos foi de 30%, em massa.

Partindo-se da condição de tentativas em melhor adequar a curva ao centro da especificação da norma supracitada, as porcentagens definidas de cada fração de material estão evidenciadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Percentuais de materiais nas curvas granulométricas

Fração agregado/RAP	Referência	10% fresado	20% fresado	30% fresado
	M0	M10	M20	M30
Fração 3/4" (%)	25,00	20,00	15,00	15,00
Fração 3/8" (%)	15,00	10,00	10,00	5,00
Fração Pó de pedra (%)	60,00	60,00	55,00	50,00
RAP (%)	0,00	10,00	20,00	30,00

Fonte: Autor, 2018.

Estes projetos estão apresentados na Tabela 13 e ilustrados nas curvas granulométricas da Figura 26 e, as mesmas estão dentro dos limites estabelecidos

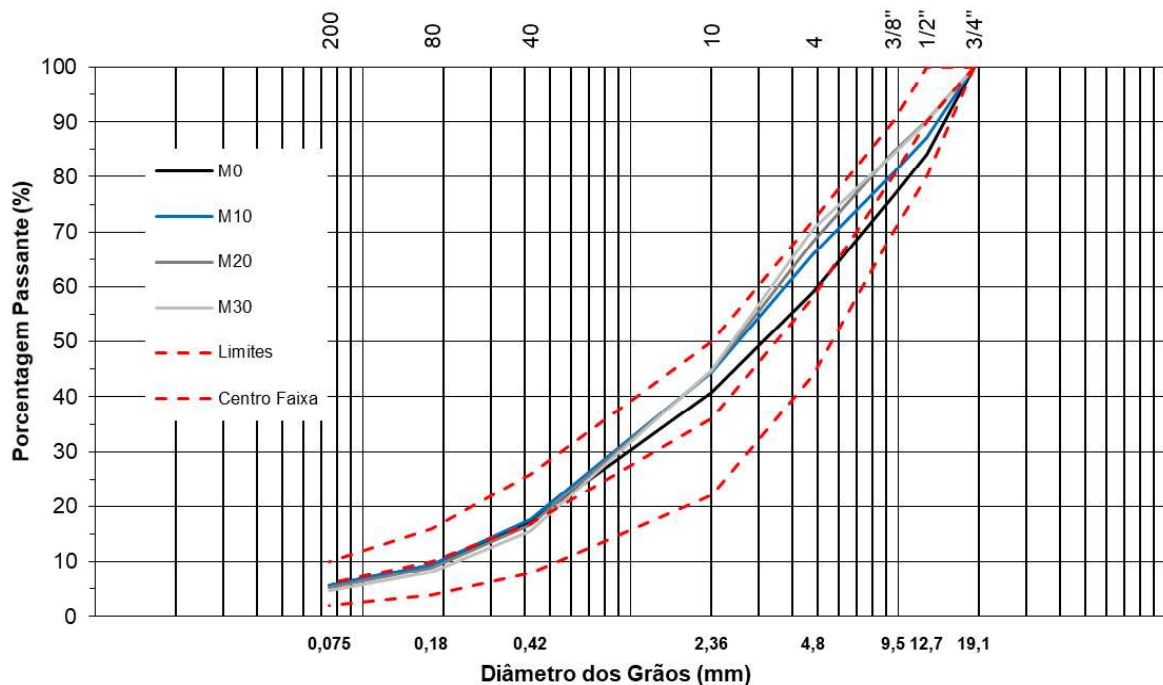
para faixa C DNIT ES 031/2006, a qual tem as mesmas instruções da ES 033/2005. Ressalta-se que a partir das curvas granulométricas da Figura 26, os resultados que serão demonstrados no próximo capítulo seguirão o padrão de cores, exceto em casos especiais que serão explanados particularmente.

Tabela 13 – Distribuição granulométrica das misturas definidas em projeto

PENEIRA	mm	M0	M10	M20	M30
3/4"	19,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	84,08	87,12	90,16	90,02
3/8"	9,5	76,54	80,67	84,47	84,10
n 4	4,8	59,00	65,96	68,28	70,43
n 10	2	40,93	44,51	44,73	44,95
n 40	0,42	17,39	17,72	16,64	15,56
n 80	0,18	9,50	9,55	8,84	8,14
n 200	0,075	5,65	5,64	5,18	4,72

Fonte: autor, 2018.

Figura 26 – Composição das curvas granulométricas definidas



Fonte: Autor, 2018.

Seguindo os procedimentos do método Marshall, que, de acordo com a norma DNER ME 43/95, consiste na moldagem de corpos de prova com 10cm de diâmetro e $6,35 \pm 1,5$ cm de altura com a aplicação de 75 golpes por face. O ligante asfáltico foi

aquecido a 165°C e os agregados entre 10 e 15°C a mais. O material fresado foi deixado em estufa de 2 a 3 horas a 110°C para que não houvesse um grande aquecimento e pudesse causar maior envelhecimento ao ligante asfáltico contido no material. Através de tentativas foram escolhidos os teores de cada um dos projetos e foram moldados 3 CP's para cada um dos teores analisados. Uma amostra foi separada e através do método Rice, a massa específica máxima (Gmm) medida foi encontrada. Ainda, para cada um dos CP's moldados, foi realizado o cálculo da massa específica aparente (Gmb), através da ASTM D 1188. Com estes dois parâmetros, foi possível a determinação do volume de vazios (Vv) de cada um dos teores propostos. Estes dados estão expostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Escolha de teores para a determinação do teor ótimo de ligante a inserir nas misturas

Projeto	Teor de ligante	Gmm (t/m³)	Gmb (t/m³)	Volume de Vazios
M0	4,50%	2,441	2,238	8,31%
	5,00%	2,421	2,264	6,49%
	5,50%	2,397	2,283	4,76%
	6,00%	2,391	2,309	3,43%
M10	4,00%	2,447	2,273	7,09%
	4,50%	2,421	2,273	6,12%
	5,00%	2,407	2,296	4,60%
	5,50%	2,386	2,300	3,59%
M20	3,50%	2,459	2,230	9,33%
	4,00%	2,439	2,290	6,11%
	4,50%	2,419	2,293	5,20%
	5,00%	2,403	2,306	4,02%
M30	3,00%	2,456	2,244	8,64%
	3,50%	2,444	2,320	5,07%
	4,00%	2,428	2,328	4,12%
	4,50%	2,413	2,339	3,02%

Fonte: Autor, 2018.

Procurou-se buscar o teor ótimo de ligante asfáltico para cada uma das misturas o mais próximo possível do centro da ES-31/2006, em 4% de volume de vazios, avaliando-se as curvas encontradas e o histórico de utilização de misturas asfálticas para os agregados e ligante utilizados. Verifica-se que os teores de projeto

reduziram proporcionalmente com o maior percentual de incorporação de material fresado nas misturas. Isto pode ser explicado devido a reativação do ligante envelhecido presente no RAP. Os teores de ligante asfáltico obtidos para os volumes de vazios adotado encontram-se resumidos na Tabela 15. Já na tabela 16 estão os dados resumidos dos projetos elaborados.

Tabela 15 – Teores ótimos de ligante asfáltico ótimo

Projeto	Teor de ligante novo a inserir (%)	Vv (%) adotado	Teor de ligante no fresado (%)	Teor de ligante total esperado (%)
M0	5,65	4,01	0,00	5,65
M10	5,30	3,96	0,50	5,58
M20	4,85	4,11	0,99	5,51
M30	3,87	4,05	1,49	5,44

Fonte: autor, 2018.

Tabela 16 – Resumo de dados de projetos

Dados Projeto	DNIT - ES 031/2006	M0	M10	M20	M30
Teor de Betume (%):	--	5,65	5,30	4,85	3,87
Volume de Vazios (%):	3 a 5	4,01	3,96	4,11	4,05
RBV (%):	75 a 82	76,51	75,27	72,90	68,46
VAM (%):	> 15	17,01	16,09	15,26	13,04
M. esp. Máx. Medida (%):	--	2,398	2,393	2,407	2,432
M. esp. aparente (%):	--	2,302	2,299	2,308	2,329
Relação Filler/Betume:	0,6 a 1,6 (SUPERPAVE)	1,00	1,06	1,07	1,22

Fonte: autor, 2018.

3.4. ADAPTAÇÃO DA USINA E COLETA DE AMOSTRAS

Para a produção das misturas asfálticas convencional e recicladas, uma usina do tipo volumétrica (Figura 27) – de tambor secador e misturador externo – foi adaptada para recebimento de até 30% de RAP nas misturas convencionais. Esta tem uma capacidade produtiva nominal de 100 ton/hora, com sistema automatizado, possui quatro silos frios para agregados britados, filtros de mangas com retorno de filler ao misturador e elevador de arraste com silo de pré-descarga de, aproximadamente, 1 tonelada.

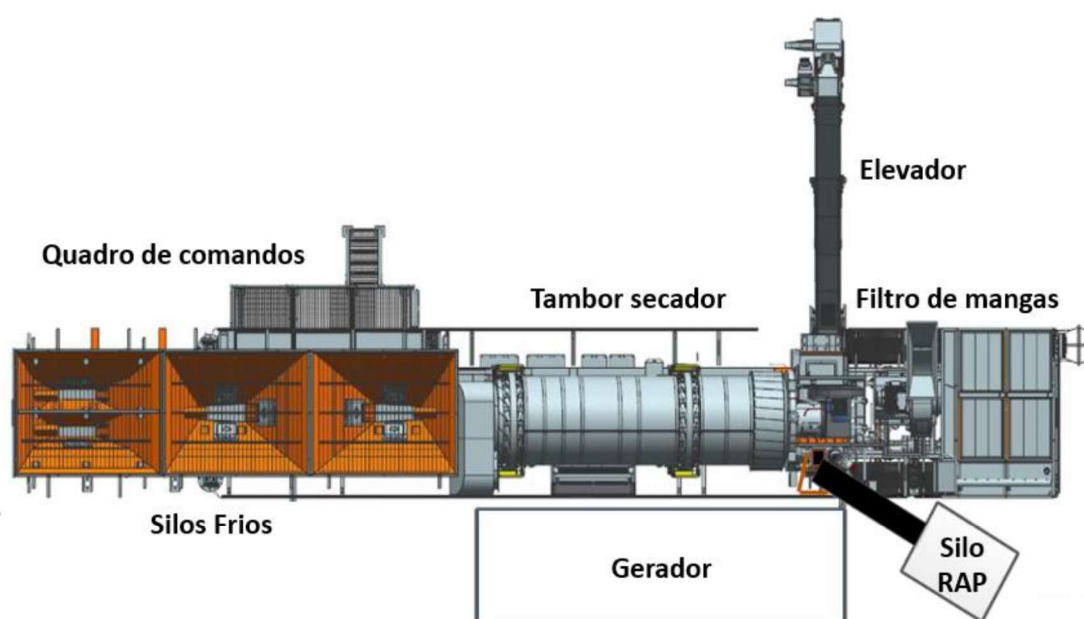
Figura 27 – Usina Volumétrica utilizada para as misturas



Fonte: CIBER, 2012.

Cabe aqui salientar que para todas as misturas o processo foi o mesmo, sem alterações no tempo do misturador ou rotação do secador dos agregados. O processo de alteração necessário foi o sobreaquecimento de agregados. Utilizou-se um silo próprio e correia transportadora para entrada do material fresado diretamente no misturador do equipamento. O posicionamento do silo de entrada do RAP na usina em relação ao posicionamento da mesma está ilustrado no croqui da Figura 28.

Figura 28 – Croqui da implantação de silo para entrada de RAP

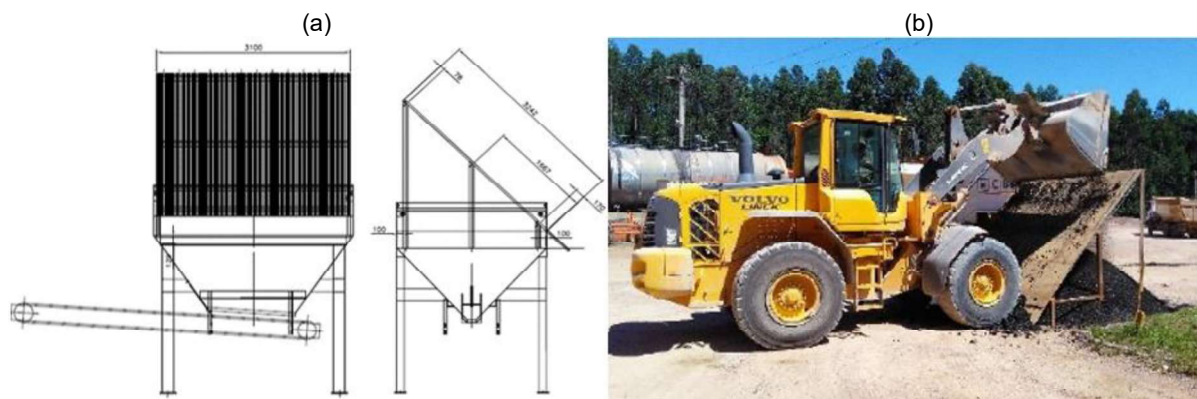


Fonte: autor, 2018.

Nota-se que, a partir da Figura 28, devido ao posicionamento do gerador da usina, o silo não foi instalado perpendicularmente à usina.

Para otimizar o processo de usinagem e possibilitar melhores resultados dos parâmetros mecânicos das misturas recicladas, o RAP passou por um processo de beneficiamento, onde houve a separação das frações graúdas (retidas na peneira $\frac{3}{4}$) das miúdas. Entretanto, em um primeiro teste realizado apenas com uma “grelha” de tamanho $\frac{3}{4}$ ” (diâmetro em apenas um sentido da estrutura) as misturas não tiveram um bom comportamento quanto a sua homogeneização e envolvimento de ligante nos agregados. Estas situações serão discutidas nas análises de resultados. Verificou-se que o peneiramento com uma peneira de malha $\frac{3}{4}$ ” posicionada sobre a estrutura da “grelha”, garantiu o andamento correto no processo de misturas, sem interferir na qualidade do material produzido. Os dois processos de peneiramento, tanto com a “grelha” quanto com a peneira do RAP foram realizados na estrutura ilustrada no projeto da Figura 29.

Figura 29 – Estrutura para beneficiamento RAP (a) e teste realizado (b)



Fonte: Autor, 2018.

O processo de usinagem evoluiu de maneira tradicional sem a inserção de fresado acarretar problemas à produção. O detalhe importante no momento da operação da usina foi o sobreaquecimento dos agregados. Segundo NAPA (1996), há limites de aquecimento que precisam ser respeitados de acordo com o teor de fresado, umidade e temperatura final desejada para a mistura, conforme Tabela 1 no item 2.1.2 desta pesquisa.

Nos dias que antecederam a usinagem das misturas, o RAP passou por um processo de “tombamentos” com auxílio de uma carregadeira (Figura 30), o qual

serviu para diminuição da umidade presente no material, por consequência, diminuindo a necessidade de aumento demasiado de temperatura no tambor secador e comprometimento da qualidade das misturas produzidas.

Figura 30 – Carregadeira realizando o processo de secagem anteriormente a usinagem das misturas



Fonte: Autor, 2018.

Baseando-se nas recomendações da NAPA, com o conhecimento do teor de umidade para o agregado de 1,25% e RAP de 2,83% - encontradas no dia da usinagem – e procedimentos particulares da usina, as temperaturas de aquecimento dos agregados adotadas para cada uma das misturas propostas estão descritas na Tabela 17.

Tabela 17 – Temperatura de aquecimento de agregados e final desejada da mistura

Projeto	Temperatura de aquecimento agregados (°C)	Temperatura final de mistura (°C)
M0	180	165
M10	201	165
M20	233	165
M30	252	165

Fonte: autor, 2018.

Após o início da usinagem das misturas, seguindo a norma DNER PRO 013/94, as amostras foram coletadas e encaminhadas ao laboratório para preparo de corpos de prova. Na Figura 31 está ilustrado o momento da coleta.

Figura 31 – Coleta de amostras



Fonte: Autor, 2018.

Um total de 90 amostras foram coletadas, sendo 18 para a mistura convencional (M0) e 24 para cada uma das outras 3 (M10, M20 e M30), totalizando, aproximadamente, 1350 quilos de material, os quais foram encaminhados para o Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

3.5. PROCESSO DE PREPARO E MOLDAGEM DE CORPOS DE PROVA

No laboratório, as misturas foram levadas à estufa para aquecimento, por duas horas a aproximadamente 110°C, até a estabilização de temperatura para posterior inserção das amostras no misturador a temperatura de compactação. Como as misturas já haviam passado por um processo de envelhecimento durante a usinagem, então este não foi repetido em laboratório.

As amostras foram colocadas em um misturador (marca Infratest testing system modelo Bituminous Laboratory Mixer Liter Special Version - Figura 31 - a) com o intuito

de garantir a temperatura de compactação e manter a homogeneidade necessária para a continuação do processo e posterior moldagem dos corpos de prova. A temperatura de mistura e compactação dos corpos de prova adotada foi de 142°C, intervalo médio da certificação do ligante utilizado no dia da usinagem. Ainda, em função dos diferentes tamanhos nos diversos ensaios, a moldagem dos corpos de prova seguiu as especificações da norma NBR 15987 - Misturas asfálticas à quente – Preparação de corpos de prova com compactador – IPC SERVOPAC Giratory Compactor (Figura 31 - b). No processo de compactação, foi aplicada pressão de 0,60 MPa, utilização de ângulo de rotação externo de 1,25° e velocidade constante de 30 rpm.

Figura 32 – Misturador (a) e compactador giratório Superpave (b) para moldagem de amostras



Fonte: Autor, 2018.

Foram moldados 48 corpos de prova de altura de 6,4 e 52 com 16cm de altura, todos com diâmetro médio de 10cm. Para a obtenção do volume de vazios correto, a massa das amostras foi calculada em função da massa específica máxima medida (Gmm) e a altura fixada em 16 ou 6,4cm. A Figura 33 ilustra os corpos de prova moldados para a realização dos ensaios. Os CP's ainda foram cortados e reparados em retífica para garantir a homogeneidade da aplicação de cargas e distribuições de tensões em ensaios axiais. Na sequência, Tabela 18, estão os dados das moldagens dos CP's, contendo o Volume de Vazios encontrado para cada um dos ensaios realizados.

Figura 33 – Corpos de prova moldados para realização dos ensaios



Fonte: autor, 2018.

Tabela 18 – Volume de Vazios calculados para os ensaios laboratoriais

H CP (mm)	Vv (%)	Ensaio a realizar	Vv calculado (%)			
			M0	M10	M20	M30
160	7 ± 1	FN	7,36	7,74	6,71	7,44
			7,10	7,72	6,97	7,84
			7,61	7,64	7,10	7,57
	5,5 ± 0,5	E*	5,63	5,86	5,41	5,58
			5,69	6,00	5,55	5,69
		Tração direta	5,85	5,91	5,74	5,57
			6,00	6,06	5,77	5,83
			6,00	6,00	5,87	6,04
64	7 ± 1	DUI - acondicionado	7,67	7,69	6,55	6,67
			7,74	7,36	7,02	7,55
			7,54	7,40	6,60	6,64
		DUI - não acondicionado	7,25	6,99	6,50	6,40
			7,77	7,88	6,69	6,67
			7,86	7,45	6,94	6,73
	4 ± 1	MR/RT	3,52	5,10	3,93	4,45
			4,76	5,02	3,88	4,39
			5,00	5,00	4,09	4,47
		Cântabro	4,65	5,00	4,06	4,20
			4,83	5,14	4,65	4,11
			5,00	4,98	4,54	4,07

Fonte: Autor, 2018.

3.6. ENSAIOS LABORATORIAIS PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS

Após a moldagem dos corpos de prova, estes foram submetidos aos ensaios laboratoriais para a determinação do comportamento mecânico das misturas, sendo submetidas aos ensaios de deformabilidade, danificação e adesão/coesão. Todos os ensaios foram realizados no GEPPASV/LMCC/UFSM.

3.6.1. Ensaios de Deformabilidade

Os ensaios utilizados para determinar as características de deformabilidade das misturas asfálticas pesquisadas foram o Módulo de Resiliência (MR) e o Módulo Complexo (E^*), os quais estarão descritos nos itens a seguir.

3.6.1.1. Módulo de Resiliência

O módulo de resiliência (MR), assim como o módulo de elasticidade, é definido pela relação entre tensão e deformação, mas o MR é determinado por ensaio de carga repetida. Os valores máximos das tensões e das deformações recuperáveis são utilizados para calcular a constante elástica resiliente mesmo que a tensão de pico ou deformação recuperável não ocorra ao mesmo tempo em um teste dinâmico deste tipo. Mesmo negligenciando os efeitos de perda de energia, a resposta resiliente obtida dá um resultado satisfatório em cálculos de tensão e deformação (Barksdale *et. al.*, 1997). O ensaio de MR foi direcionado através das especificações da norma DNIT - ME 135/2018 - Pavimentação asfáltica - Misturas Asfálticas - Determinação do Módulo de Resiliência com o intuito de determinar a capacidade que um corpo elástico tem de armazenar energia, quando solicitado a um carregamento e, após, retornar ao seu estado inicial.

O equipamento para realização dos ensaios é a Universal Testing Machine UTM – 25. A câmara externa ao equipamento permite o controle da temperatura. A UTM – 25 possui um pistão que proporciona carregamento repetido pulsante acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz (BOEIRA, 2014). A Figura 33 ilustra o equipamento descrito e o posicionamento dos CP's para o ensaio.

Após o condicionamento à temperatura de 25°C por pelo menos 12h, o corpo de prova é colocado no suporte e posiciona-se os LVDTs, O módulo de resiliência é medido a partir da aplicação do carregamento repetido com tempo de 0,1s de duração e 0,9s de repouso. Dessa forma, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de dois LVDT's. A carga de ensaio adotada para os ensaios foi determinada sendo a maior possível que pudesse gerar deformação na amostra sem causar danos na mesma.

Os corpos de prova moldados para a determinação do MR tinham em torno de 6,3cm de altura e 10cm de diâmetro, devendo estar com um volume de vazios de $4\pm 1\%$. Posteriormente a este ensaio, os mesmos CP's foram destinados para a determinação da Resistência a Tração por Compressão Diametral. É possível, a partir da Figura 34, observar o procedimento do ensaio de módulo de resiliência realizado.

Figura 34 – Prensa UTM-25 e posicionamento dos CP's para o ensaio de MR



3.6.1.2. Módulo Complexo

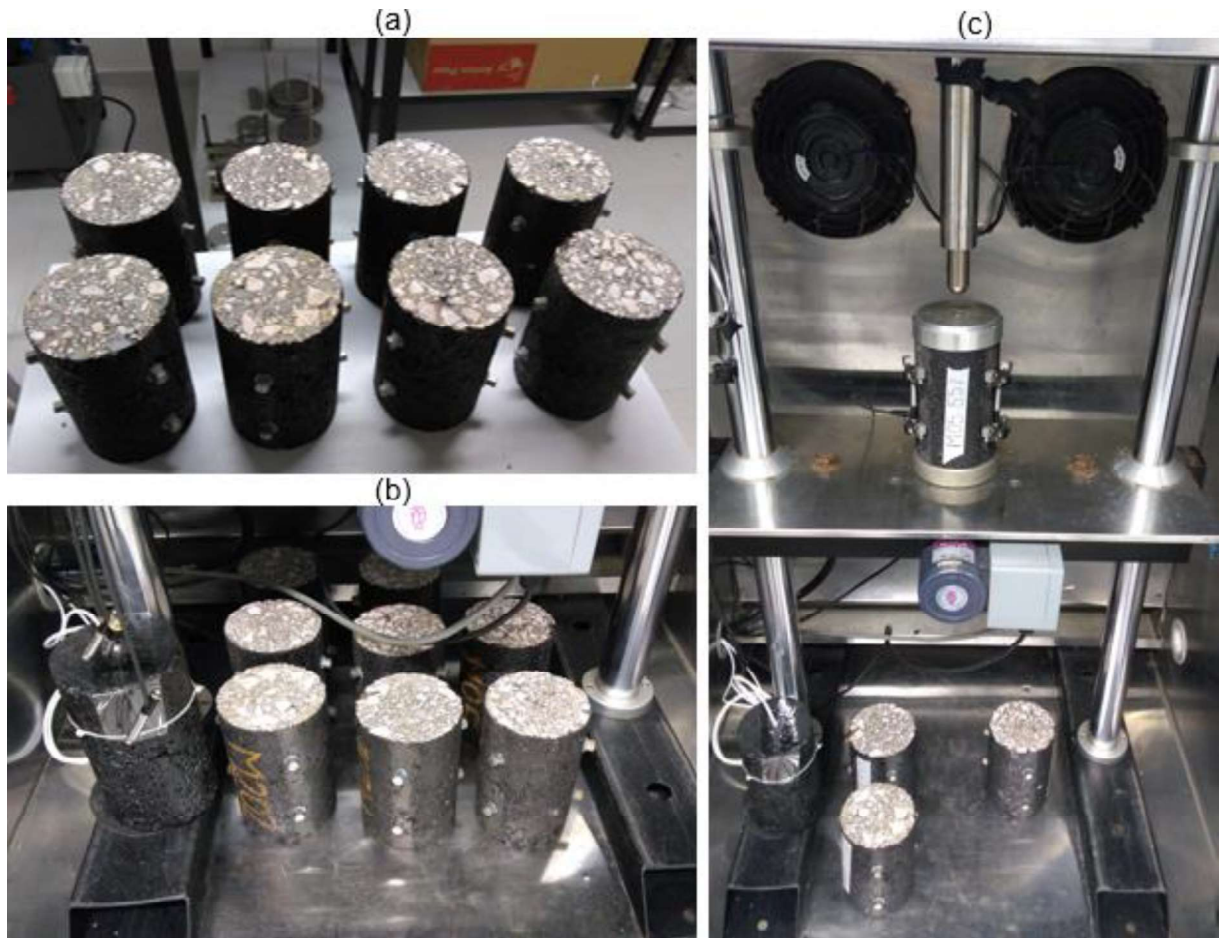
O módulo complexo vem sendo utilizado, na caracterização de misturas asfálticas, como uma alternativa ao módulo de resiliência, onde a análise dos dados provenientes deste ensaio envolve a geração de curvas mestras. Além disso, o módulo complexo e, em consequência, o módulo dinâmico, pode ser obtido através de ensaios ou modelos de previsão. Tais modelos correspondem a equações derivadas da análise estatística de valores obtidos, previamente, por meio de ensaio (BERNUCCI *et al.*, 2010).

O módulo complexo é utilizado para inferir as propriedades elásticas e viscoelásticas do material. O ensaio consiste em realizar uma varredura dos valores de módulo dinâmico e ângulo de fase em diferentes temperaturas e frequências. O módulo dinâmico ($|E^*|$) é o valor absoluto do módulo complexo, sendo este a relação entre as amplitudes de tensão e deformação. O módulo dinâmico visa contabilizar os efeitos da variação de temperatura e frequência e a defasagem entre a aplicação de carga e a resposta da amostra definida como ângulo de fase da mistura asfáltica (φ), o qual indica uma das propriedades viscosas do material (CAVALCANTI, 2010).

O ensaio foi baseado na norma AASHTO T 342-11 - Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures e consiste na aplicação de uma carga uniaxial compressiva senoidal em corpo de prova cilíndrico, confinado ou não.

O software UTS006 – SPT Dynamic Modulus Test disponibiliza uma gama maior de frequências em relação a norma AASHTO T 342-11 e o ensaio foi realizado em 25, 20, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,1 e 0,01Hz. Foram utilizadas as temperaturas de -10, 4, 21, 37 e 54°C, os corpos de prova utilizados no ensaio com dimensões de 10cm de diâmetro e 15cm de altura e condicionados de acordo com as recomendações expostas na Tabela 19. A deformação axial controlada foi fixada entre 50 e 75 microstrains, no intuito de buscar um regime de viscoelasticidade linear. Na Figura 35 está ilustrado o ensaio de E^* sendo realizado.

Figura 35 – Amostras moldadas (a), em condicionamento (b) e ensaio de E^* sendo realizado (c)



Fonte: autor, 2018.

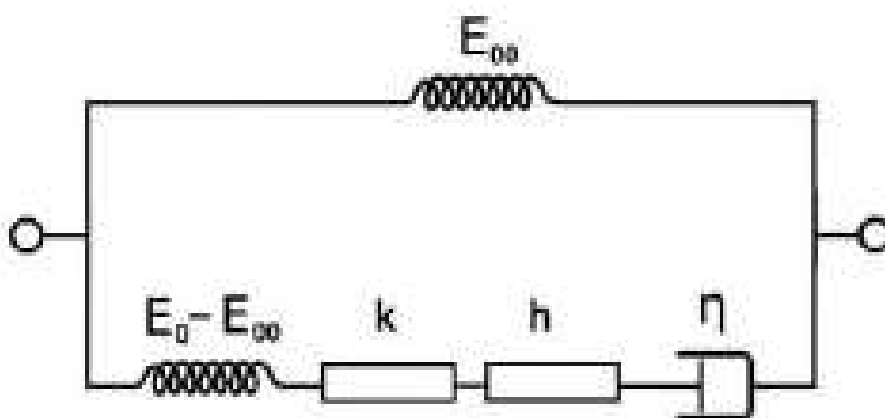
Tabela 19 – Tempo mínimo recomendado para equilíbrio de temperatura para amostras

Temperatura de ensaio (°C)	Tempo para equilíbrio de temperatura a partir da sala de ensaio de 25°C (h)	Tempo para equilíbrio de temperatura a partir de teste anterior (h)
-10	Uma noite	Uma noite
4	Uma noite	4h ou uma noite
21	1	3
37	2	2
51	3	1

Fonte: adaptado de AASHTO T 342, 2015.

Os resultados experimentais passaram por um processo de modelagem físico-matemática, com a qual se pode buscar diferentes características e comportamentos das misturas ensaiadas. Desenvolvido por Olard e Di Benedetto (2003), o modelo 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolics, 1 Dashpot) foi criado para representar o comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos. A Figura 36 demonstra o modelo 2S2P1D.

Figura 36 – Modelo 2S2P1D



Fonte: adaptado de Olard e Di Benedetto, 2003.

A partir do tratamento dos dados pela modelação em 2S2P1D, de acordo com o protocolo de Di Benedetto e Corté (2005), os resultados experimentais retirados diretamente do software UTS006 – SPT puderam ser expressos em curvas mestras de Módulo dinâmico e ângulo de fase, curvas no plano Cole Cole, Espaços Black, isotermas e isócronas.

O diagrama de Black, que é a representação do valor absoluto do Módulo Complexo (E^*) em função do ângulo de fase (ψ), analisa a relação entre estes dois resultados em diferentes temperaturas. Esta curva permite avaliar a zona onde acontece o aumento do ângulo de fase para elevadas temperaturas.

O gráfico Cole Cole é a representação dos resultados experimentais em escala aritmética da parte real (E_1) e a parte imaginária (E_2). Esta curva é semelhante a um arco de círculo e independe da frequência e temperatura do ensaio. Esta representação permite avaliar em que temperatura e frequência se tem a maior energia dissipada em cada ciclo de carregamento. Nestas regiões se avalia a realização de ensaios de fadiga.

As curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase permitem avaliar estas duas propriedades em diferentes temperaturas e frequências, sendo a segunda responsável pela orientação ao comportamento viscoso do material.

As curvas isócronas representam o módulo dinâmico em função da temperatura, em cada nível de frequência. Desta maneira há a possibilidade de verificar a suscetibilidade térmica das misturas asfálticas. Com as curvas isotermas é possível estimar a susceptibilidade à temperatura do asfalto, através da variação do módulo em função da variação da temperatura.

3.6.2. Ensaios de Adesividade/Coesão

Neste item, demonstra-se os ensaios de Lottman Modificado (efeito deletério da água em misturas asfálticas) e de Resistência ao Desgaste Cântabro, ensaios que avaliaram as propriedades de adesão e coesão de todas as misturas asfálticas estudadas.

3.6.2.1. Desgaste por Abrasão (Cântabro)

Bernucci *et al.* (2008) afirma que este ensaio tem o intuito de determinar a resistência à desagregação dos revestimentos asfálticos. O ensaio foi realizado de acordo com o especificado na norma DNER - ME 383/99 - Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - Ensaio Cantabro, a qual é baseada na norma espanhola NLT - 325/86 - Propuesta de Norma de Ensayo - Determinacion de la perdida por Desgaste de Mezeclas Bituminosas mediante el empleo de la Maquina de Los Angeles (Ensayo Cantabro), desenvolvida no Centro de Estudios Carreteras (CEC). Foram moldados 3 CP's com 64mm de altura e 100 de diâmetro com $4\% \pm 1\%$ de vazios para cada um dos projetos analisados. Conforme a norma supracitada, as amostras foram submetidas a 300 revoluções. Na Figura 37 estão evidenciados o tambor Los Angeles e o resultado depois do desgaste nos corpos de prova.

Segundo a norma DNER - ES 386/99, o valor máximo de perda de massa aceitável, para misturas asfálticas porosas, com asfalto polímero, é de 25%. Para cada teor de ligante, o desgaste deve ser realizado a partir da média de três corpos de prova, no qual o valor individual de cada um não deve ser superior a 20% do valor médio, de acordo com DNER - ME 383/99.

Figura 37 – Ensaio de Desgaste Cântabro: tambor (a) e amostras após ensaio (b)



Fonte: autor, 2018.

3.6.2.2. Dano por Umidade Induzida (Lotmann Modificado)

Este ensaio visa avaliar a propriedade de sensibilidade a ação da água entre ligante asfáltico e agregados considerando o efeito deletério da água, a longo prazo. Destaca-se a importância deste parâmetro, pois afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos, uma vez que o dano por umidade evidencia os possíveis problemas de adesividade e coesão do agregado com o ligante asfáltico (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O ensaio foi realizado conforme as especificações da norma DNIT 180/2018 ME – Pavimentação - Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida – Método de ensaio utilizada em corpos de prova de misturas asfálticas moldados em laboratório com volume de vazios de $7\% \pm 1\%$, resultantes de saturação e de condicionamento acelerado em presença de água. Um primeiro conjunto de três corpos de prova foi submetido ao ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral conforme DNIT 136/2018 – ME (RT_1), enquanto um segundo grupo foi saturado (entre 50 e 80%) através de vácuo na faixa de 13 a 67 kPa de pressão absoluta (Figura 38-a).

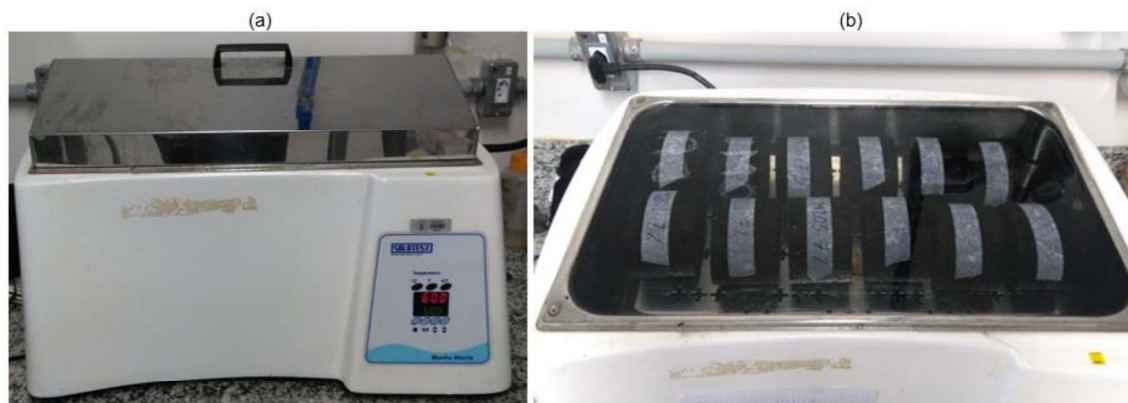
Figura 38 – Saturação (a) e preparo para congelamento (b) no primeiro grupo de amostras



Fonte: autor, 2018.

Após esse procedimento, o corpo de prova foi embalado em filme plástico (Figura 38-b) com 10 ml de água e levado a um sistema de resfriamento a temperatura em -18°C (± 3), por um tempo de, no mínimo, 16h. Em seguida, os corpos de prova foram levados a banho-maria a 60°C por 24 h (± 1 h) (Figura 39-a). Concluído este processo, os mesmos foram submetidos à submersão em banho de água a 25°C ($\pm 1^{\circ}\text{C}$), por 2 a 3 horas (Figura 39-b).

Figura 39 – Processos de banho-maria necessários ao ensaio de dano por umidade induzida



Fonte: autor, 2018

Após a retirada do segundo processo de banho-maria, os corpos de prova são submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT_2). A relação RT_2/RT_1 indica, indiretamente, a perda de resistência por umidade induzida. Esta relação deve ser maior que 0,70, ou seja, possuir perda de resistência menor

que 30%. Na metodologia Superpave, o valor desta relação sobe para 0,80. Esta relação de resistência em porcentagem é denominada de Resistência à Tração Retida (RRt).

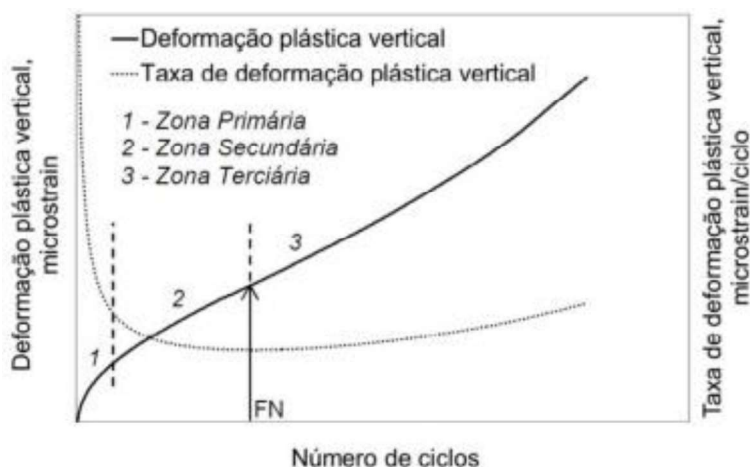
3.6.3. Ensaios de Danificação das Misturas

Nesta seção serão descritos os ensaios que avaliam as características após dano causado em amostras. Flow Number, Resistência a Tração por Compressão Diametral e Fadiga a Tração-Compressão foram os ensaios realizados para esta determinação.

3.6.3.1. Flow Number

Este ensaio foi conduzido a uma temperatura constante de 60°C, com um carregamento aplicado de 204kPa durante 0,1s e com repouso de 0,9s. Na zona primária, ocorre uma deformação a uma velocidade elevada, posteriormente a deformação mantém-se constante – deformação secundária – e a falha do material acontece na zona terciária, onde a velocidade de deformação cresce rapidamente (Figura 40). Salienta-se que para a análise da deformação permanente, a definição do Flow Number (FN), indica o início da zona terciária e quanto maior seu valor maior será a capacidade da mistura em resistir a deformação permanente.

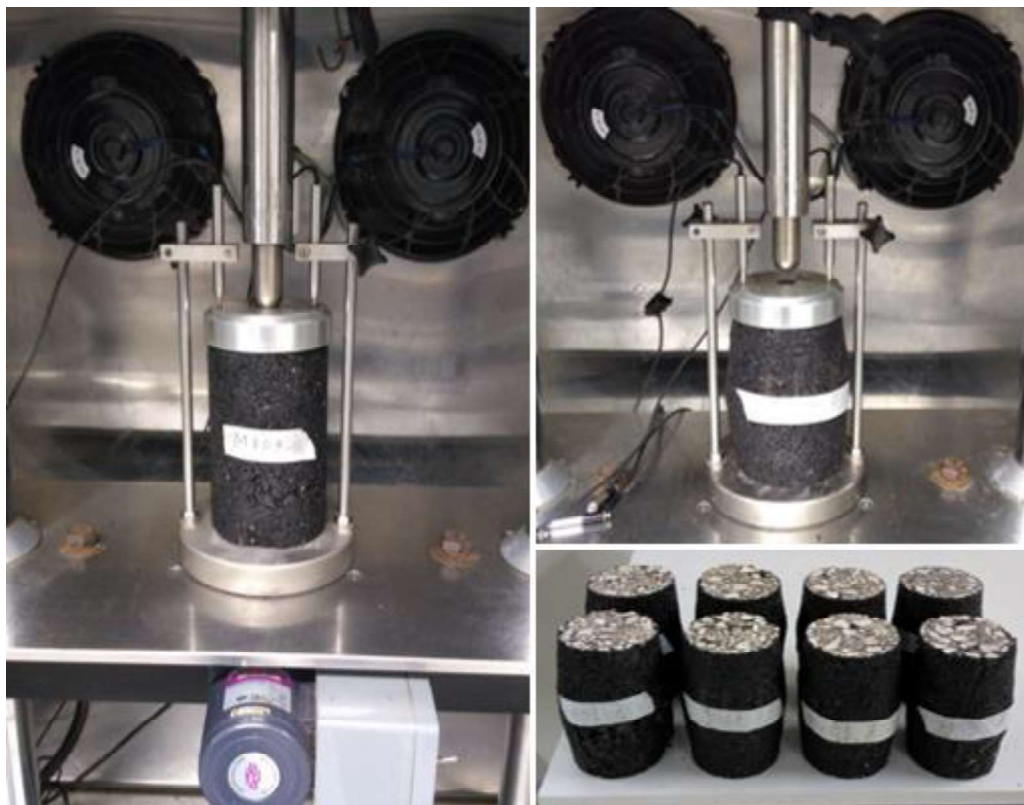
Figura 40 – Regiões da curva de deformação plástica e obtenção do FN



Por outro lado, é necessária a verificação da inclinação da reta da zona secundária, pois em conformidade com a metodologia do ensaio, uma mistura terá uma boa resistência a deformação permanente se apresentar pequenas inclinações na zona secundária e um elevado FN, ou seja, um longo período de ensaio (WITCZAK *et al.*, 2002).

Para avaliar a resistência das misturas asfálticas às deformações permanentes foi realizado o ensaio de Flow Number (FN). Os corpos de prova necessários ao ensaio foram moldados com 160mm de altura, 100mm de diâmetro com um volume de vazios de $7\pm 1\%$. Após os mesmos foram retificados para que a sua altura seja mantida em $150\pm 2\text{mm}$, de acordo com especificações da norma AASHTO TP 79-15 - Standard Method of Test for Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT). Na Figura 41 estão ilustrados o ensaio sendo realizado e os resultados com os CP's rompidos.

Figura 41 – Ensaio de Flow Number sendo realizado



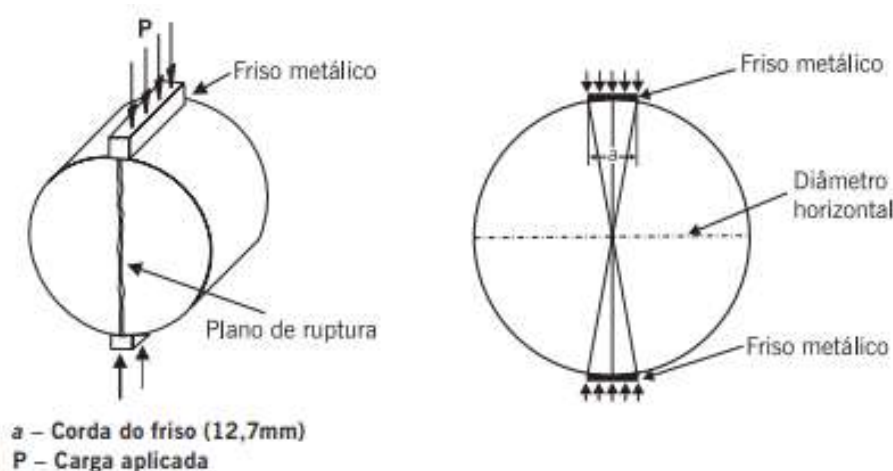
Fonte: autor, 2018.

3.6.3.2. Resistência a Tração por Compressão Diametral

Desenvolvido pelo professor Lobo Carneiro (1943) inicialmente para misturas de concreto de cimento Portland, este ensaio determina através da compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, de maneira indireta, a Resistência a Tração. Tornou-se popular pela facilidade e rapidez de execução e também pelo fato de utilizar o mesmo corpo de prova cilíndrico e o mesmo equipamento usado para a obtenção da resistência à compressão do concreto de cimento Portland.

O ensaio foi realizado de acordo com o que preconiza a norma do DNIT 136/2018 – ME – Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio, que consiste na aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro. Anteriormente a aplicação da carga, o corpo de prova foi apoiado sobre uma geratriz em compartimento com temperatura controlada de 25°C por um período de no mínimo 4 horas. A aplicação das forças se dá através de frisos metálicos de 12,7mm de largura com curvatura adequada ao corpo de prova produzindo tensão de tração ao longo do diâmetro vertical solicitado até que a mesma se iguale a tensão de tração admissível provocando o seu rompimento (BERNUCCI *et al.*, 2008). Na Figura 42 se encontra o esquema do ensaio.

Figura 42 – Demonstração esquemática do ensaio de compressão diametral



Fonte: Bernucci *et al.*, 2008.

Para cada projeto avaliado foram utilizados 3 corpos de prova de 64mm de altura e 100mm de diâmetro com volume de vazios de $4\% \pm 1\%$, os mesmos utilizados no ensaio de MR e a realização deste ensaio se utilizou de prensa Marshall, conforme evidenciado na Figura 43.

Figura 43 – Ensaio de Resistência a Tração por compressão diametral sendo realizado



Fonte: autor, 2018

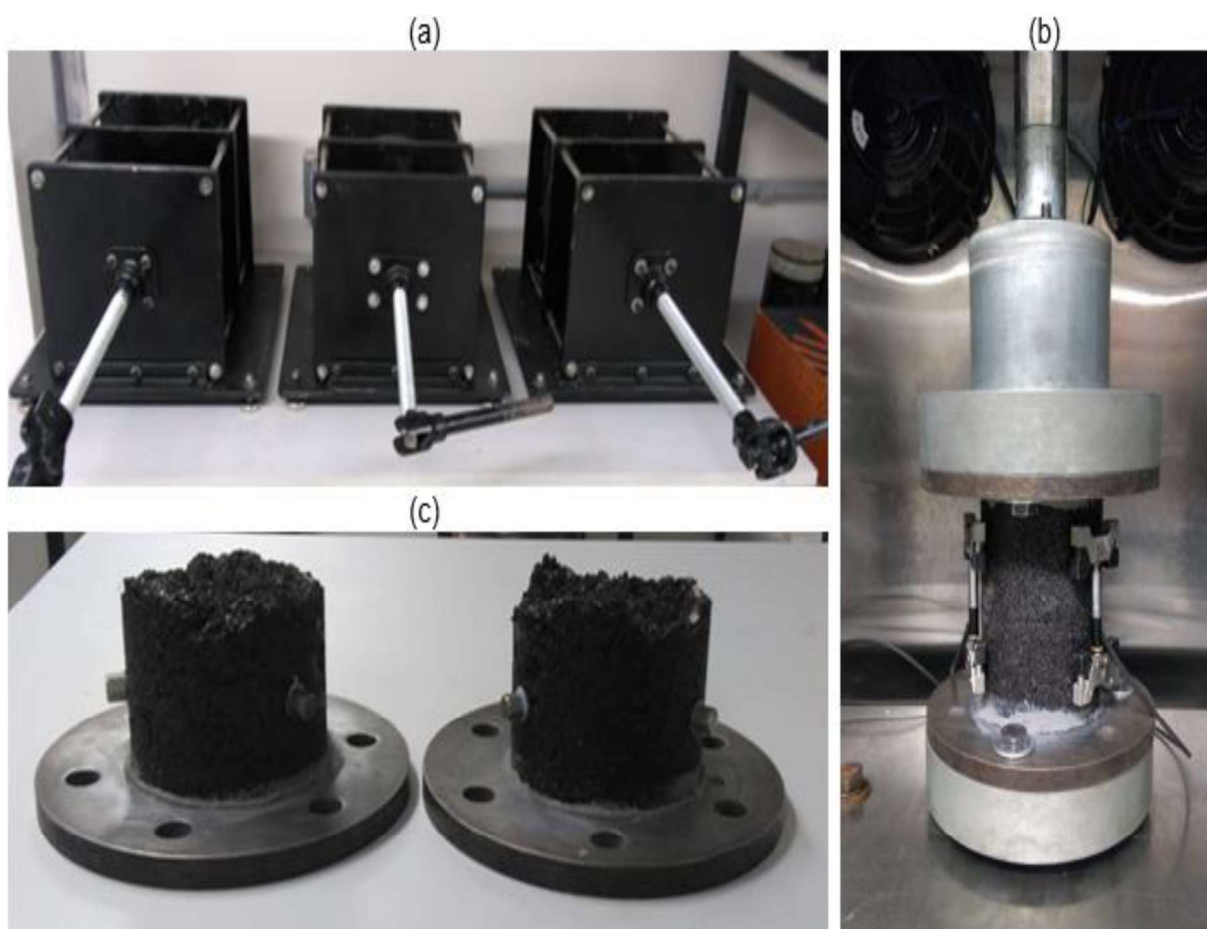
3.6.3.3. Fadiga a Tração-Compressão (Ensaio Uniaxial Cíclico)

O ensaio uniaxial cíclico de fadiga a tração-compressão consiste na aplicação de uma deformação cíclica senoidal de amplitude constante em corpos de prova cilíndricos, até o colapso da amostra. Durante o ensaio, são obtidos os dados de deformação, de carga, o ângulo de fase e o módulo dinâmico.

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, que consiste em aplicar no corpo de prova uma deformação cíclica senoidal, de amplitude constante, até que ocorra a ruptura ou a defasagem do ângulo de fase. As amostras foram moldadas no compactador giratório Superpave com dimensões de 100 x 160mm e um volume de vazios de $5,5\% \pm 0,5\%$. Após a moldagem, realizou-se o corte e a retificação das superfícies, ficando as amostras com as dimensões finais de 100 x 130 ($\pm 2\text{mm}$). Após a retificação dos

CP's, são coladas as placas top e down. A colagem demanda o tempo 20 horas, utilizando-se cola de baixa plasticidade e alta resistência. Após este processo, as amostras são condicionadas, por no mínimo 3h, na temperatura de 19°C para o início do ensaio na UTM-25. A Figura 44 evidencia a realização do ensaio de Fadiga a Tração-Compressão. Este ensaio foi implementado no GEPPASV/UFSM por Boeira (2014) e já utilizado por Paniz (2018) e Schuster (2018).

Figura 44 – processo de colagem das placas (a), ensaio sendo realizado (b) e um corpo de prova após a realização do ensaio (c).



Fonte: autor, 2018.

De posse dos resultados do ensaio, uma avaliação pelo software LVECD foi realizada, levando a conclusões mais assertivas quanto ao comportamento das misturas, abrangendo situações reais de tráfego e clima. Além disto, a avaliação de viabilidade econômica, discutida e analisada no item 4.2.4, também foi realizada a partir dos resultados do ensaio de Fadiga a Tração-Compressão.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

As atividades relacionadas a implementação da usina e atividades realizadas em campo, bem como os ensaios realizados e os resultados encontrados para as duas frentes de pesquisa serão desenvolvidas neste capítulo. Destaca-se aqui, o desencadeamento das etapas necessárias à gestão do RAP utilizado até a usinagem propostas das misturas recicladas. Na sequência serão abordados os resultados relacionados às propriedades de deformabilidade, danificação, adesão/coesão das misturas asfálticas estudadas e também uma análise de custos das estruturas de pavimento propostas.

4.1. PROCEDIMENTOS DE CAMPO

Um dos objetivos da presente pesquisa foi acompanhar os procedimentos de gestão no pátio da usina, beneficiamento dos materiais coletados em campo, bem como a adaptação da usina para o recebimento do material fresado. Nos próximos itens estarão relatados os resultados encontrados relacionados aos processos relacionados a parte desenvolvida em campo.

4.1.1. BENEFICIAMENTO, ESTOCAGEM DO RAP E PREPARO DA USINA

Conforme descrito no item do referencial teórico, a gestão no momento da coleta, o controle do beneficiamento e estoque do material fresado são muito importantes para reciclagem de maior percentual de RAP e é condicionante para melhores resultados de desempenho das misturas recicladas quando da usinagem e aplicação em campo.

Foram realizadas etapas de controle deste material antes de sua inserção na usina e elaboração dos projetos. Em um primeiro teste realizado, o material fresado foi peneirado em uma “grelha” de diâmetro $\frac{3}{4}$ ” com o intuito de enquadrar todas as granulometrias dentro da faixa “C” das diretrizes da norma DNIT ES 031/2006. Na Figura 45 está ilustrado o método utilizado para a separação das frações do RAP em agregado graúdo (retido na $\frac{3}{4}$ ” e não utilizado) e miúdo (todo o material passante na grelha $\frac{3}{4}$ ”).

Os projetos de misturas asfálticas recicladas iniciais para este teste foram elaborados, teoricamente, apenas para verificar as condições da usina no processo de mistura e sobreaquecimento dos materiais agregados no secador. Foram realizados ensaios de granulometria, teor de ligante asfáltico e de umidade do RAP do material passante na grelha para a correta moldagem dos traços e verificação do enquadramento nas normativas vigentes.

Figura 45 – Processo de separação das frações do RAP: vista inferior (a) do peneiramento e posicionamento da carregadeira (b)



Fonte: autor, 2018.

O material passante na grelha ainda possuía alguns grumos, dificultando o enquadramento das misturas nas especificações de concreto asfáltico do DNIT, mas o teste de usinagem prosseguiu em virtude da possibilidade de a usina conseguir processar as misturas, tanto na quebra das partículas aglomeradas quanto pelo completo envolvimento do ligante novo nos agregados e RAP adicionados. Deste modo se poderia homologar ou não o procedimento para a usinagem final.

Na sequência, foi preparado um montante do material fresado passante na grelha $\frac{3}{4}$ " e iniciado o processo de usinagem. Na mistura com incorporação de 10% de RAP o procedimento de mistura ocorreu de maneira normal sem prejuízos no âmbito da homogeneização da mistura e envolvimento dos agregados. Esta mistura não demonstrou diferença, visualmente, em comparação com a mistura de referência, sem fresado.

Ao aumentar o percentual de RAP, as misturas produzidas começaram a demonstrar algumas alterações ao esperado. Em um primeiro momento (no processamento da mistura com 20% de RAP), grumos começaram a aparecer no produto final, identificando uma certa ineficiência do misturador ao processar tamanha

quantidade de material fresado em tamanho inapropriado à curva granulométrica proposta para o estudo.

Na sequência do procedimento das misturas, quando da usinagem da mistura com 30% de material fresado, verificou-se, além da já citada anteriormente, outra inadequação na mistura produzida. O ligante asfáltico virgem adicionado não envolveu a mistura de agregados e RAP por completo, verificando-se assim a necessidade de melhoramento no procedimento de beneficiamento do material fresado ou até mesmo no processo de usinagem. Na Figura 46 estão detalhados alguns pontos de inadequação apresentados nas misturas.

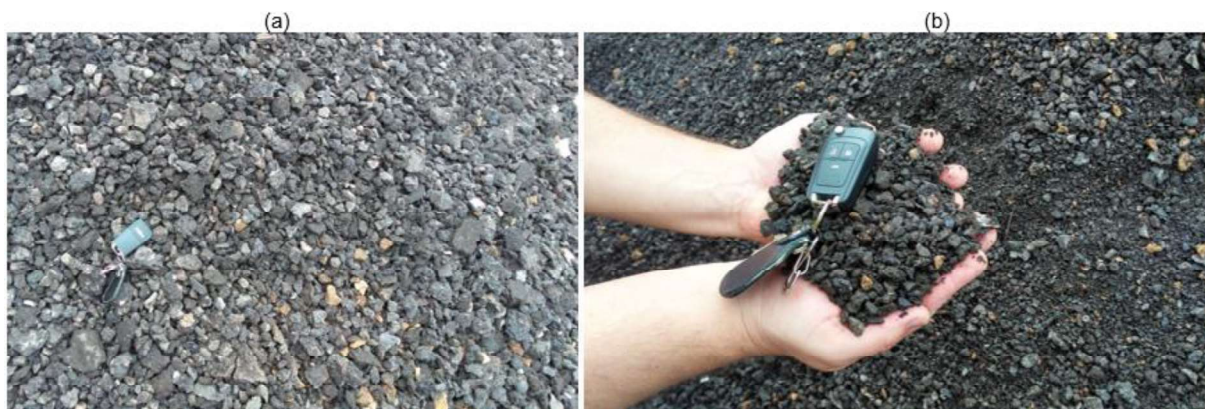
Figura 46 - Falta de envolvimento de ligante (a) e grumos nas misturas produzidas (b)



Fonte: autor, 2018.

Na necessidade de homologação da proposta de usinagem com RAP, verificou-se a necessidade de modificações. Para o melhoramento do beneficiamento do RAP, uma peneira de malha quadrada de diâmetro 3/4", ao invés da grelha unidirecional, foi adicionada a estrutura utilizada anteriormente para o peneiramento. O material resultante deste segundo processo de peneiramento se mostrou bastante aplicável à metodologia estabelecida (Figura 47).

Figura 47 – Material retido (a) e passante (b) na peneira de malha $\frac{3}{4}$ "



Fonte: autor, 2018.

Neste segundo processo de peneiramento, em torno de 70 a 80% do RAP recolhido nos serviços de conservação do trecho pôde ser aproveitado e, para percentuais maiores, a britagem do RAP se torna necessária. Assim, partiu-se para um segundo teste de usinagem das misturas recicladas, a homologação do processo foi concluída e as misturas se comportaram adequadamente.

Para a usinagem final, foram peneiradas, aproximadamente, 150 toneladas de RAP e, para manter a homogeneidade e qualidade do material, este foi estocado em base impermeável, construída também em concreto asfáltico, e protegido contra intempéries e contaminação de outros materiais pétreos e argilosos. A Figura 48 demonstra o local determinado para armazenamento do RAP

Figura 48 – Local para armazenamento do RAP: preparação do local (a) e material fresado coberto (b)



Fonte: autor, 2018.

Para os testes e usinagem final das misturas, foram realizadas as implementações do silo e correia transportadora para o RAP. Os pés do silo foram adaptados para a correta altura na saída da correia transportadora e com auxílio de uma escavadeira hidráulica, o silo foi posicionado (Figura 49).

De acordo com o indicado na metodologia da presente pesquisa, o silo precisou ser instalado a uma posição não perpendicular à usina. Verificou-se que esta situação não comprometeu a frequência de entrada de RAP no misturador, o processo de homogeneização e mistura com agregados e ligante asfáltico, a alimentação do próprio silo dosador, a produção esperada de concreto asfáltico no final do processo, bem como a qualidade desejada.

Figura 49 – Instalação (a) e posicionamento do silo alimentador de RAP em relação a usina (b)



Fonte: autor, 2018.

Devido ao posicionamento não perpendicular do silo dosador de RAP, um ajuste na entrada do misturador precisou ser realizado: uma calha metálica ao final da correia transportadora de RAP direcionava o material fresado diretamente ao misturador. Esta estrutura permitiu a vazão de material fresado dentro do misturador da usina de maneira suave, garantindo um fluxo contínuo de incorporação de RAP e evitando perdas de material pela altura de queda. Na Figura 50 encontram-se o detalhe da abertura realizada na parte superior do misturador (a) e a calha instalada no final da correia transportadora (b).

Figura 50 – Detalhe da entrada do RAP: abertura superior (a) e calha instalada no final da correia (b)



Fonte: autor, 2018.

No momento da usinagem, a alimentação do silo de RAP foi realizada com uma escavadeira hidráulica (Figura 51). Cabe ressaltar que a entrada de RAP na usina não foi automatizada, e a vazão deste material foi calculada através da velocidade da correia transportadora e a abertura dosadora na saída inferior do silo, conhecendo-se a massa de material em 1 metro linear da correia.

Figura 51 – Alimentação do silo de RAP



Fonte: autor, 2018.

O restante do procedimento de usinagem foi realizado de maneira tradicional, procurando se manter os limites de sobreaquecimento dos agregados e temperatura final de misturas, as faixas especificadas para as composições granulométricas e inserção de teores ótimos de ligante asfáltico encontrados nas dosagens dos projetos.

4.1.2. CONTROLE TECNOLÓGICO DAS AMOSTRAS USINADAS

Em fechamento à avaliação do controle tecnológico das misturas usinadas, estas, após coletadas, foram levadas a laboratório e, além dos ensaios destacados na metodologia desta pesquisa, ensaios de extração para a determinação do teor de ligante (com a utilização de forno NCAT) foram realizados com o intuito de facilitar o entendimento e comportamento dos resultados obtidos nos ensaios de deformabilidade, danificação e adesão/coesão, bem como a avaliação da performance da implementação do silo dosador e correia transportadora de RAP utilizados. Na Tabela 20 estão dispostos os valores médios, de 9 amostras, encontrados de teor de ligante para cada um dos projetos avaliados.

Tabela 20 – Teor de ligante obtido depois do processo de usinagem

Projeto	Teor de ligante novo inserido	Teor de ligante final esperado	Teor de ligante obtido após usinagem	Erro Absoluto	Diferença
M0	5,65%	5,65%	5,01%	0,64%	-11,33%
M10	5,30%	5,58%	4,89%	0,69%	-12,37%
M20	4,85%	5,51%	4,87%	0,88%	-11,62%
M30	3,87%	5,44%	5,39%	0,05%	-0,92%

Fonte: autor, 2018.

Verifica-se que, a partir da análise dos teores de ligante asfáltico encontrados nas misturas, excetuando-se a com 30% de material fresado, estas não se enquadraram no teor ótimo de projeto esperado. A calibração da própria usina volumétrica, a inserção inadequada de ligante asfáltico e a não total eficiência do processo de mistura podem ser causas deste comportamento. Não se pode afirmar se há ou não reutilização do ligante asfáltico envelhecido presente no RAP. Isto reflete em algumas verificações que precisam ser realizadas no momento da análise dos

resultados dos ensaios mecânicos, principalmente, nos que inferem o comportamento à fadiga e deformação permanente das misturas.

Para a M0 e M10, verificou-se que o teor de ligante inserido é maior que o resultante após a usinagem. Pode-se concluir que isto se deve ao fato da possibilidade de calibração inadequada da usina nos processos de inserção de ligante, das umidades de agregados e RAP, bem como o aquecimento dos agregados e CAP. É necessária uma avaliação mais detalhada para uma conclusão definitiva do processo. Já para a mistura com 20% de RAP, nota-se a continuidade no teor após a usinagem. Verifica-se que, neste momento da usinagem, o processo já tem um certo fluxo de saída de misturas. Por outro lado, o teor final esperado, somando-se o percentual pertencente ao material fresado, ficou mais de 10% abaixo do planejado. Novamente, não se tem uma afirmativa sobre a reativação do ligante envelhecido do RAP. Para as três misturas citadas, nota-se que os resultados encontrados obtiveram uma discrepância de mais de 10% do esperado inicialmente. Assim, verifica-se a necessidade de estudos mais aprofundados do método de inserção e beneficiamento do RAP, bem como os métodos tradicionais de usinagem, como, por exemplo, a eficiência do misturador.

Na M30, por sua vez, as expectativas inicialmente previstas foram confirmadas, sendo o teor total de ligante asfáltico encontrado, praticamente, o mesmo projetado. Este aumento de teor de ligante encontrado nas últimas misturas pode estar ligado ao fato de a usina já estar em um processo produtivo contínuo, eficiente processo de mistura e um fluxo constante adequado na entrada dos materiais agregados e fresado.

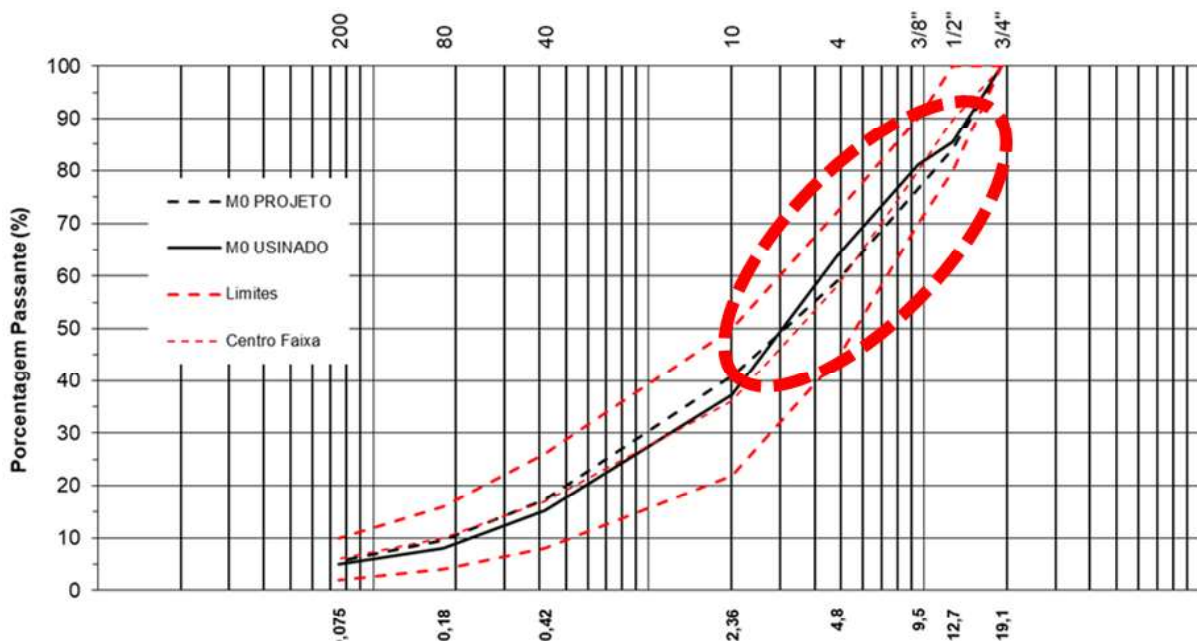
Nota-se que há a possibilidade de utilizar a proposta de usinagem de misturas com RAP, mantendo as características do projeto proposto e propiciando a economia de ligante asfáltico, insumo que sofreu sucessivos aumentos de preço nos últimos anos, em relação ao projeto de referência, sem fresado. Quando se relaciona os projetos M0 e M30, esta economia pode chegar a, aproximadamente, 28%. Esta última constatação é importante, pois comprova a viabilidade do método proposto, mesmo possuindo inconstâncias no momento da produção, o que está intrínseco ao processo de campo, os quais podem ser controlados.

Os controles relacionados aos processos de campo precisam ser intensificados, pois a variabilidade em uma usina volumétrica é bastante grande e a qualidade do material produzido está diretamente relacionada à gestão dos insumos necessários a elaboração e produção das misturas. A verificação do misturador da

usina (pás, tempo e temperatura de mistura), da umidade dos materiais de entrada – agregados britados, filler (se houver), RAP –, do fluxo de entrada de ligante asfáltico nas misturas (entupimento de válvula, viscosidade adequada), da temperatura de aquecimento de agregados (cuidado com o superaquecimento e oxidação de CAP) são alguns itens que precisam ser avaliados e podem garantir o adequado processo de produção de misturas. Além destas, o fluxo de correias de transporte de materiais, células de carga, sistema de automação, bem como os filtros de mangas também devem estar em perfeito funcionamento.

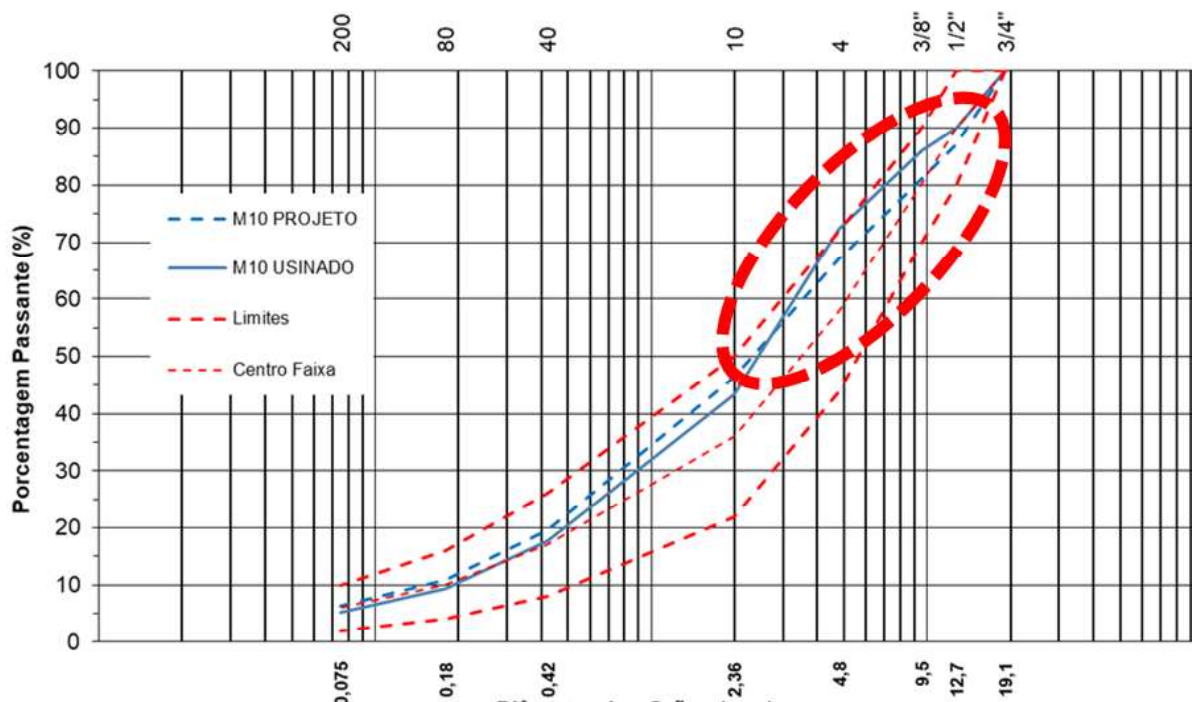
Após a extração de teor de ligante asfáltico, as curvas granulométricas das amostras também foram avaliadas. Das Figuras 52 a 55 estão ilustradas as curvas granulométricas encontradas após a usinagem e a projetada inicialmente nas dosagens das misturas, ambas realizadas após a extração de ligante. Verifica-se que, para todas as misturas, o comportamento das curvas se manteve, apenas a encontrada após a usinagem se tornando, principalmente, para as misturas com adição de RAP, um pouco mais fina entre as peneiras de nº10 a 3/4. Já para a M0, este comportamento não pode ser observado, já que, ora a curva projetada tem menores porcentagens passantes (entre nº10 e nº 200) ora maiores (entre nº 10 e 3/4), mas as duas muito próximas ao centro da faixa da especificação.

Figura 52 – Curva granulométrica: M0 projetado e após a usinagem



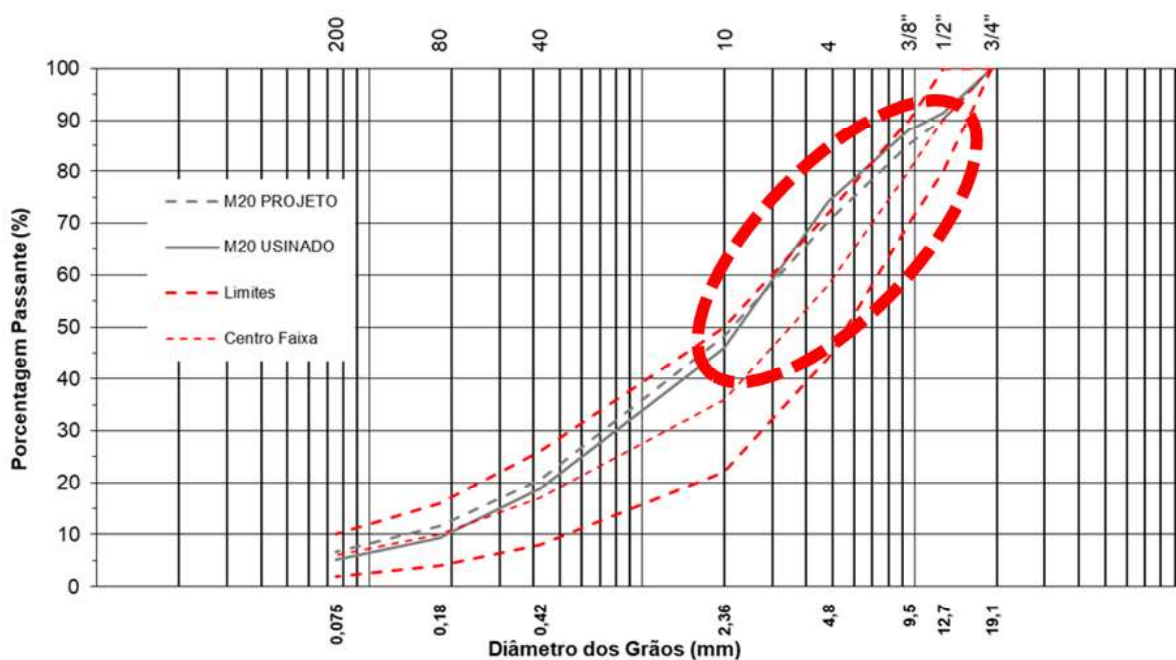
Fonte: autor, 2018.

Figura 53 – Curva granulométrica: M10 projetado e após a usinagem



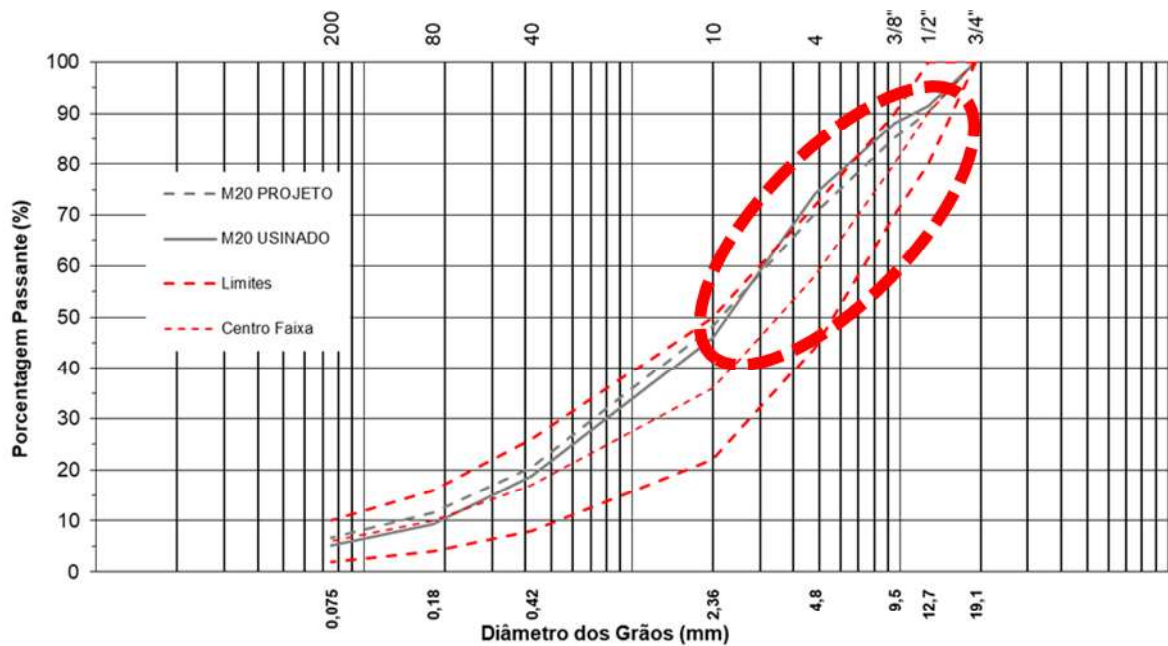
Fonte: autor, 2018.

Figura 54 – Curva granulométrica: M20 projetado e após a usinagem



Fonte: autor, 2018.

Figura 55 – Curva granulométrica: M30 projetado e após a usinagem



Fonte: autor, 2018.

Verifica-se que todas as misturas contendo RAP, entre as peneiras de diâmetro 3/8" e a nº 10 estão no limite máximo de porcentagem passante, sendo a M20 e M30 um pouco acima das tolerâncias impostas pela especificação (DNIT ES 31/2006). Isto demonstra, mais uma vez, a importância do correto controle de estoques de RAP anteriormente a entrada deste na usina. A possibilidade do uso de destorroamento e separação do material fresado em mais frações de utilização em projeto são as principais linhas de estudo para a adequação da granulometria das composições finais pós-usinagem.

O método proposto é simplificado e a adaptação da usina volumétrica para a incorporação de RAP se mostrou viável e, apenas alguns ajustes são necessários para a confirmação da eficácia de todo o processo. Verificou-se que, por mais de uma vez, os procedimentos relacionados ao RAP anteriores ao processo de usinagem em si são relevantes para o andamento correto de todas as etapas propostas. A umidade do RAP está relacionada diretamente com a capacidade produtiva da usina, a separação das frações do material fresado possibilita a trabalhabilidade da curva granulométrica das misturas e adequação à especificação utilizada, bem como o percentual e tipo de ligante asfáltico utilizados permitem a escolha da utilização ou não de rejuvenescedores para a reativação total ou parcial do CAP envelhecido.

4.2. ENSAIOS LABORATORIAIS PARA DETERMINAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DAS MISTURAS

Neste item da análise serão descritos os resultados encontrados nos ensaios realizados em laboratório. Pode-se destacar os ensaios de Módulo de resiliência e complexo, Resistência a Tração por Compressão Diametral, Fadiga a Tração-Compressão, bem como os que avaliaram as condições de adesão/coesão das misturas, Desgaste Cântabro e Dano por Umidade Induzida.

4.2.1. Ensaio de Deformabilidade

Para avaliação desta propriedade das misturas asfálticas foram utilizados os ensaios de módulo de resiliência (MR), que avalia as misturas em seu comportamento elástico e o Módulo Complexo (E^*), que se analisa a rigidez no domínio viscoelástico linear das misturas.

4.2.1.1. Módulo de Resiliência

Os dados de MR foram extraídos do software UTS003 (Indirect Tensile Modulus Test) através da UTM – 25. O resumo dos resultados, desvio padrão e coeficiente de variação para as amostras ensaiadas encontram-se na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultados de MR à frequência de 1 Hz de carregamento

Projeto	MR (0°)			MR (90°)			MR médio		
	MR (MPa)	DP	CV	MR (MPa)	DP	CV	MR (MPa)	DP	CV
M0	8238	515	6,27%	9570	795	8,26%	8904	655	7,27%
M10	9092	573	6,32%	9439	679	7,15%	9266	626	6,74%
M20	9308	569	6,00%	12732	1367	10,90%	11020	968	8,45%
M30	9114	660	7,30%	10774	899	8,47%	9944	780	7,89%

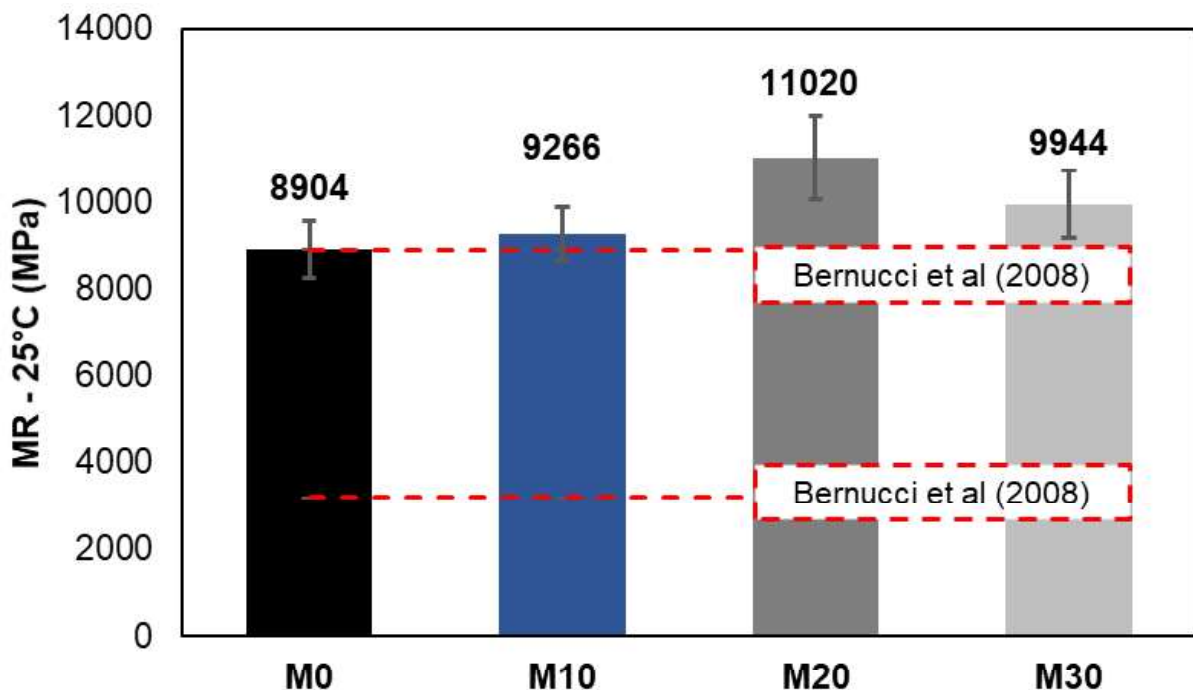
Fonte: autor, 2018.

Ao verificar os resultados expostos na Tabela 21, verifica-se que o valor de módulo de resiliência sofre um acréscimo conforme aumenta-se o teor de material fresado incorporado à mistura, excetuando-se a relação entre a M20 e M30, onde

nota-se um pequeno decréscimo no valor médio do parâmetro. Esta pequena queda no valor no Módulo de Resiliência pode estar associada ao maior teor de ligante total final encontrado na mistura com 30% de fresado, a tornando menos rígida quando em comparação a M10 e M20. Ainda, se avaliado os desvios padrões das misturas, pode-se dizer que os valores de MR das misturas M20 e M30 possuem uma semelhança bastante significativa.

Em função do comportamento, avalia-se, de acordo com o esperado, que há um aumento de rigidez com o incremento de RAP as misturas asfálticas convencionais. Isto pode estar relacionado ao ligante envelhecido presente no RAP. 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 (Figura 56). Destaca-se que todas as misturas avaliadas nesta pesquisa se encontram com valores de MR acima ao máximo usualmente encontrado nas misturas asfálticas brasileiras.

Figura 56 – Resultados obtidos de Módulo de Resiliência



Fonte: autor, 2018.

Centofante (2016) analisou misturas recicladas à quente produzidas em laboratório, com adição, também de RAP nos percentuais de 10, 20 e 30%, em massa

da mistura final. O material fresado utilizado possuía ligante convencional (CAP 50-70), assim como o ligante inserido. Os valores de MR obtidos se enquadraram na faixa de, aproximadamente, 5000 a 7500 MPa. A mesma relação de aumento de MR pôde ser analisada conforme a maior incorporação de RAP a mistura.

Em misturas avaliadas por Bonh (2017), o comportamento do MR para amostras com material fresado se assemelha ao encontrado nesta pesquisa, crescendo com a maior inserção de RAP. Na avaliação de misturas com CAP convencional, os resultados obtidos se encaixaram na faixa de 9500 a 13000 MPa, enquanto as misturas com CAP modificado por polímero (60/85) estes valores se aproximaram do intervalo de 9900 a 14200 MPa.

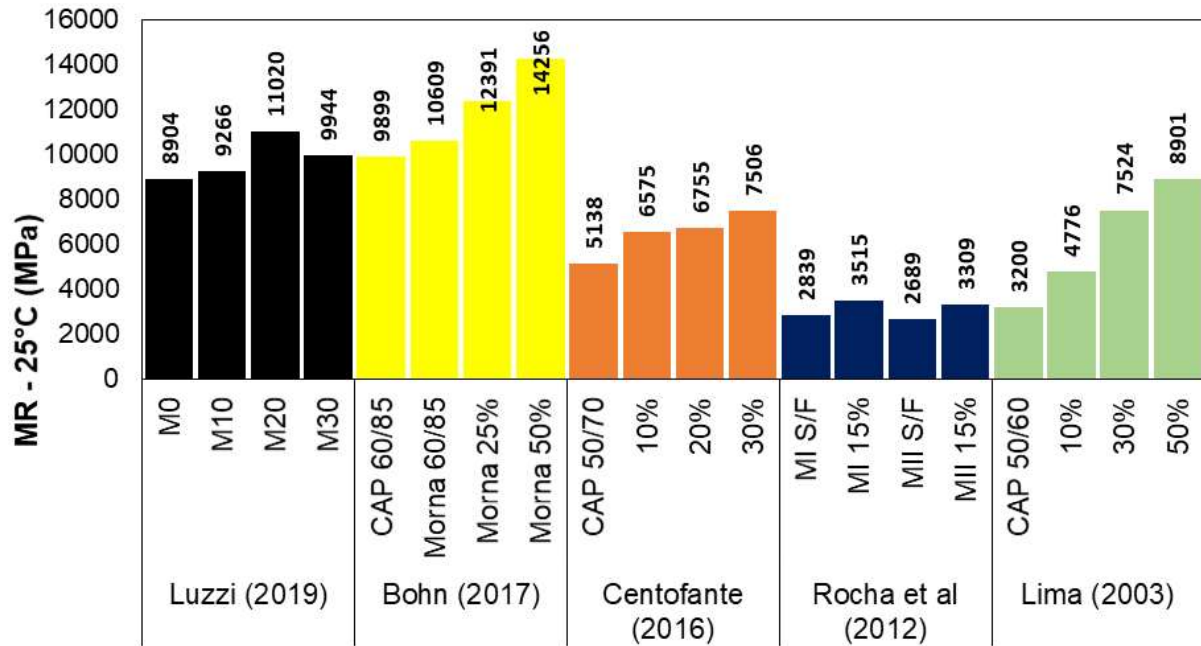
Rocha *et al.* (2012) estudou misturas com adição de 15% de fresado em duas composições granulométricas da faixa C da norma DNIT ES 031/2006. O ligante utilizado nas composições das misturas era o convencional, 50/70. O MR obtido para as misturas se enquadrou dentro da faixa de 2500 a 3500 MPa. Os resultados demonstraram para as duas misturas analisadas que o MR sofreu um acréscimo pouco maior que 20% com a adição de fresado. Ainda, Lima (2003), relata valores de módulo de resiliência encontrados para misturas recicladas utilizando até 50% de material fresado, na faixa de 3200 a 8000 MPa. O gráfico exposto na Figura 57 compara os resultados de módulo de resiliência descrito nas pesquisas citadas. Verifica-se o acréscimo de rigidez com a incorporação de RAP e as diferenças encontradas na utilização de ligante modificado por polímero e o convencional.

O efeito no módulo de resiliência com a adição de RAP em misturas asfálticas foi demonstrado pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Minnesota (2002), no qual as misturas asfálticas foram submetidas, também, a uma aplicação de carga de 10 Hz a temperatura de 25°C e os resultados, com adição de 40% de RAP obtiveram um aumento no MR de 74 a 164%, validando o comportamento de enrijecimento das misturas asfálticas após a incorporação de material fresado.

El-Maaty e Elmohr (2015) avaliaram misturas contendo 25, 50, 75 e 100% de RAP. Os resultados obtidos corroboram aos destacados nas pesquisas anteriores, pois os valores de MR das misturas sofreram um acréscimo bastante considerável, chegando a, aproximadamente, 3 vezes, quando da comparação da mistura sem RAP e a com 100%, para um dia de condicionamento. Cabe aqui salientar que estes autores estudaram as misturas também com tempos maiores de condicionamento (até

7 dias) e o comportamento, mesmo que com valores menores de MR, se manteve, os melhores resultados nos maiores percentuais de incorporação de RAP nas misturas.

Figura 57 – Comparação dos dados de Módulo de Resiliência com os dados desta pesquisa, Bohn (2017), Centofante (2016), Rocha *et al.* (2012) e Lima (2003)



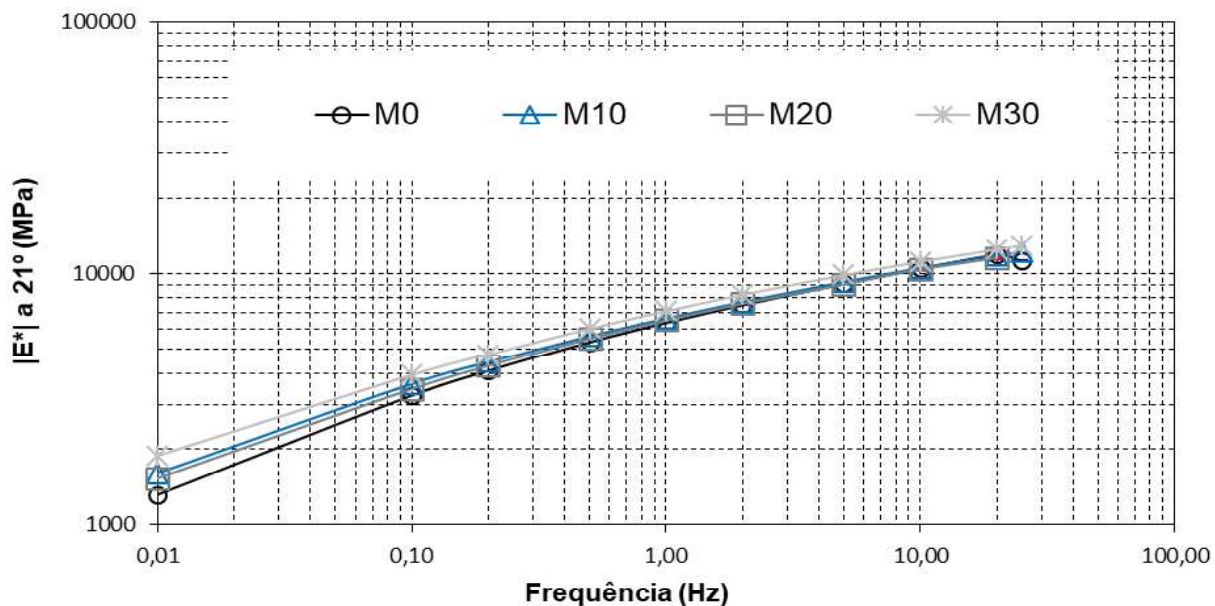
Fonte: Autor, 2018.

4.2.1.2. Módulo Complexo

Os dados de Módulo Dinâmico ($|E^*|$) e Ângulo de Fase (ϕ) foram obtidos através do procedimento da AASHTO T 342-11. O software utilizado (UTS006 – SPT Dynamic Modulus Test) admite 10 frequências de ensaios – 25, 20, 10, 5, 2, 1, 0,5, 0,2, 0,1 e 0,01Hz – e as temperaturas utilizadas foram -10, 4, 21, 37 e 54°C para duas amostras de cada uma das misturas. Os dados brutos encontrados para cada um dos ensaios encontram-se no apêndice A.

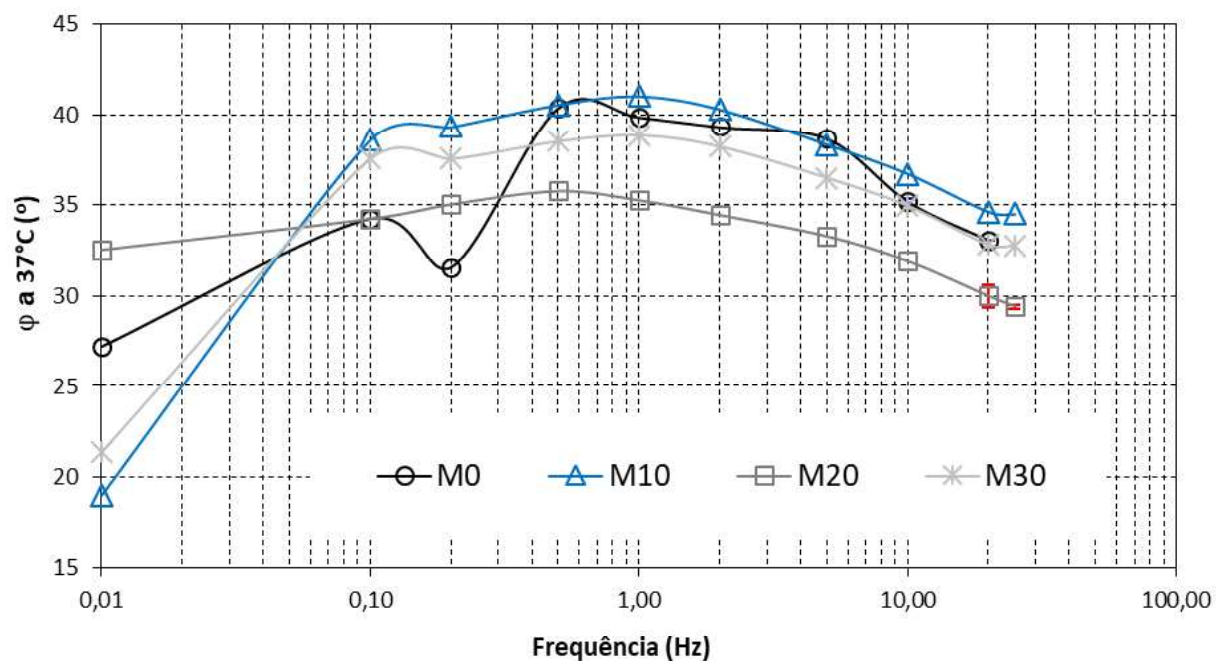
A isoterma de Módulo Dinâmico a 21°C (Figura 58) e ângulo de fase a 37°C (Figura 59) são apresentadas como exemplo e, a primeira, representa a temperatura média dos ensaios e a segunda é o momento da inflexão da curva do ângulo de fase. As curvas isotermas para os dois ensaios em todas as temperaturas estão evidenciadas no apêndice B.

Figura 58 – Isoterma de Módulo Dinâmico a 21°C



Fonte: autor, 2018.

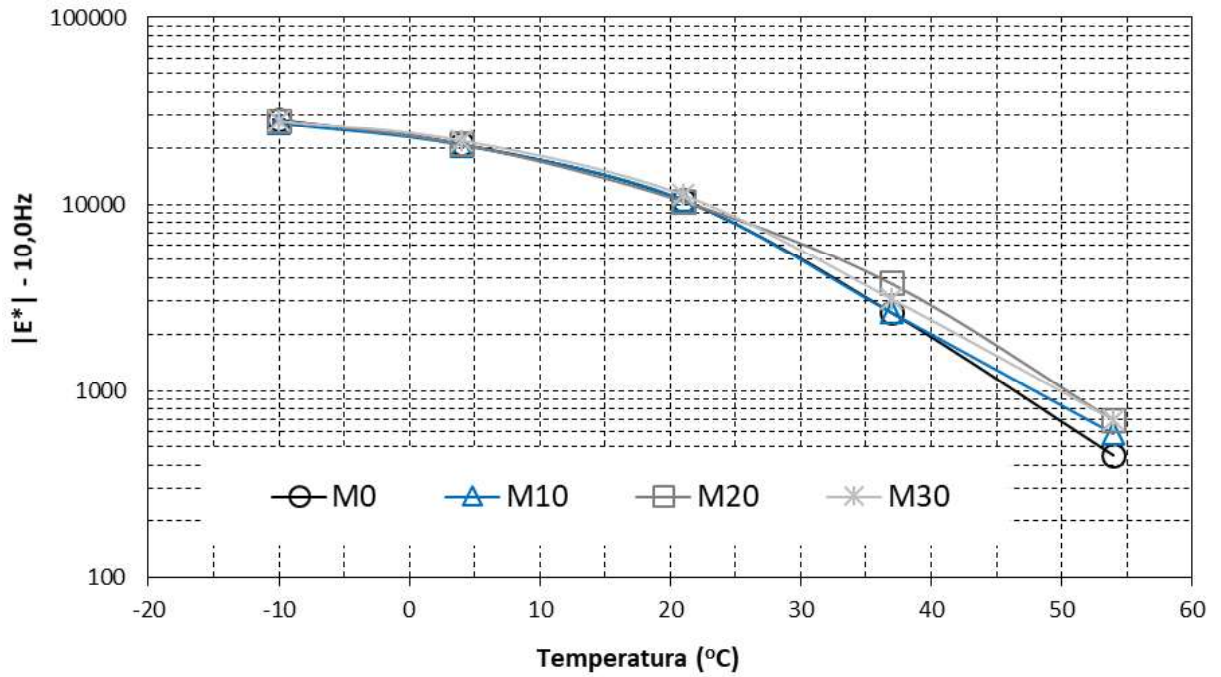
Figura 59 – Isoterma de Ângulo de fase a 37°C



Fonte: autor, 2018.

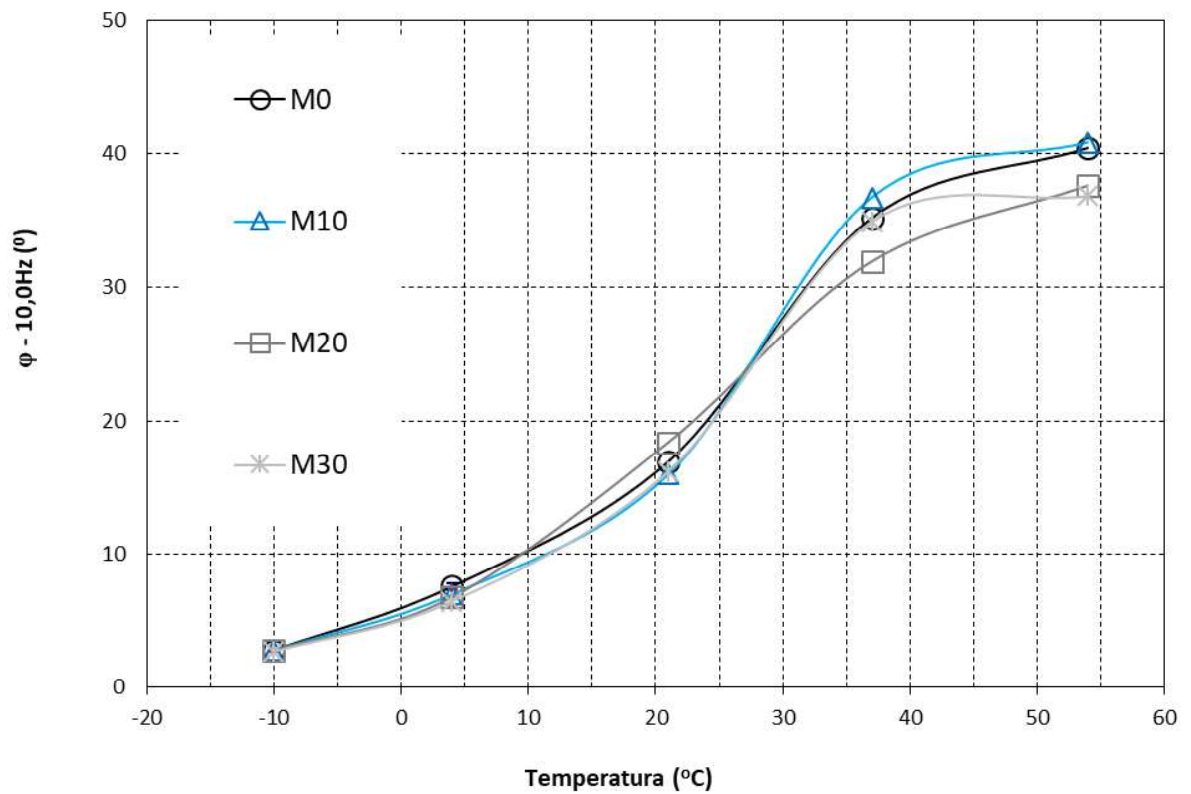
As Isócronas de Módulo Dinâmico (Figura 60) e de Ângulo de Fase (Figura 61) também estão dispostas abaixo na frequência de 10Hz.

Figura 60 – Isócrona de Módulo Dinâmico a 10Hz



Fonte: autor, 2018.

Figura 61 – Isócrona de Ângulo de Fase a 10Hz



Fonte: autor, 2018.

As curvas – isothermas e isócronas – serão avaliadas junto as curvas mestras, tanto de ângulo de fase quanto de módulo dinâmico. Cabe aqui salientar que as curvas isócronas estarão, também, todas dispostas no apêndice B. Assim que obtidos os valores médios dos dados brutos, estes foram submetidos à modelagem 2SP1D e todos os parâmetros fornecidos junto as constantes C1 e C2 do WLF (William, Landel e Ferry), para cada uma das misturas desenvolvidas, estão resumidos na Tabela 22.

Tabela 22 – Parâmetros da modelagem 2S2P1D e constantes C1 e C2

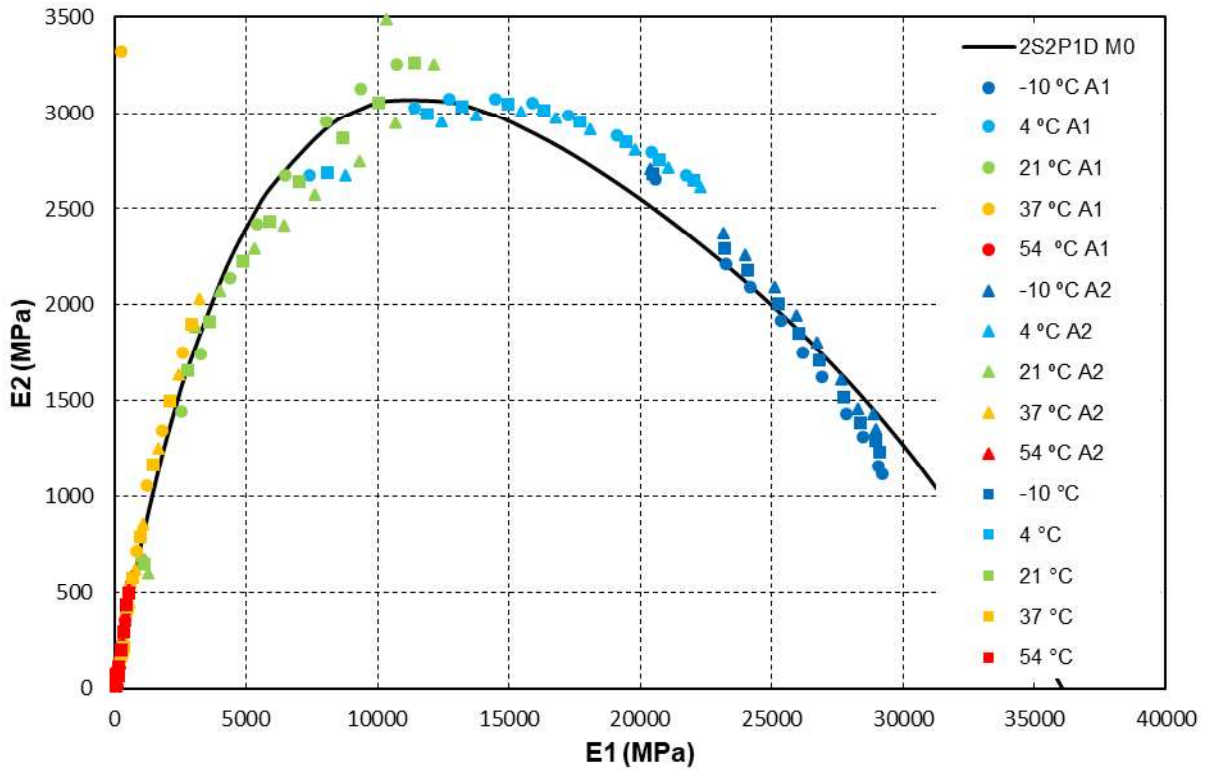
Mistura	E*						WLF		
	E ₀₀ (MPa)	E ₀ (MPa)	K	H	d	t _E	β	C1	C2 (°C)
M0	33,71	36044	0,156	0,484	1,82	0,03	9482	34,41	231,01
M10	50,00	32000	0,210	0,580	3,20	0,22	5000	35,34	264,41
M20	76,38	35080	0,177	0,527	2,38	0,06	5927	29,46	231,69
M30	80,00	32500	0,210	0,580	3,50	0,28	2000	35,67	264,38

Fonte: autor, 2018.

Os dados da Tabela 20 são necessários para a elaboração das curvas Cole-Cole, Diagrama Black e as curvas mestras para módulo dinâmico e ângulo de fase. Na Figura 62 está ilustrado um exemplo de uma representação gráfica dos resultados no espaço Cole-Cole, com as duas amostras utilizadas e a média encontrada dos dados experimentais, além da curva encontrada na modelagem 2S2P1D. A parte real E1 e a parte imaginária (ou perda) E2, na Cole-Cole, são representadas aritmeticamente.

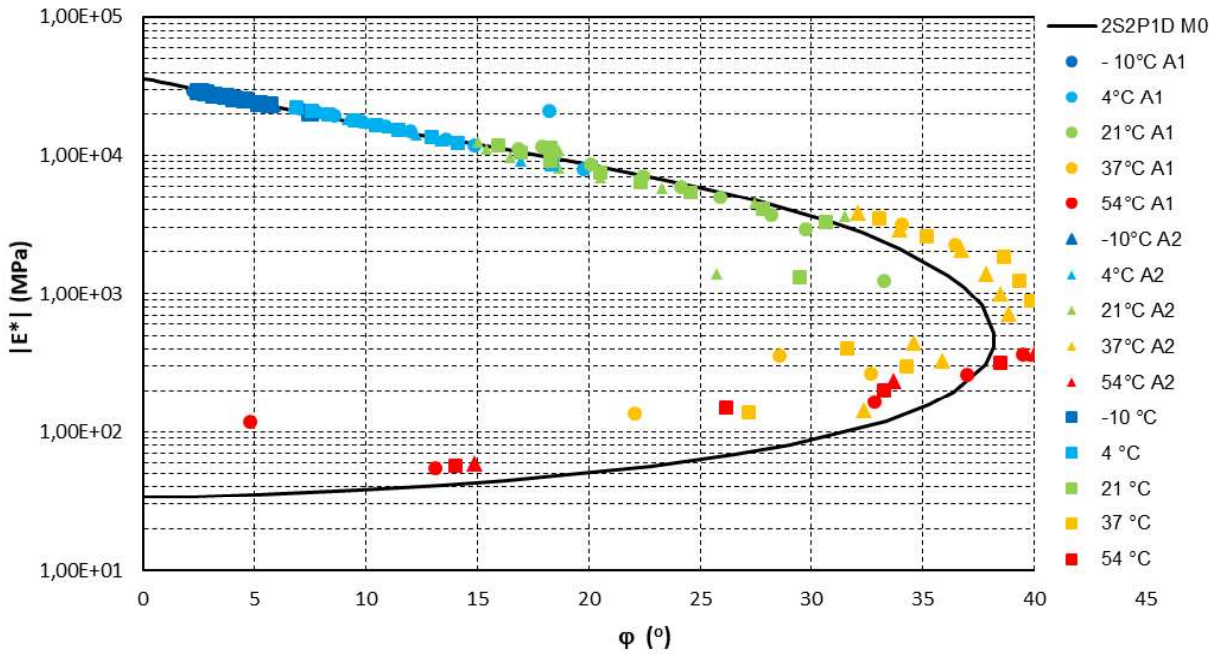
Na Figura 63 está ilustrada uma representação gráfica dos resultados para o diagrama Black, para as duas amostras e média dos resultados experimentais e a curva descrita após a modelagem 2S2P1D. Nesta curva verifica-se a relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase para diferentes temperaturas. Cabe aqui salientar que, tanto as curvas Cole-Cole quanto os diagramas Black com todos os dados experimentais estarão ilustradas no apêndice C e, os modelos 2SP1D para todas as misturas serão analisadas a seguir. Ainda, verifica-se o bom ajuste de modelagem 2S2P1D realizado tanto para o espaço Cole-Cole (Figura 62) quanto para o Diagrama Black (Figura 63), representando de forma muito aproximada o comportamento real das misturas – nos parâmetros avaliados – realizado através das medições reais de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase.

Figura 62 – Espaço Cole-Cole para a mistura de referência



Fonte: autor, 2018.

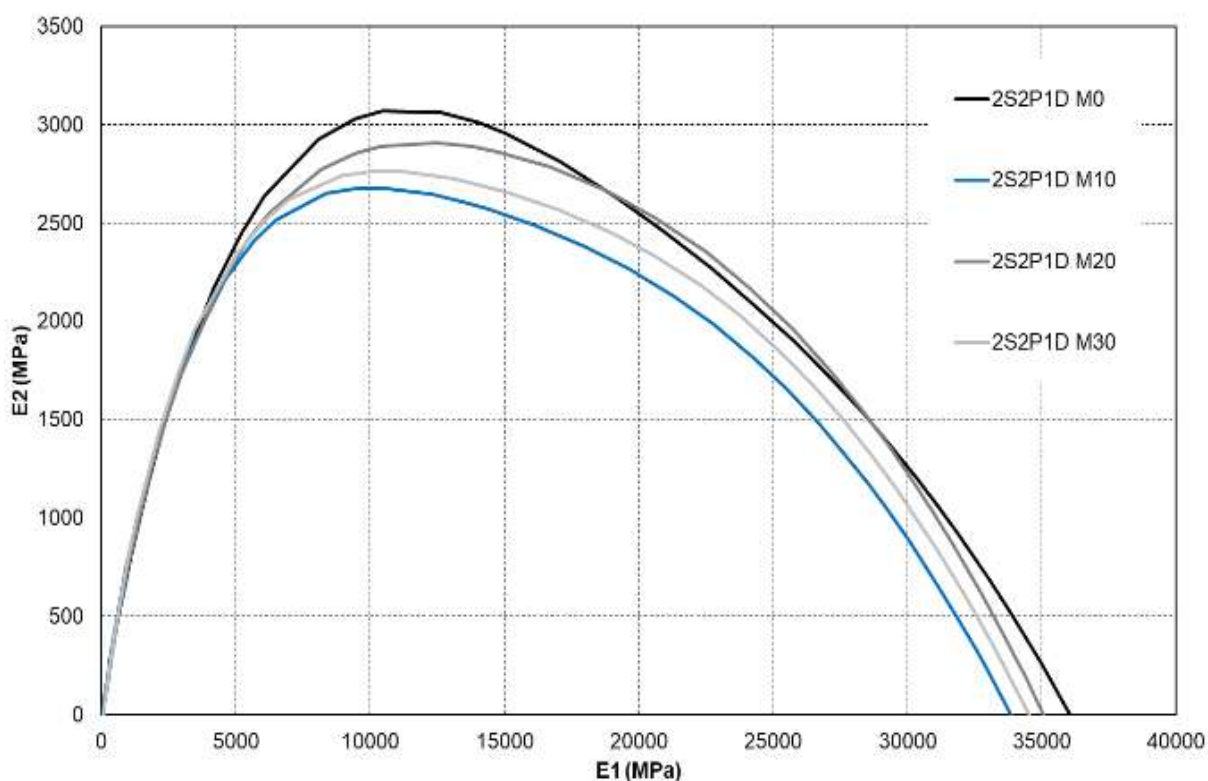
Figura 63 – Diagrama Black para a mistura de referência



Fonte: autor, 2018.

Na Figura 64 estão dispostas as curvas de todas as misturas da modelagem 2S2P1D representadas no espaço Cole-Cole. Não se observa um comportamento definido em função dos percentuais de RAP inserido, visto que as curvas apresentadas possuem valores muito próximos e não se pode definir uma maior representatividade viscosa ou elástica das misturas

Figura 64 – Espaço Cole-Cole para as quatro misturas avaliadas



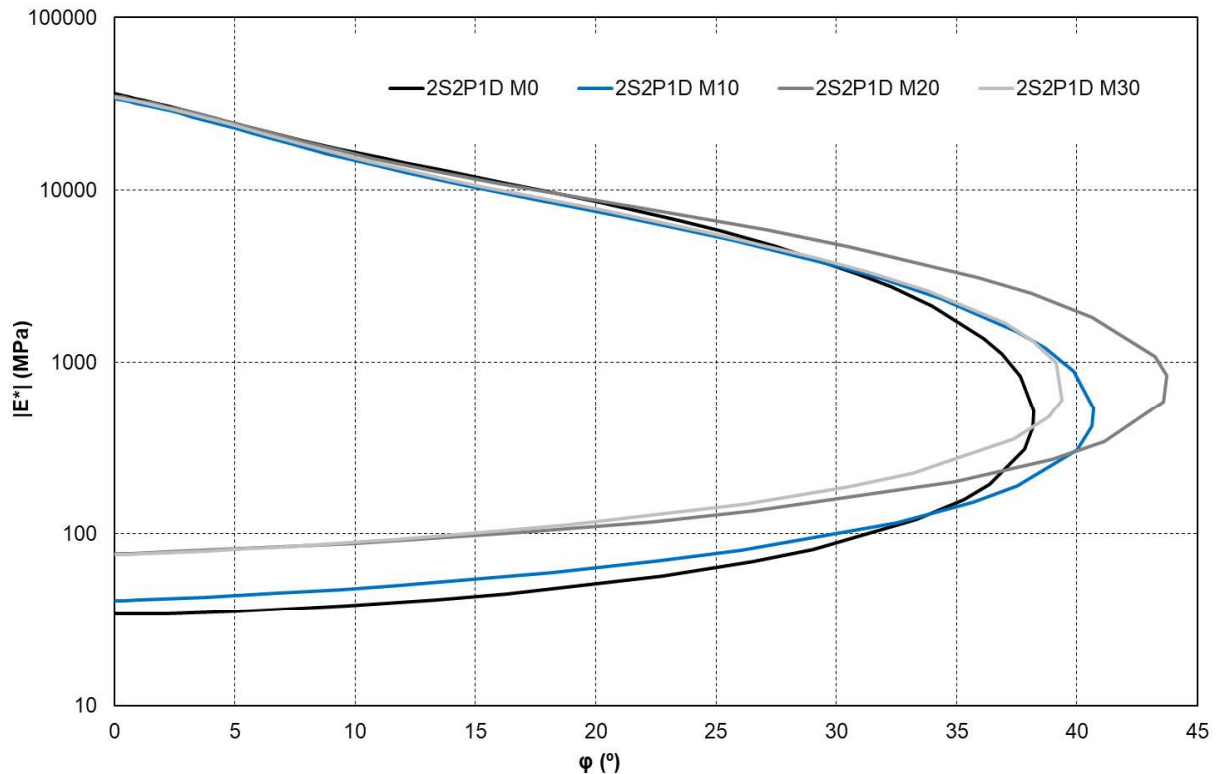
Fonte: autor, 2018.

Na Figura 65 está a representação gráfica da modelagem 2S2P1D, através do diagrama Black – módulo dinâmico e ângulo de fase –, para as quatro misturas avaliadas nesta pesquisa, permitindo visualizar as zonas com baixos valores de módulos dinâmicos, onde os ângulos de fases são maiores. Deste modo consegue-se avaliar a influência da temperatura nos valores de ângulo de fase. Nota-se que, até a temperatura de 37°C, o valor de ângulo de fase aumenta e, a partir deste ponto – aproximadamente na inflexão da curva do modelo 2S2P1D –, acaba por sofrer um decréscimo.

Não se pode observar uma característica de influência da inserção de RAP nas misturas atrelado ao comportamento elástico ou viscoso, já que as misturas não

demonstram continuidade no crescimento do ângulo de fase em função da incorporação de material fresado. Ainda se nota, graficamente, a semelhança dos valores apresentados e, por isto, a semelhança das curvas, não se inferindo melhor comportamento ao desempenho à fadiga ou a deformação permanente das misturas.

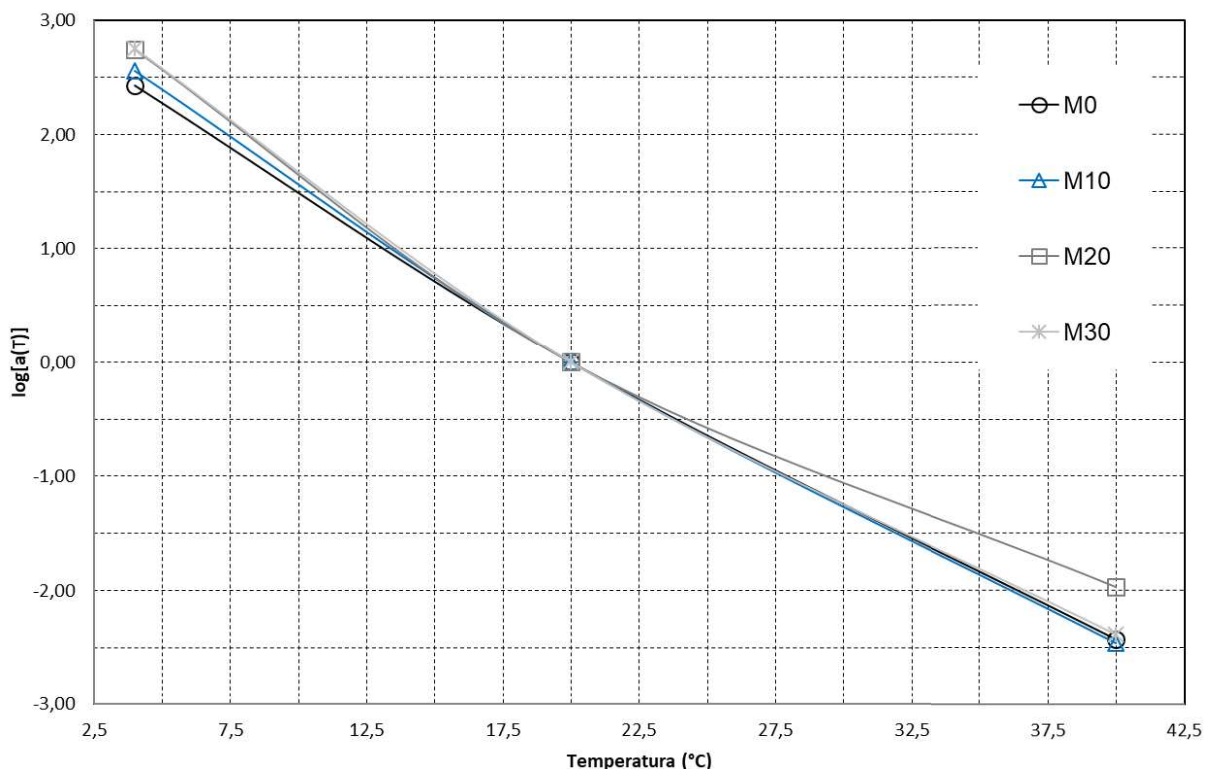
Figura 65 – Diagrama Black para as quatro misturas avaliadas



Fonte: autor, 2018.

O comportamento reológico das misturas asfálticas é, geralmente, demonstrado em termos de curvas mestras de módulo dinâmico junto ao ângulo de fase, além da determinação dos fatores de desvios (shift factors) associados às mudanças de temperatura (YOUSOFF *et al.*, 2011). O fator de deslocamento expresso por $a(T)$ em escala logarítmica indica a dependência da temperatura no comportamento viscoelástico das misturas. Segundo os mesmos autores, esta dependência de temperatura indica como o processo de relaxamento acontece em função das mudanças de temperatura nas misturas. A Figura 66 demonstra a curva $\log a(T)$ pela temperatura, onde pode-se verificar a dependência do comportamento viscoelástico das misturas pela temperatura.

Figura 66 – Comparação das curvas $\log a(T)$ para todas as misturas



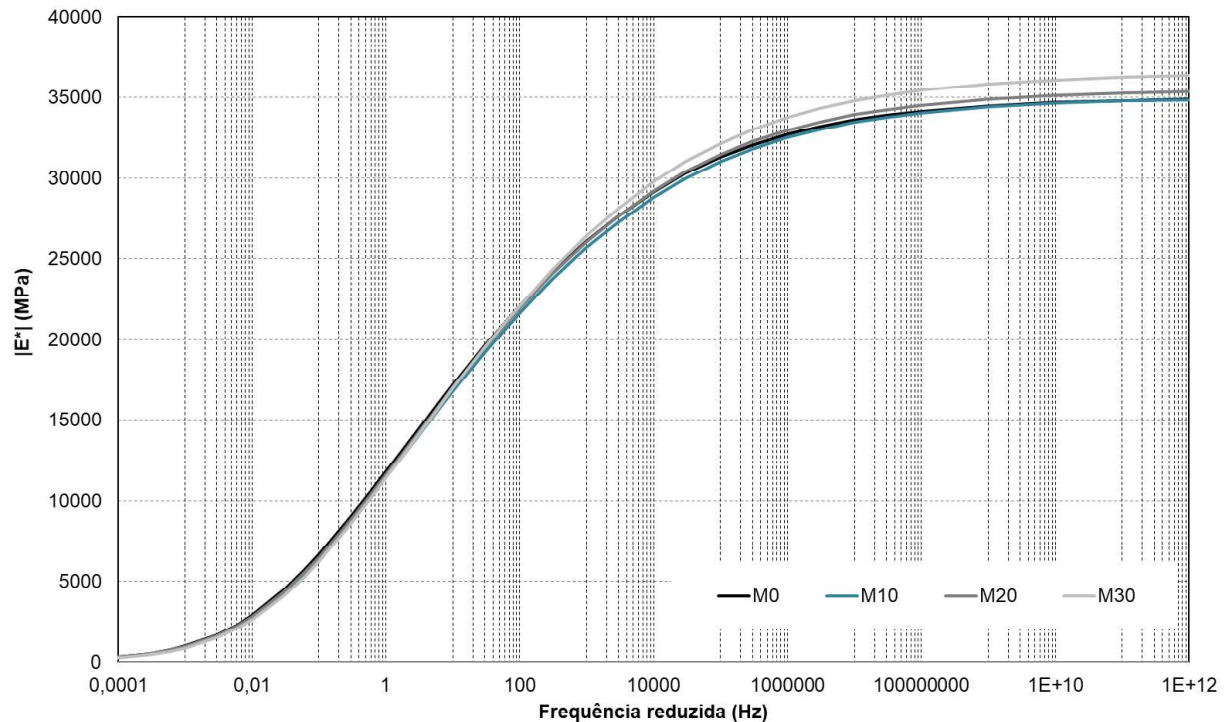
Fonte: autor, 2018.

Verifica-se, a partir da Figura 66, que com os valores se aproximando de zero a suscetibilidade à temperatura das misturas diminui, possibilitando uma tendência maior para a estabilidade da mistura, ou seja, a menor inclinação da curva infere a uma estabilidade maior. Não se pode concluir um comportamento das misturas, em função do teor de fresado, quanto a suscetibilidade à ação da temperatura.

Para descrever outro comportamento de ligantes e misturas asfálticas, a viscoelasticidade, as curvas mestras são elaboradas, pois permitem a avaliação de uma grande faixa de temperaturas e frequências. Yusoff *et al.* (2011), relata que as curvas mestras podem ser feitas usando uma temperatura de referência arbitrariamente selecionada para todos os dados reológicos analisados. A temperatura utilizada como referência é em $\log a(T)$ igual a zero. Normalmente, usa-se este tipo de modelagem para equivalência de tempo-temperatura em relação às misturas e ligantes asfálticos. Vê-se que uma das grandes vantagens da curva mestra é que esta possibilita a previsão dos valores de uma determinada propriedade reológica ao longo de uma gama ampla de temperaturas e frequências.

A Figura 67 ilustra a comparação de todas as curvas mestras de módulo dinâmico, obtido na modelagem 2S2P1D, estudadas nesta pesquisa, utilizando como temperatura de referência 20°C. É possível observar que o módulo dinâmico aumenta em função do também crescimento da frequência. Isto pode estar atrelado ao menor tempo de carga nestas frequências e não se manifestam deformações viscoelásticas nas misturas. Verifica-se, ainda, que nas altas frequências apenas acontecem deformações elásticas e é neste ponto onde os módulos são os maiores. No carregamento maior, nas baixas frequências, ocorrem as deformações viscoelásticas quase em sua totalidade, acontecendo os menores módulos dinâmicos.

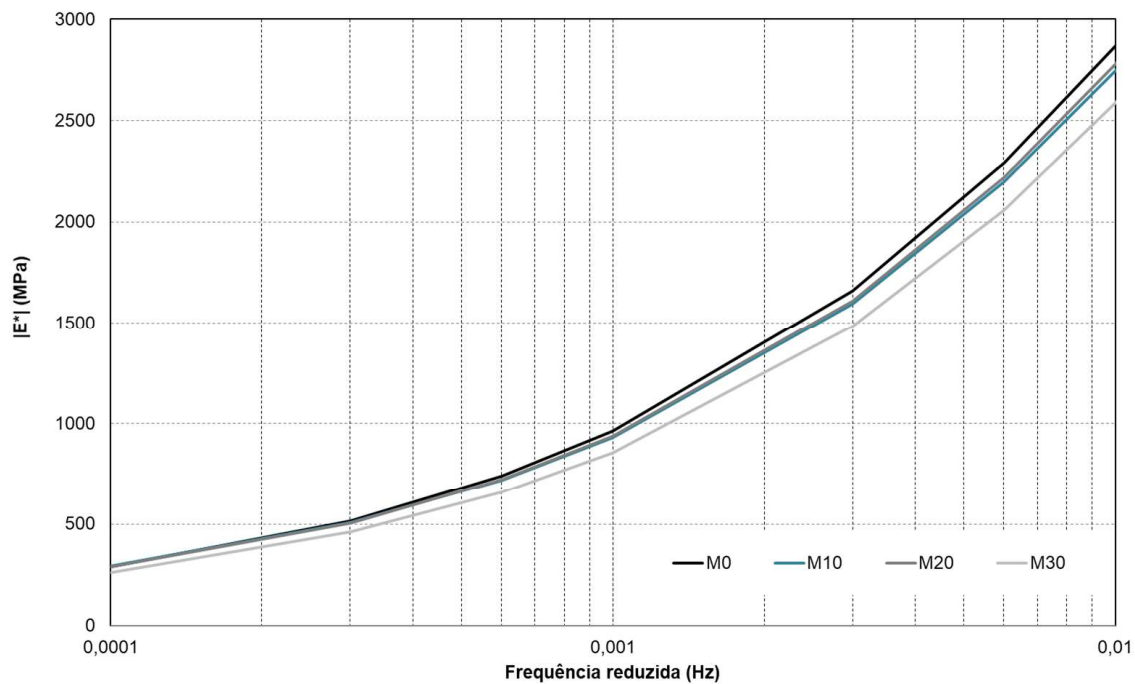
Figura 67 – Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas a 20°C



Fonte: autor, 2018.

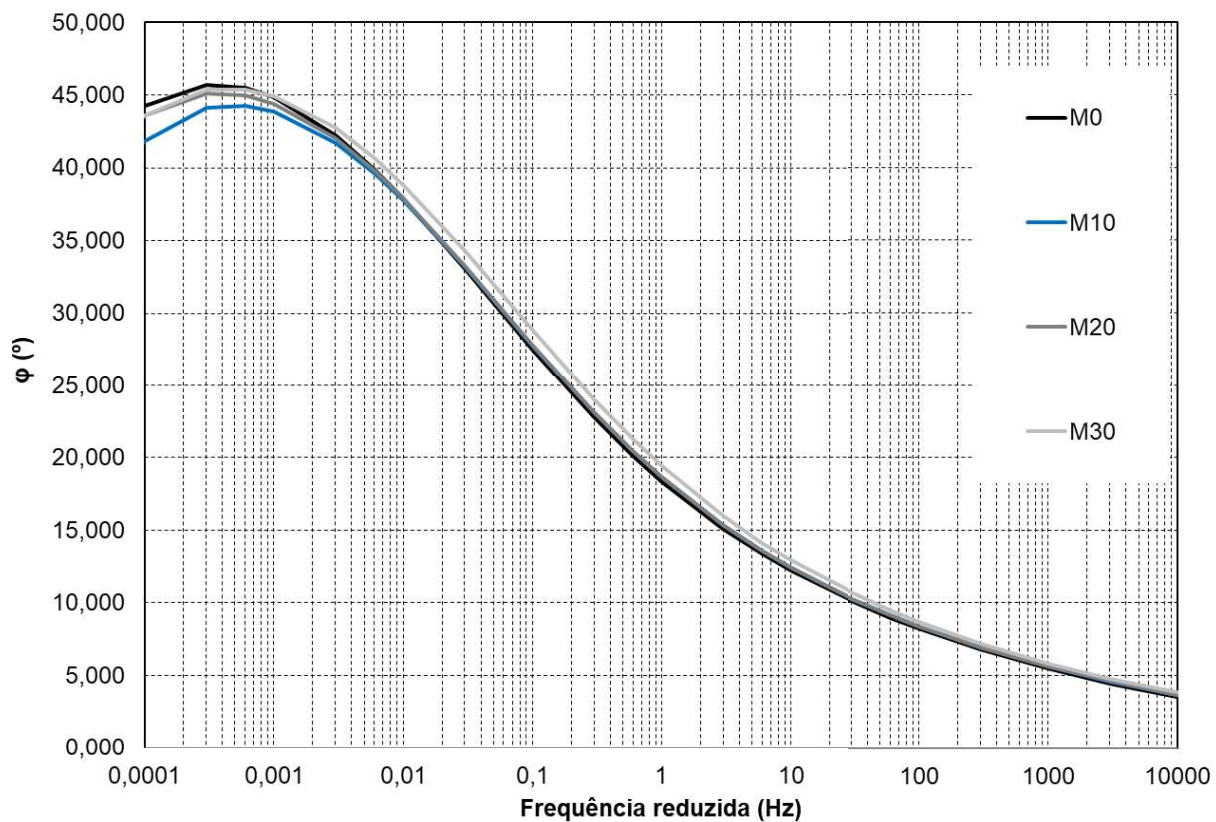
A Figura 68 detalha o comportamento do módulo dinâmico em baixas frequências, até 0,01Hz, onde nota-se com clareza os menores módulos dinâmicos para todas as misturas analisadas. Ainda, pelo ângulo de fase pode-se avaliar o comportamento referente as propriedades elásticas e viscosas das misturas, como se observa na Figura 69.

Figura 68 – Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas em baixas frequências a 20°C



Fonte: autor, 2018.

Figura 69 – Curvas mestras de ângulo de fase para todas as misturas



Fonte: autor, 2018

Verifica-se que a mistura de referência possui o maior pico de valor de ângulo de fase até a frequência de 0,001Hz. Na região das menores frequências e temperaturas mais elevadas, a capacidade elástica do ligante asfáltico diminui, e o comportamento da mistura recebe influência do esqueleto mineral. Nota-se que o comportamento das misturas, quando se avalia o ângulo de fase, não são constantes, sendo as maiores variações encontradas, principalmente, nas frequências que estão relacionadas as maiores temperaturas do ensaio (37 e 54°C). Entretanto, pode-se avaliar como positiva a utilização de RAP em misturas, pois o comportamento destas é semelhante as que não possuem o material reciclado em sua composição.

O comportamento aqui encontrado, em todos os gráficos analisados, estão coerentes com os dados apresentados pela norma da AASHTO M 323 – 13 – Superpave Volumetric Mix Design, na qual é descrito que misturas asfálticas com até 15% de fresado não precisam de nenhuma seleção ou modificação diferente de ligante asfáltico, no intervalo de inserção de RAP entre 15 e 25%, um ligante com um grau de performance inferior ao da mistura de referência deve ser utilizado e acima de 25%, características específicas finais desejadas para as misturas devem ser levadas em consideração. Nesta pesquisa, não foram realizadas seleções ou tratamentos diferenciados nos ligantes utilizados nas misturas de referência ou com RAP. Deste modo, avalia-se que o comportamento não determinado dos parâmetros em função da inserção de material fresado é esperado e aceitável, pois a mudança nos percentuais de fresado é muito sutil e, o máximo inserido – 30% –, não influencia, significativamente, para a avaliação do comportamento elástico ou viscoso das misturas.

Ressalta-se aqui que não se pode concluir a respeito da influência da incorporação do RAP no comportamento viscoso ou elástico das misturas, bem como da inferência das melhores misturas frente a deformações permanentes e vida de fadiga. Estes dados podem ser vistos tanto nos ensaios de módulo de resiliência quanto nos ensaios de danificação das misturas, Flow Number e Fadiga a Tração-Compressão. É relevante salientar os comportamentos semelhantes entre misturas recicladas e convencional, demonstrando a viabilidade de utilização de misturas recicladas à quente.

4.2.2. Ensaio de Adesão/Coesão

Neste item da pesquisa serão descritos os resultados dos ensaios da avaliação das propriedades de adesão e coesão das 4 misturas elaboradas nesta pesquisa, o desgaste Cântabro e o Dano por Umidade Induzida.

4.2.2.1. Desgaste por Abrasão (Cântabro)

No ensaio para a verificação da resistência ao desgaste por perda de massa, 3 corpos de prova com volume de vazios em $4 \pm 1\%$ foram condicionados por 12 horas a 25°C e submetidos a 300 revoluções no tambor Los Angeles, de acordo com a norma DNER - ME 383/99. Na Tabela 23, estão resumidos os valores encontrados de perda de massa por desgaste Cântabro para as misturas avaliadas nesta pesquisa, junto ao desvio padrão e coeficiente de variação das mesmas.

Tabela 23 – Valores de desgaste por abrasão Cântabro

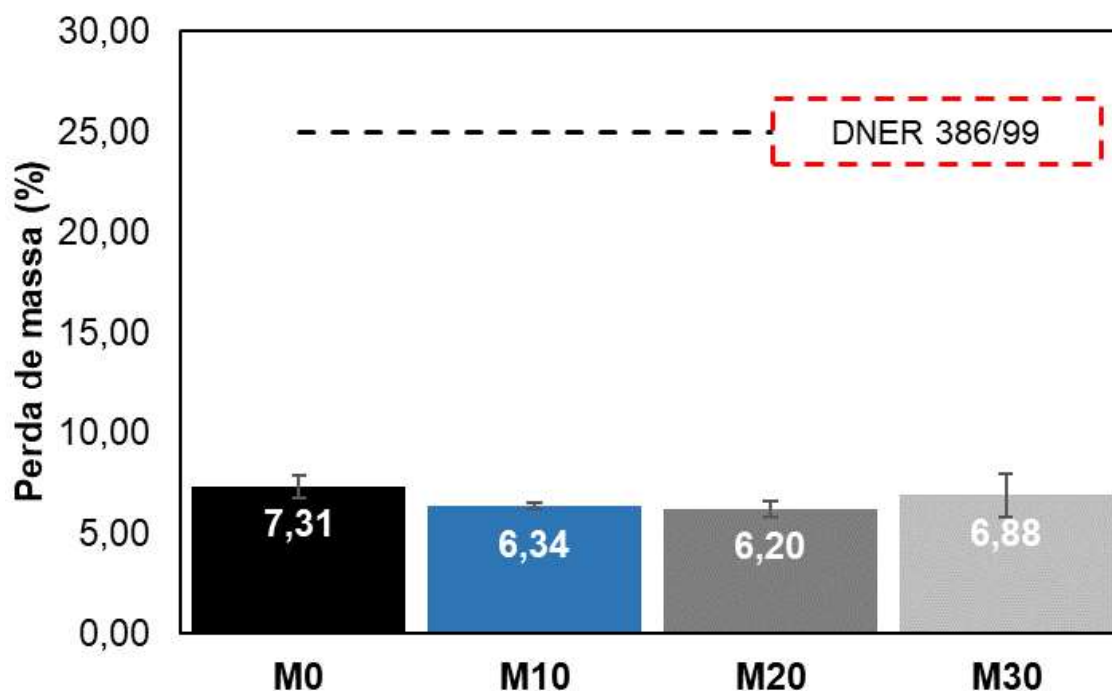
Projeto	Am1	Am2	Am3	Média (%)	DP (%)	CV (%)
M0	7,96	7,17	6,81	7,31	0,59	8,04
M10	6,40	6,45	6,18	6,34	0,14	2,22
M20	6,65	5,97	5,99	6,20	0,39	6,27
M30	8,09	6,29	6,26	6,88	1,04	15,19

Fonte: autor, 2018.

De acordo com a norma do DNER ME 383/99, os resultados encontrados para cada uma das amostras ensaiadas devem estar em um intervalo máximo de 20%, acima ou abaixo da média encontrada, para validação do ensaio. Apenas para a mistura com 30% de fresado um dos valores encontrados diferiu em 17%, enquanto para todas as outras, o valor máximo ficou em menos de 10%, validando os ensaios. A norma DNER ME 386/99 – Pavimentação: pré-misturado à quente com asfalto polímero, camada porosa de atrito – preconiza um desgaste máximo em 25% de perda

em massa em relação a uma amostra inicial. A Figura 70, ilustra os resultados médios e desvios padrão para cada uma das amostras avaliadas nesta pesquisa.

Figura 70 – Valores de perda em massa para as misturas avaliadas

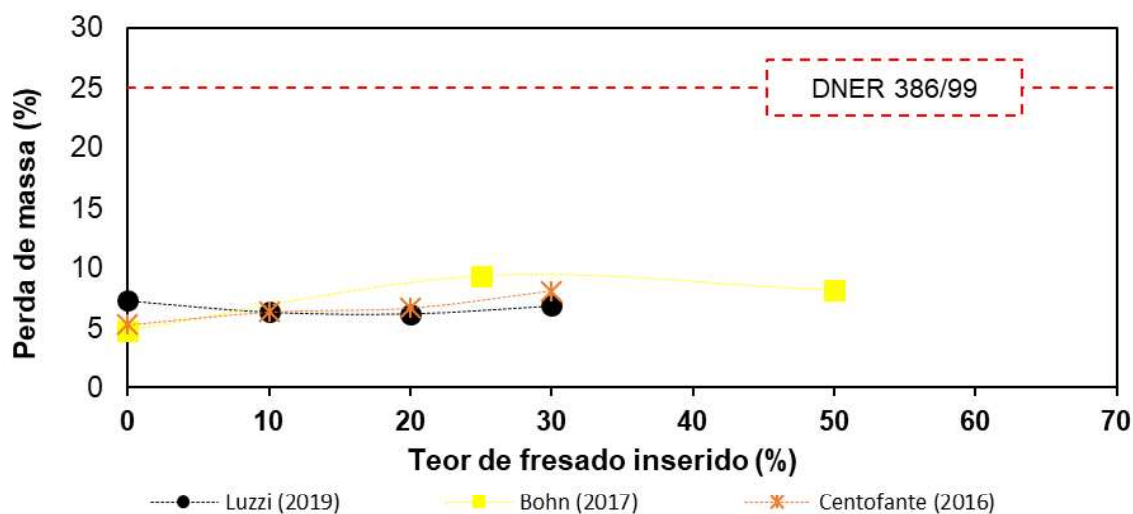


Fonte: autor, 2018.

Verifica-se que, a partir dos dados expostos na Figura 85, para as 4 misturas avaliadas o desgaste por abrasão ficou bem abaixo do especificado, não perdendo mais que 8,0% em massa. Em outro ponto, nota-se que não há um comportamento visível à perda de massa em função da inserção de material fresado, ou seja, não se pode avaliar a incorporação de RAP diretamente nesta propriedade das misturas.

Avaliando misturas com 0, 10, 20 e 30% de material fresado, Centofante (2016), também avaliou o desgaste a abrasão. Os valores encontrados também ficaram abaixo de 10% em perda de massa e tem perda de massa maior com o aumento do percentual de inserção de RAP. Bohn (2017) evidenciou que o desgaste pela abrasão após as 300 revoluções do tambor Los Angeles não gerou grandes percentuais de perda em massa para as misturas estudadas, não ultrapassando, também, 10% da massa inicial das amostras. Na Figura 71 estão evidenciados estes valores e comparados com o presente trabalho.

Figura 71 – Comparação dos valores obtidos no Desgaste Cântabro entre Centofante (2016), Bohn (2017) e esta pesquisa.



Fonte: autor, 2018.

Em pesquisas realizadas sem a inserção de RAP, os valores de perda de massa se aproximaram aos analisados nesta pesquisa. Em Specht (2004), o desgaste de 5,91% foi encontrado para uma mistura de referência. Para Boeira (2014), a perda de massa média encontrada para as misturas de referência avaliadas ficou em torno de 6,90%. Já para Cardoso (2002) a perda de massa encontrada ficou acima de 10%, 17,88% para uma pista experimental e 13,11% para uma segunda pista. Estes últimos resultados podem estar condicionados à realização dos serviços em campo, mas ainda dentro dos parâmetros normativos especificados.

Analisa-se que o desgaste Cântabro é uma ferramenta que permite avaliar a ação do tráfego em relação a perda de massa que ocorre nas misturas. Todos os valores encontrados nas pesquisas foram satisfatórios às recomendações normativas utilizadas e esses dados podem ser confirmados com ensaios realizados em campo, corroborando ou não com os resultados obtidos.

4.2.2.2. Dano por Umidade Induzida (Lotmann Modificado)

O ensaio de Dano por Umidade Induzida (Lotmann Modificado) foi realizado para avaliar o efeito deletério da água na propriedade de adesividade das misturas. Foram moldadas 6 amostras de cada uma das misturas, sendo que em um grupo de 3 amostras foi realizada apenas o ensaio de resistência a tração por compressão

diametral e um segundo grupo de 3 amostras sofreu todo o processo de saturação, congelamento, banho-maria a 60° e 25°, conforme descrito na metodologia do ensaio. Os resultados obtidos de resistência a tração para ambos os grupos e a resistência a tração retida estão dispostos na Tabela 24.

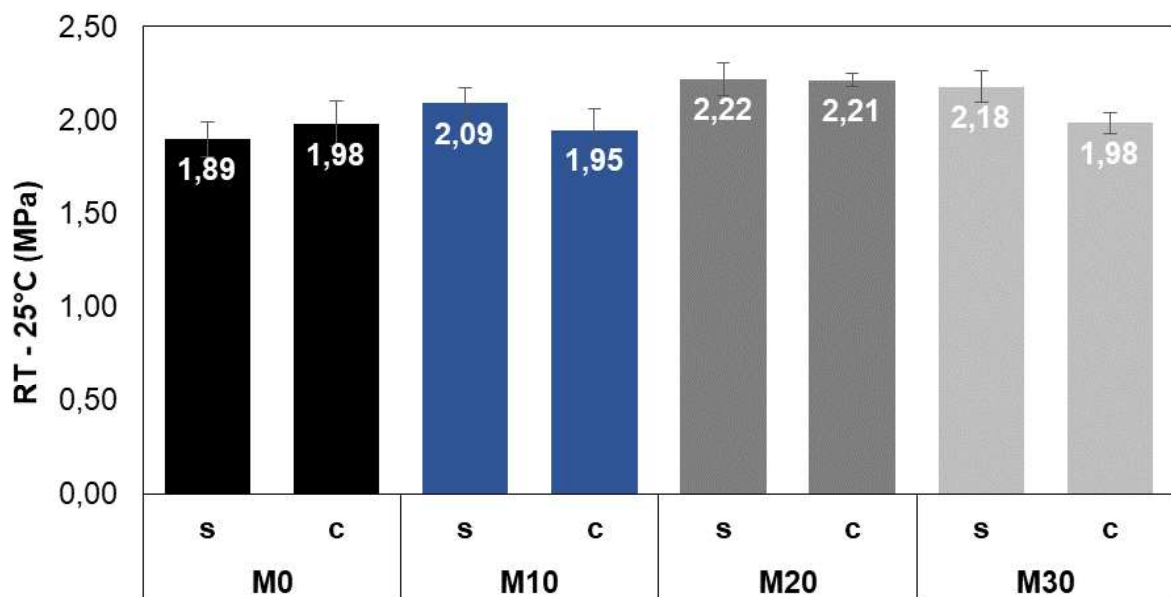
Tabela 24 – Valores de Resistência a Tração Retida

Mistura	Com cond. (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Sem cond. (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	RRT (%)
M0	1,98	0,12	6,23	1,89	0,10	5,07	104,36
M10	1,95	0,11	5,76	2,09	0,09	4,12	93,13
M20	2,21	0,03	1,45	2,22	0,09	4,10	99,85
M30	1,98	0,05	2,77	2,18	0,08	3,83	91,04

Fonte: autor, 2018.

Verifica-se, a partir da Tabela 24, que não há influência direta da água no resultado da resistência a tração após o condicionamento das misturas. Houve uma redução da RRT, mas o comportamento das misturas quanto a inserção de RAP não pode ser avaliado, pois não há uma proporcionalidade entre o valor da RRT e o material fresado inserido nas misturas. O gráfico da Figura 72 ilustra os resultados encontrados nos grupos de corpos de prova antes e após o condicionamento.

Figura 72 – Valores de Resistência a Tração Retida



Fonte: autor, 2018.

Verifica-se, ainda, que para a mistura de referência, a RT melhorou seu desempenho após o condicionamento da amostra. Isto evidencia a influência não negativa do efeito da água nas misturas. De acordo com a ES 031/2006 do DNIT, a razão da resistência à tração (RRT) por compressão diametral estática antes e após o condicionamento deve ser superior a 0,7, ou seja, 70% da RT encontrada inicialmente nas misturas, sem condicionamento.

De acordo com a metodologia SUPERPAVE, os resultados obtidos nesta relação vem estar acima de 0,8. Nota-se que todas as misturas desta pesquisa se enquadraram dentro do especificado e, também o que preconiza o método SUPERPAVE de dimensionamento.

Em Bohn (2017), pôde-se avaliar o efeito deletério da água em misturas com 0, 25 e 50% de incorporação de RAP, sendo a resistência a tração subtraída em menos de 15%, em todas as análises. O valor final da RRt ficou em 86, 90 e 89%, respectivamente, para as três misturas citadas anteriormente.

Arshad *et al.* (2017) avaliaram a propriedade da adesividade em misturas recicladas à quente com 0, 15, 25 e 35% de inserção de RAP. Verificou-se que os valores finais obtidos se enquadraram dentro, tanto da especificação brasileira quanto da norte americana, apenas ficando a mistura com 35% de fresado no limite mínimo admitido por esta segunda diretriz. Outro ponto que é importante avaliar, o comportamento quase linear de decréscimo da RRt em função da incorporação de RAP.

Centofante (2016), avaliou misturas adicionado 0, 10 20 e 30% de material fresado. Assim como Arshad *et al.* (2017), encontrou um comportamento semelhante em suas misturas pesquisadas, a diminuição da resistência a tração retida paralela a adição de material fresado. Dentre as análises realizadas, dois pontos ficaram abaixo do limite mínimo especificado, com 20% (abaixo da especificação SUPERPAVE) e com 30%, não alcançando o limite mínimo do DNIT.

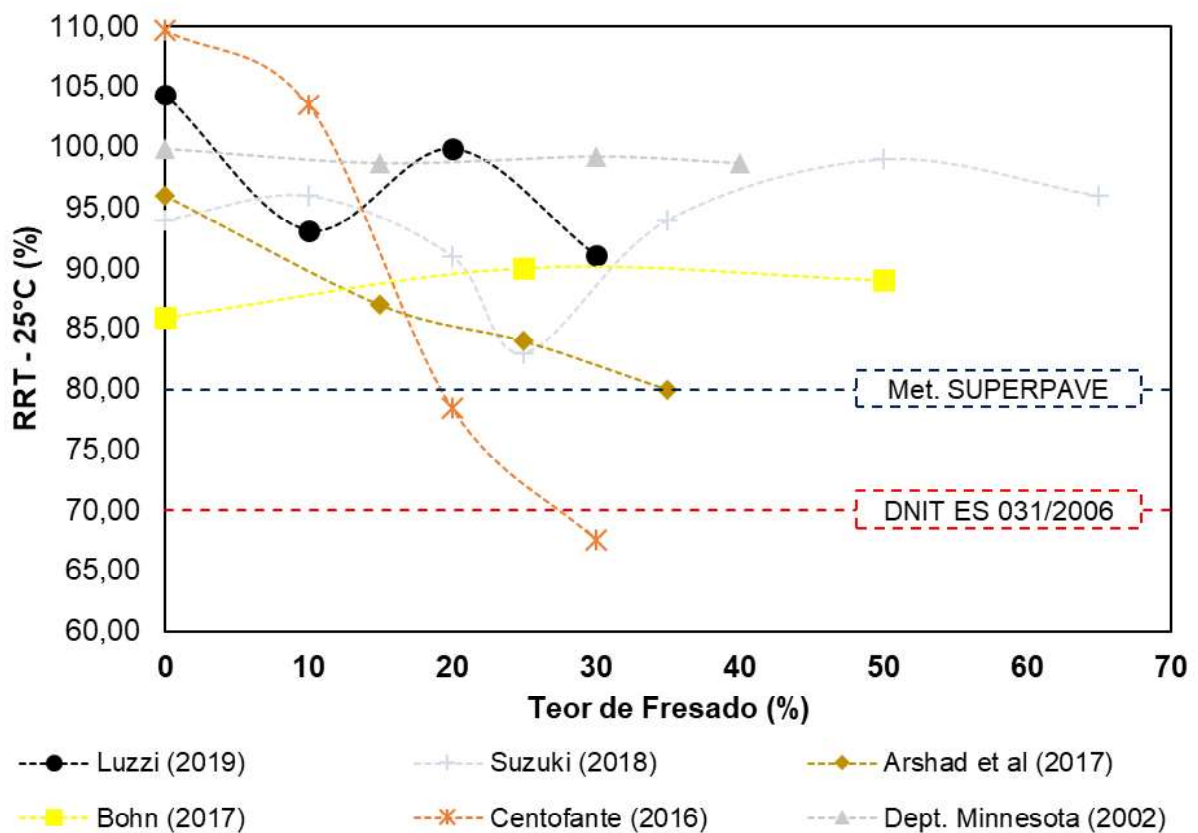
O Departamento de Engenharia Civil de Minnesota, em 2002, avaliou misturas recicladas à quente com 0, 15, 30, 40%. Na avaliação do efeito deletério da água, as amostras obtiveram um resultado constante de valores de RRt, resultando em, aproximadamente, 1% de perda na resistência a tração após o condicionamento das amostras.

Em outra pesquisa em que o comportamento da RRt não pode ser avaliado de acordo com a inserção de RAP, Suzuki (2019), avaliou misturas asfálticas recicladas

à quente com, respectivamente, 0, 10, 20, 25, 35, 50 e 65% de material fresado. Nestas duas últimas avaliações, os resultados obtidos também se enquadraram dentro do especificado e corroboraram para a avaliação do pouco efeito da água nas características de adesividade das misturas asfálticas analisadas. A Figura 73 ilustra as curvas de comportamento da Resistência a tração retida para as pesquisas citadas anteriormente em comparação a deste trabalho.

Verificou-se que, para a maioria das misturas avaliadas, o efeito deletério da água não foi significativo, sendo estes valores encontrados, dentro das preconizações normativas. Uma análise com maior detalhe deve ser realizada, pontualmente, nas misturas em que a RRT não foi alcançada, propondo a utilização de filler (CAL CH I, por exemplo) nas misturas ou aditivos melhoradores de adesividade no próprio ligante asfáltico.

Figura 73 – Comparação de valores de Resistência a Tração Retida entre esta pesquisa, Suzuki (2019), Arshad *et al.* (2017), Bohn (2017), Centofante (2016) e Dept. Minnesota (2002)



Fonte: autor, 2018.

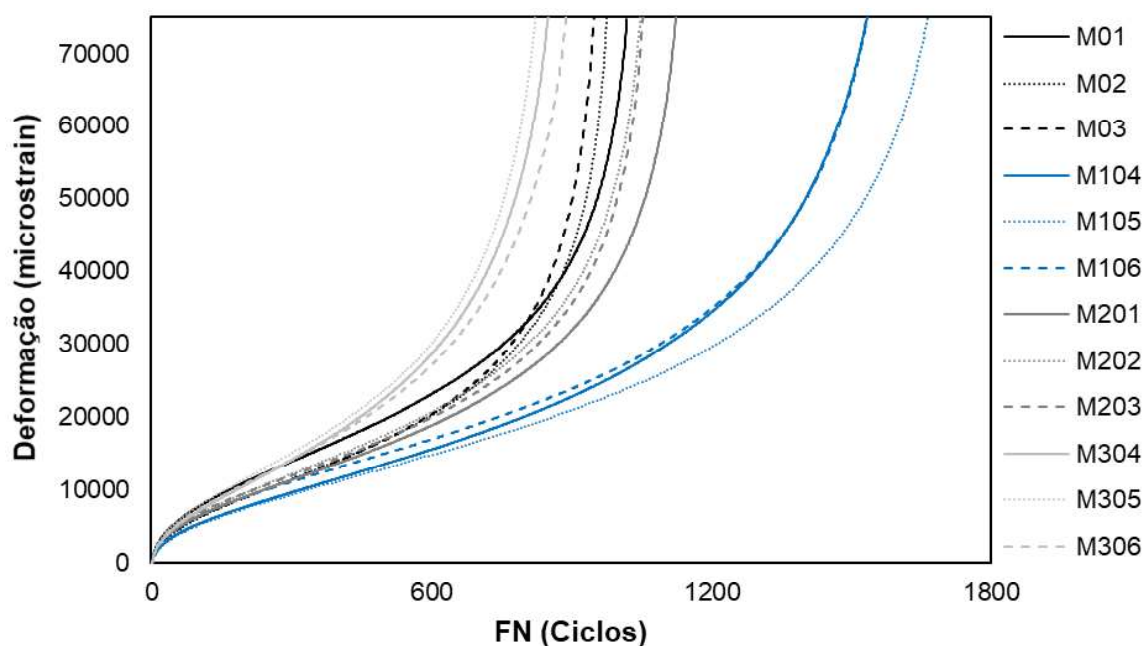
4.2.3. Ensaios de Danificação nas Misturas

Neste item estarão dispostos os resultados dos ensaios que avaliam a deformação permanente e a vida de fadiga em misturas asfálticas, causando danos nas amostras após ensaios. Para isto, foram realizados ensaios de Flow Number, Resistência a Tração por Compressão Diametral e Fadiga a Tração-Compressão.

4.2.3.1. Flow Number

Para cada uma das misturas foram ensaiados 3 corpos de prova a 60°C conforme descrito na metodologia desta pesquisa e de posse dos dados destas amostras por misturas analisadas, foi possível elaborar o gráfico com a curva deformação (microstrains) x FN (ciclos), conforme ilustrado na Figura 74.

Figura 74 – Curvas Deformação x FN para as misturas analisadas



Fonte: autor, 2018.

Com os dados levantados por amostra, pôde-se determinar os valores médios de ciclos, desvios-padrão, coeficiente de variação, bem como os parâmetros de Francken. Estes dados estão resumidos na Tabela 25.

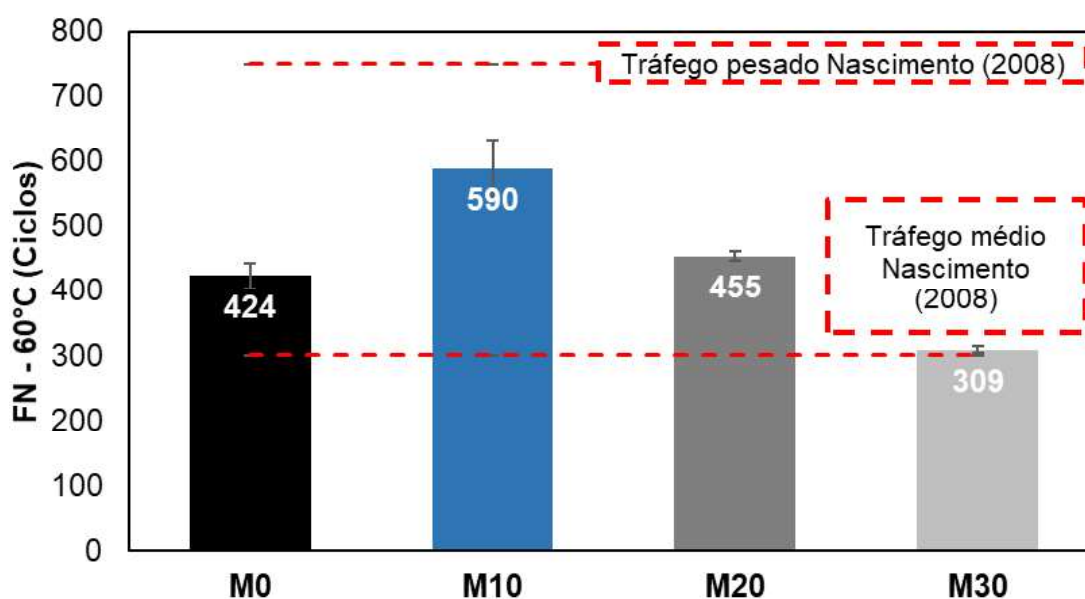
Tabela 25 – Curvas Deformação x FN para as misturas analisadas

Mistura	FN (ciclos)	DP (ciclos)	CV (%)	Modelo Francken			
				A	B	C	D
M0	424	20	4,72	398,48	0,63	8,05	0,00828
				213,90	0,70	2,88	0,00975
				260,63	0,67	4,14	0,00971
				206,44	0,67	43,88	0,00449
M10	590	43	7,29	189,20	0,68	23,78	0,00448
				374,16	0,59	42,17	0,00450
				289,81	0,65	9,55	0,00744
				273,07	0,67	5,67	0,00845
M20	455	7	1,54	331,09	0,63	5,76	0,00838
				288,46	0,68	46,10	0,00802
				395,60	0,64	40,49	0,00845
				363,13	0,64	59,82	0,00739

Fonte: autor, 2018.

Com os dados da Tabela 25, pôde-se, através dos valores do coeficiente de variação (CV), verificar o atendimento a norma da AASHTO T 79, onde este critério, para 3 corpos de prova, não pode ser maior que 11,5 %. Para melhor análise dos resultados encontrados, a média destes foi plotada em um gráfico (Figura 75), no qual se pode avaliar a influência da incorporação de fresado no comportamento a deformação permanente das misturas elaboradas.

Figura 75 – Valores de FN (Ciclos) para cada uma das misturas avaliadas



Fonte: autor, 2018.

Nota-se que a influência da incorporação de RAP nas misturas tem um comportamento determinado, sendo a mistura com 10% de fresado a que tem os maiores resultados de Flow Number, com 590 ciclos. Para avaliar o comportamento do parâmetro, uma comparação com a mistura de referência fica inapropriada neste caso, mas entre as misturas recicladas, verifica-se que quanto maior o percentual de RAP adicionado, pior é o comportamento a deformação permanente das misturas. Verifica-se que mesmo a mistura sem a adição de fresado não alcançou o limite para rodovias de tráfego pesado.

Cabe aqui ressaltar que a influência do teor de ligante final encontrado nas misturas se sobressai ao percentual de material fresado inserido, visto que, a mistura com menor número de ciclos, é a M30, onde o teor de ligante é, aproximadamente, meio ponto percentual maior aos das outras misturas. Este comportamento é evidenciado quando se analisa as outras misturas e, a sequência continua sendo, em ordem crescente de número de ciclos, a M0, M20 e M10, tendo sido encontrados nestas misturas, respectivamente, 5,01, 4,87 e 4,85% de teor de ligante final. Mesmo com a redução avaliada, é importante ressaltar que todas as misturas estudadas, de acordo com os limites propostos por Nascimento (2008) para Flow Number, podem ser utilizadas em rodovias de tráfego médio e assim propiciando soluções que trazem benefícios econômicos e ambientais para as obras rodoviárias brasileiras.

Ao contrário dos resultados desta pesquisa, Centofante (2016) concluiu que a incorporação de material fresado nas misturas asfálticas melhora o desempenho destas a deformação permanente, encontrando, respectivamente, 60, 150, 262 e 540 ciclos para as misturas com 0, 10, 20 e 30% de RAP. As 3 primeiras misturas, partindo-se do critério de Nascimento (2008), só podem ser utilizadas em rodovias com tráfego leve, já a com 30% de material fresado, em rodovias de tráfego médio.

Assim como em Centofante (2016), Bohn (2017) encontrou uma relação diretamente proporcional entre a inserção de material fresado nas misturas mornas com CAP 60/85 e o resultado de Flow Number atribuído. Superiores aos da pesquisa anterior, 178, 617 e 1320 ciclos foram encontrados para as misturas com, respectivamente, 0, 25 e 50% de RAP incorporado. Importante aqui relatar que estas misturas já podem ser utilizadas tanto em rodovias de tráfego médio quanto nas de tráfego pesado.

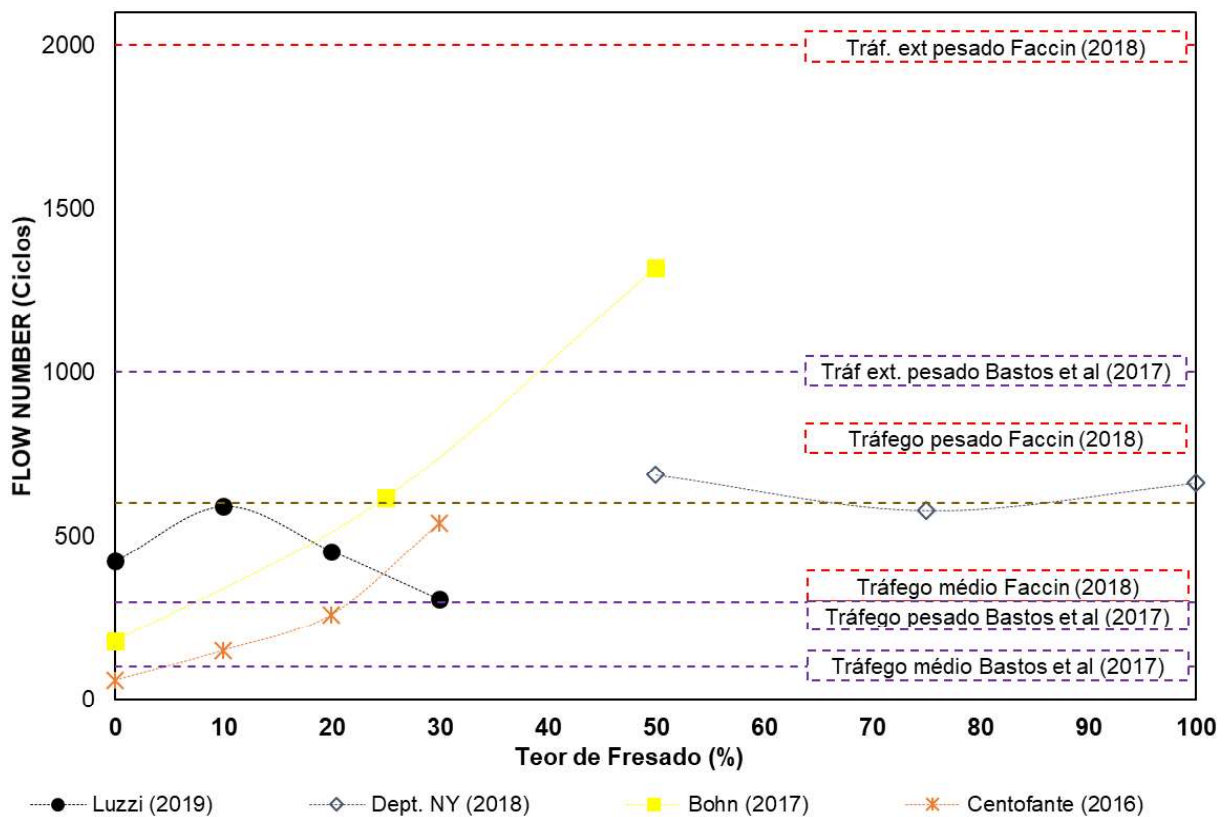
O Departamento de Transportes de Nova York também avaliou misturas asfálticas recicladas contendo 50, 75 e 100% de RAP nas misturas. Os resultados

encontrados, para as 3 composições, ficaram em torno dos 600 ciclos, não demonstrando um comportamento para o parâmetro avaliado em função da incorporação de material fresado nas misturas.

Faccin (2018) avaliou 24 misturas no Rio Grande do Sul quanto ao comportamento da deformação permanente com o ensaio de FN. Encontrou valores de 37 a 10000 ciclos (onde não atingiu FN) e propôs um critério para intervalos de níveis de tráfego. O critério para nível pesado de tráfego saiu de 750 para 600 ciclos e o nível de tráfego médio foi mantido o mesmo. Um novo critério, para tráfego extremamente pesado foi estipulado quando o FN for maior que 2000 ciclos.

Bastos *et al.* (2017) também propôs critérios de FN para os mesmos níveis de tráfego. Para o médio, o valor recomendado desceu de 300 para 100 ciclos e, pesado, 300 ciclos. Um nível maior de 1000 ciclos foi estipulado para tráfego extremamente pesado. Na Figura 76 estão destacados estes critérios de FN para os diferentes níveis de tráfego e os valores de FN das pesquisas destacadas anteriormente.

Figura 76 – Critério de FN para níveis de tráfego



Fonte: autor, 2018.

Verifica-se que para Bastos *et al.* (2017) o nível de criticidade diminui e as misturas se enquadram em padrões mais altos de tráfego. As estudadas por Bohn (2017) se adequam ao tráfego médio, pesado ou até mesmo extrapesado (mistura com 50% de RAP), enquanto Centofante (2016), que antes apenas a mistura com 30% de material fresado conseguia atingir o patamar de nível médio, pode agora ser utilizada para rodovias de até tráfego pesado. Nas misturas avaliadas pelo Departamento de Transportes de Nova York, assim como todas as misturas deste trabalho, podem ser utilizadas todas em rodovias de tráfego pesado.

Os critérios admitidos por Faccin (2018) são semelhantes aos de Nascimento (2008). Com o novo patamar de tráfego pesado, as misturas que eram antes consideradas para rodovias de tráfego médio – Bohn (2017) com 25% de RAP, Dept. NY (2018) com 50 e 100% de RAP e desta pesquisa com 10% de RAP – podem agora ser classificadas como tráfego pesado. Para Centofante (2016), a classificação continua sendo a mesma quando da primeira comparação com os limites propostos por Nascimento (2008). Cabe aqui salientar que mais estudos laboratoriais e de campo devem ser realizados para corroborar ou não com estas conclusões, contemplando particularidades de misturas, clima e tráfegos de diferentes regiões.

4.2.3.2. Resistência a Tração por Compressão Diametral

Após os ensaios de MR, os mesmos corpos de prova foram utilizados para a realização do ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral (RT). Foram utilizados 3 CP's por projeto, sendo estes acondicionados na temperatura de ensaios de 25°C por 12 horas. A média destes valores, os desvios padrões encontrados e os seus relativos coeficientes de variação encontram-se na Tabela 26.

Tabela 26 – Valores de Resistência a tração obtidos

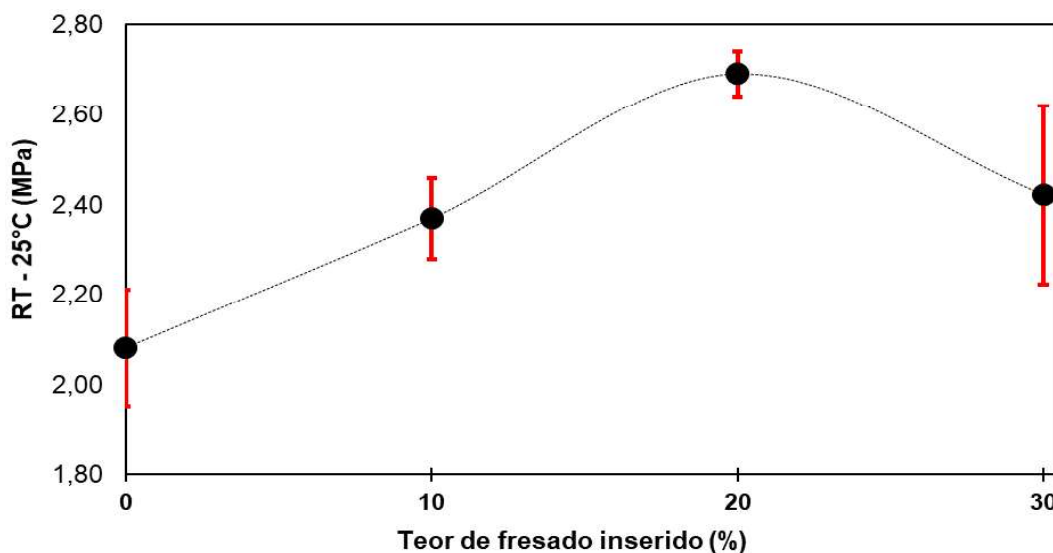
Projeto	RT (MPa)	DP	CV
M0	2,08	0,13	6,34%
M10	2,37	0,09	3,81%
M20	2,69	0,05	1,99%
M30	2,42	0,20	8,13%

Fonte: autor, 2018.

Verifica-se, a partir dos dados da Tabela 22, que há proporcionalidade no aumento da RT obtida com o percentual de RAP utilizado na mistura. Nota-se apenas uma queda de, aproximadamente, 10% entre os projetos M20 e M30. No gráfico abaixo (Figura 77), pode-se verificar a evolução dos valores de RT obtidos em função do teor de fresado incorporado na mistura e seus respectivos desvios-padrão. Assim como observado em ensaios anteriores, o teor de ligante final da mistura M30, para a resistência a tração, também se mostra muito influente, já que há uma redução neste parâmetro, ocasionado pela menor rigidez encontrada.

Nas especificações brasileiras, a DNIT ES 031/2006, exige como mínimo o valor de 0,65 MPa para misturas asfálticas com ligante convencional, enquanto a DNER 385/99 - Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero, determina que misturas asfálticas com ligante modificado por polímero devem possuir valores de RT no intervalo de 0,7 a 1,2 MPa. Analisando-se estas especificações, pode-se avaliar como satisfatório os resultados encontrados nesta pesquisa.

Figura 77 – Valores encontrados para RT em função do teor de fresado adicionado a mistura



Fonte: autor, 2018.

Nascimento *et al.* (2013) estudaram amostras contendo de 5 a 30% de material fresado utilizando CAP convencional (50/70) em todas elas. Em todas as misturas os valores obtidos de resistência a tração se mantiveram no intervalo de 0,7 a um pouco mais de 1,0 MPa, comportando-se de acordo com as diretrizes das duas normativas

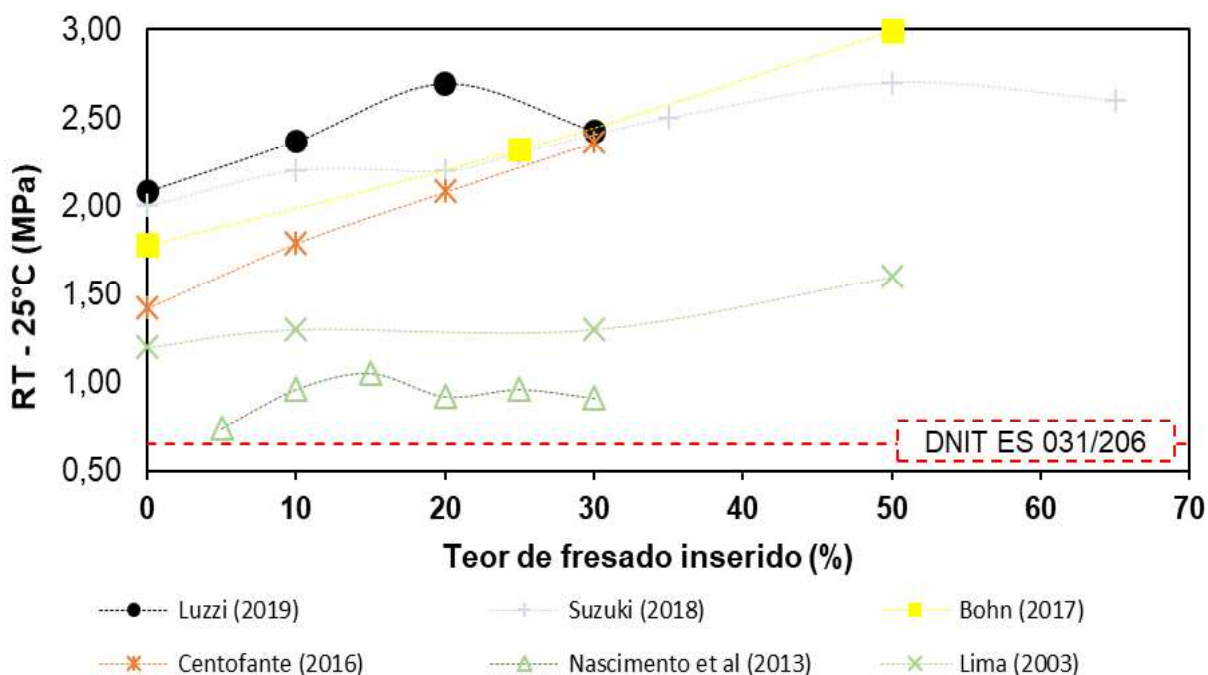
brasileiras citadas anteriormente. Não ficou clara, com os resultados encontrados, a evolução ou influência direta do RAP incorporado nas misturas e o valor de RT.

Para Centofante (2016), os resultados enquadraram-se na faixa de 1,4 (mistura sem fresado) a 2,36 MPa (mistura com 30% de RAP). Em Bohn (2017), estes valores partiram de 1,6, mistura sem a presença de fresado, para quase 3,0 MPa, com 50% de RAP incorporado. Lima (2003) encontrou valores de RT no intervalo de 1,2 – na amostra sem fresado – a 1,6 MPa, com a utilização de 50% de RAP.

Suzuki (2019) também avaliou a influência do teor de material fresado incorporado nas misturas asfálticas recicladas quanto a resistência a tração por compressão diametral. Cabe aqui salientar que foi utilizado o CAP do tipo 30/45 e os teores inseridos de RAP variaram entre 0 e 65%. A RT se enquadrou no intervalo de, aproximadamente, 2,00 a 2,50 MPa. Verifica-se que, assim como na maioria das misturas estudadas, os valores de RT aumentam com a inserção de maior de RAP.

Evidenciou-se que nas quatro pesquisas citadas há uma influência diretamente proporcional no valor de resistência a tração encontrado com o percentual de RAP incorporado à mistura, ou seja, quanto maior o teor de RAP maior é a RT. O gráfico da Figura 78 ilustra estes resultados em comparação ao desta pesquisa.

Figura 78 – Comportamento da Resistência a Tração encontrados em Luzzi (2019), Suzuki (2019), Bohn (2017), Centofante (2016), Nascimento *et al* (2013) e Lima (2003) pela influência do teor de RAP



Karim *et al.* (2016) também avaliaram misturas recicladas à quente e corrobora para as demais pesquisas descritas anteriormente. Duas composições granulométricas foram elaboradas e teores de 20, 30, 40 e 50% de RAP foram incorporadas as misturas. Para as duas composições, aproximadamente, 40% foi o ganho em resistência a tração encontrados em relação às sem a adição de material fresado.

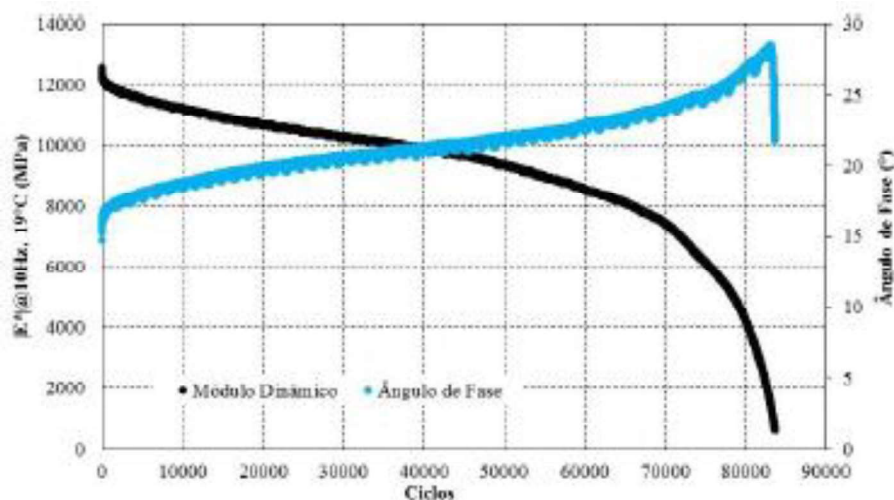
A influência do teor de RAP pode estar associado ao ligante envelhecido presente neste material, o qual torna a mistura mais rígida. Além disso, a origem do material fresado utilizado precisa ser levada em conta, visto que RAP composto por ligantes modificados por polímeros ou borracha, possivelmente, terão melhores resultados nos ensaios analisados.

4.2.3.3. Fadiga a Tração-Compressão (Ensaio Uniaxial Cíclico)

O fenômeno de fadiga é aliado à deformação permanente, uma das principais patologias recorrentes das rodovias brasileiras. Sua correta avaliação e modelagem é importante para reduzir sua ocorrência, o qual é de compreensão que exige um nível de considerações bastante complexas. A análise à fadiga das misturas será discutida com dados provenientes do modelo S-VECD, como as curvas características de dano (C vs S) e as envoltórias de ruptura do critério de falha GR. Estes dados foram inseridos no software LVECD e pôde-se avaliar as curvas de dano médio acumulado para as quatro misturas analisadas e também o dano por fadiga quando aplicados a estruturas típicas de pavimentos.

Foram elaboradas as curvas de módulo dinâmico e ângulo de fase versus o número de ciclos para cada amostra, de modo a verificar o ciclo de ruptura da amostra, após a extração dos dados brutos da prensa UTM-25. Verifica-se que o valor de módulo dinâmico diminui constantemente enquanto o ângulo de fase cresce até o pico, onde ocorre uma queda, onde se caracteriza a ruptura. O número de ciclos encontrado no pico do ângulo de fase é determinado como o valor de N_f , conforme ilustrado na Figura 79.

Figura 79 - Módulo dinâmico e ângulo de fase versus número de ciclos de ensaio de fadiga

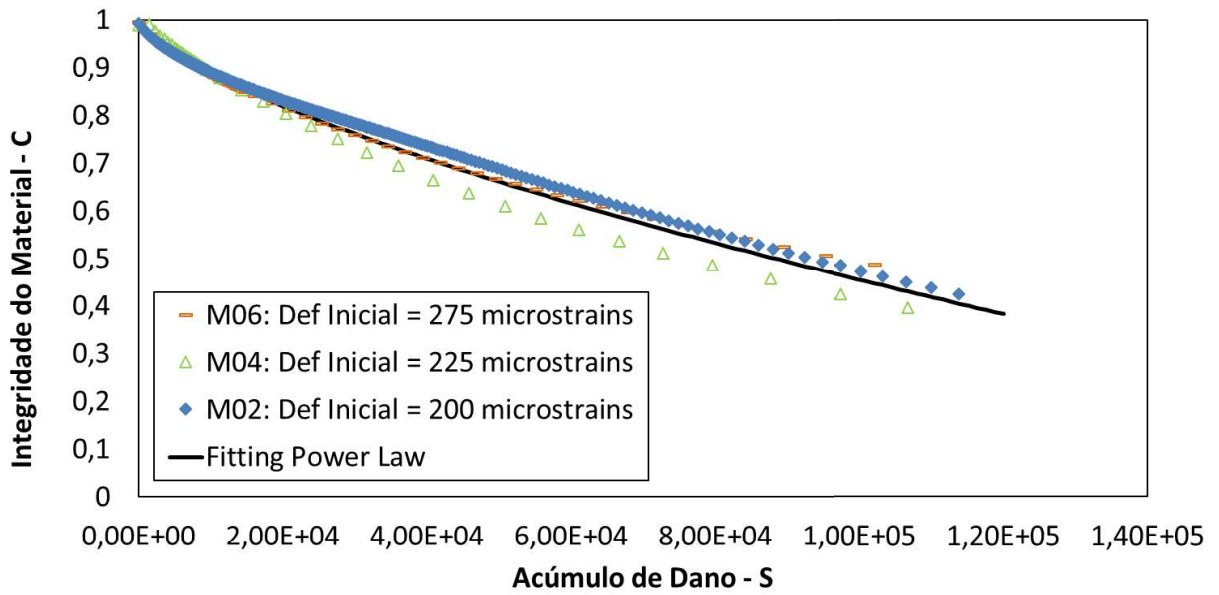


Fonte: adaptado de Boeira, 2018.

Para a análise dos resultados, o modelo S-VECD foi ajustado para diferentes magnitudes de deformação, sendo que em cada amostra um nível pré-determinado foi estabelecido, variando de 200 a 300 microstrain. Anteriormente a cada ensaio de fadiga, realizou-se um teste de “fingerprint”, ou seja, um ensaio de módulo dinâmico de tração-compressão de curto prazo para obter a variação da rigidez entre as amostras. A partir do software MATLAB com os dados do ensaio de módulo complexo e de fadiga tração-compressão, se elabora a curva C (integridade do material) vs S (acúmulo de dano), a qual representa uma característica do material. Por este motivo, para cada uma das amostras ensaiadas, as curvas C vs S devem se sobrepôr, o que aconteceu para as misturas estudadas.

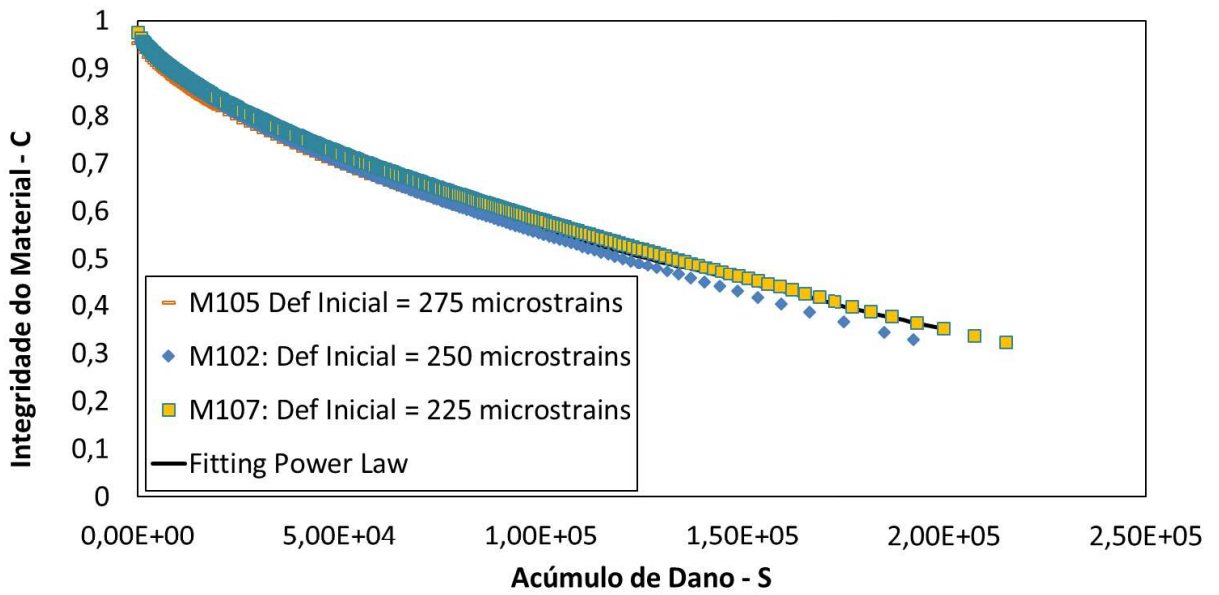
A relação C vs S é independente de muitos dos fatores que afetam o desempenho à fadiga como temperatura e frequência, por exemplo. Deste modo, pode descrever o comportamento de dano a partir da realização de uma quantidade relativamente pequena de ensaios de laboratório. Após a plotagem dos dados das amostras no gráfico, é construída uma curva de ajuste (fitting) para cada conjunto de amostras, montando assim o comportamento das misturas. 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. Isto é demonstrado nas curvas expostas nas Figuras 80 a 83.

Figura 80 – Curvas C vs S da mistura M0



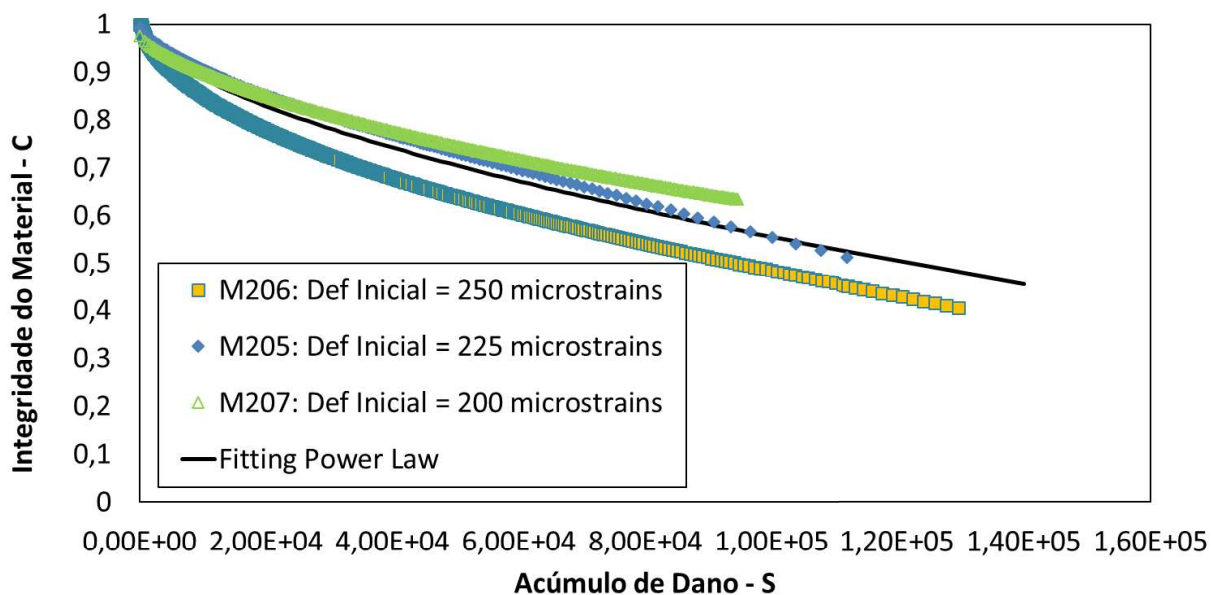
Fonte: autor, 2018.

Figura 81 – Curvas C vs S da mistura M10



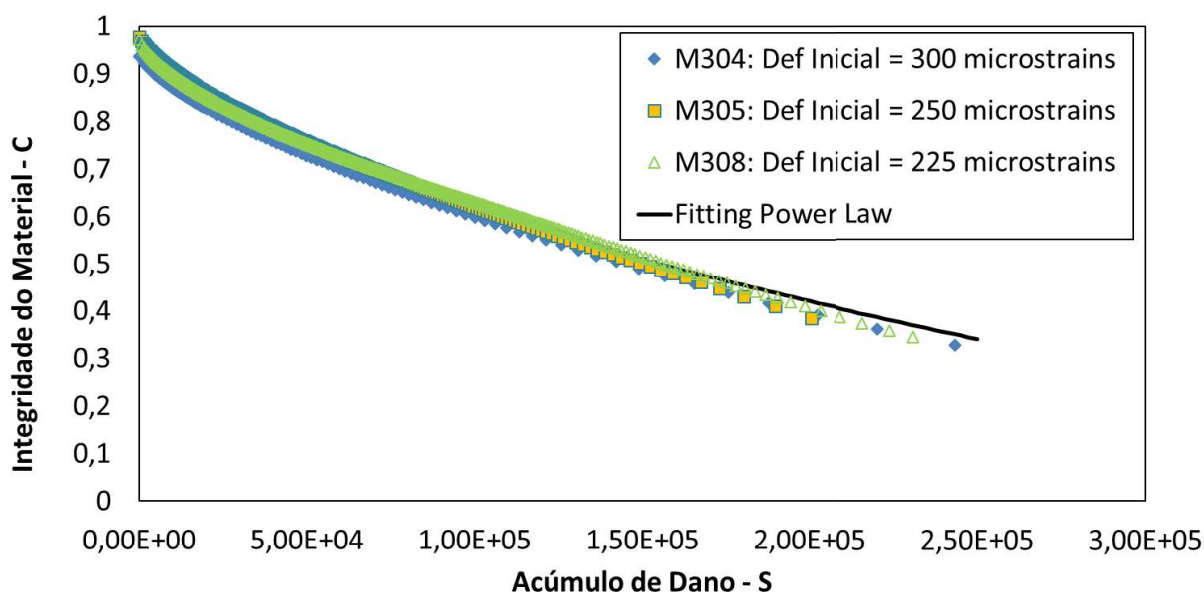
Fonte: autor, 2018.

Figura 82 – Curvas C vs S da mistura M20



Fonte: autor, 2018.

Figura 83 – Curvas C vs S da mistura M30

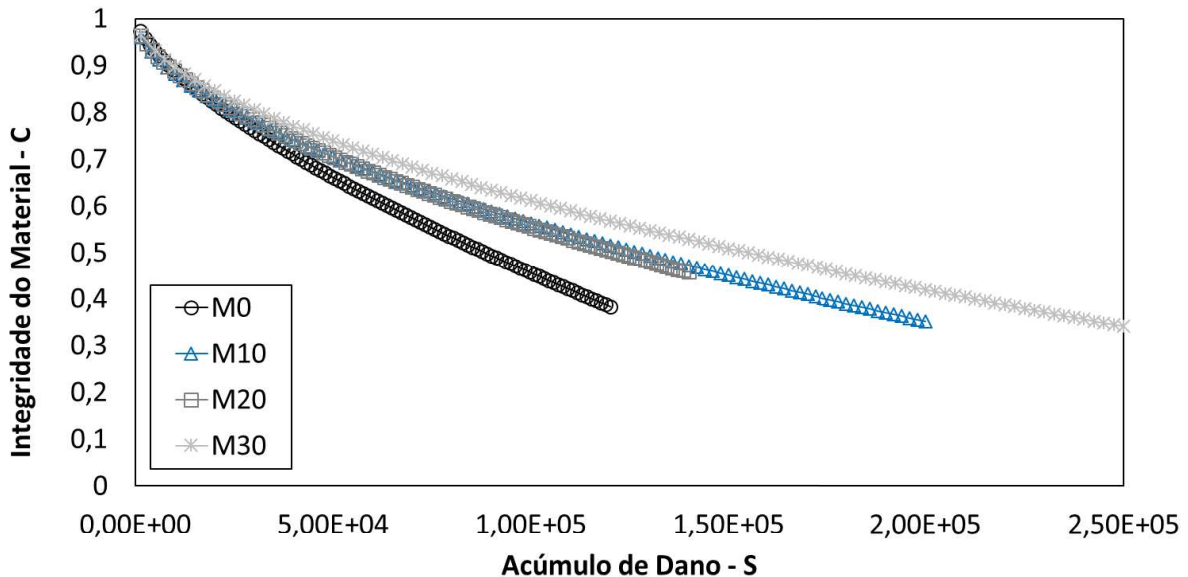


Fonte: autor, 2018.

Verifica-se que a aplicação do modelo de dano contínuo para todas as misturas se comportou de maneira adequada, mesmo para deformações iniciais diferentes de para a realização dos ensaios. Ainda, para melhor avaliação do comportamento das

misturas, na Figura 84 estão as curvas C vs S para todas as misturas estudadas nesta pesquisa.

Figura 84 – Curvas C vs S para todas as misturas (curvas fitting)



Fonte: autor, 2018.

Verificando o comportamento da integridade e da evolução do dano das misturas é possível inferir o desempenho a fadiga das misturas, mas uma melhor avaliação pode ser realizada com as envoltórias de ruptura e com as simulações em estruturas típicas de pavimentos. Nota-se, que a mistura com incorporação de 30% de fresado apresenta um acúmulo de dano maior, enquanto a mistura de referência, o menor, mas todas as quatro misturas rompem no intervalo de 0,3 e 0,5 de integridade de material, destacando-se a M20, a qual tem os maiores valores para este quesito.

As concavidades das curvas tendem a apresentar a taxa de evolução da integridade pelo dano acumulado e permitem avaliar que M10, M20 e M30 tendem a apresentar uma taxa de perda menor de integridade e uma resistência maior ao dano acumulado. Por esta evolução das curvas não se pode atribuir uma influência direta da incorporação de fresado no comportamento à fadiga das misturas.

O critério de fadiga adotado para esta pesquisa foi o desenvolvido por Sabouri e Kim (2014), onde a taxa de variação média de energia de pseudo deformação liberada por ciclo de ensaio (GR), gerando as envoltórias de ruptura GR vs Nf. Pelo

modelo de potência, apresentado pela equação $G^R = Y \times N_f^{\Delta}$, as envoltórias são ajustadas e apresentam formato linear na escala logarítmica.

O Y e o Δ são os coeficientes do critério de ruptura Gr versus Nf (Gr é a taxa de variação da média da energia de pseudo deformação em referência ao número de ciclos). De posse desses parâmetros, é possível então a utilização de soluções analíticas e sistemas computacionais como o FLEXPAVE e o LVECD (Layered Viscoelastic Pavement Analysis For Critical Distresses) para a determinação da vida de fadiga (Nf) de estruturas de pavimentos considerando a velocidade do tráfego e as variações sazonais e diárias de temperatura. Na Tabela 27 são apresentados os coeficientes C11 e C12 obtidos pelo fitting da curva C vs S e os coeficientes Y e Δ das envoltórias de ruptura para cada uma das misturas.

Tabela 27 - Coeficientes C11, C12, Y e Δ para cada mistura

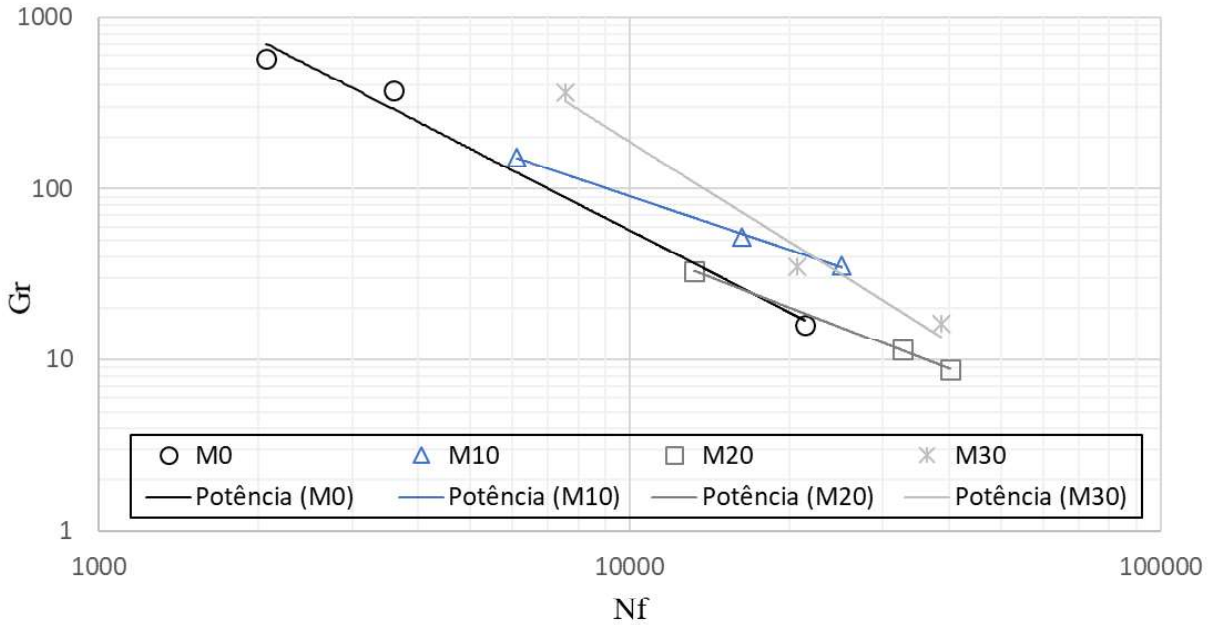
Mistura	C11	C12	Y	Δ
M0	0,000202	0,685987	1,31E+08	-1,59
M10	0,000624	0,568923	1,40E+06	-1,05
M20	0,000475	0,594290	2,62E+06	-1,19
M30	0,000515	0,575492	1,08E+10	-1,94

Fonte: autor, 2018.

Assim como a elaboração das curvas características de dano, as envoltórias de ruptura GR vs Nf também foram geradas, e bem como as curvas C vs S, são únicas para cada material. Segundo Sabouri e Kim (2014), isto a torna uma propriedade fundamental do material na resistência ao dano, sendo ainda, independente da temperatura e do modo de carregamento.

As misturas que tendem a um melhor desempenho a fadiga apresentam envoltórias mais acima e a direita no gráfico, além de menores inclinações. Na Figura 85 estão representadas as envoltórias de ruptura GR vs Nf de todas as misturas e a Tabela 28 demonstra os dados das equações e R² de cada uma das curvas.

Figura 85 – Envoltória Gr x Nf para todas as misturas



Fonte: autor, 2018.

Verifica-se que, a partir das curvas da Figura 82, possivelmente, as misturas M10 e M20, são as duas misturas que possuem um melhor desempenho a fadiga, por possuírem uma inclinação da curva menor em comparação as outras. Já para M0, nota-se que a inclinação bem como o posicionamento dela em comparação com as demais é indicativo de pior desempenho a fadiga.

Por se tratar de curvas de comportamentos parecidos, a concreta análise e, não deixar dúvidas às conclusões tomadas, deve-se avaliar o comportamento das misturas com a inserção delas em camadas de pavimentos típicos com condições semelhantes de tráfego e clima, o que será realizado adiante nesta pesquisa com o software LVECD.

Tabela 28 – Dados da equação de GR para todas as misturas

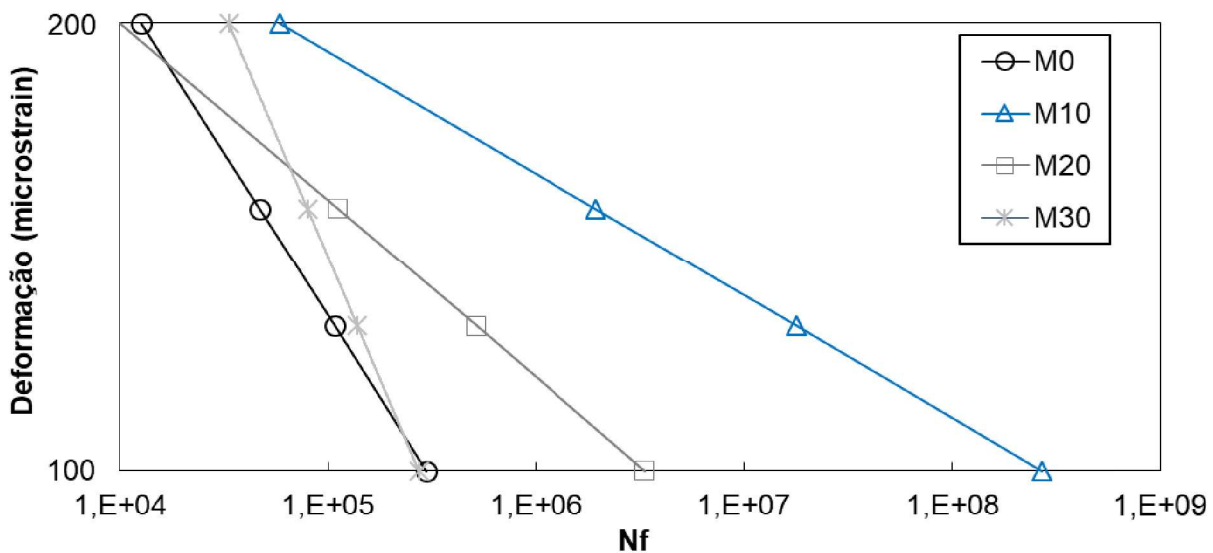
Mistura	Equação da curva de GR	R ²
M0	$GR = 1,31 \times 10^7 \times N_f^{-1,59}$	0,99
M10	$GR = 1,40 \times 10^6 \times N_f^{-1,05}$	0,99
M20	$GR = 2,60 \times 10^6 \times N_f^{-1,19}$	0,99
M30	$GR = 1,10 \times 10^{10} \times N_f^{-1,94}$	0,98

Fonte: autor, 2018.

De posse dos dados da Tabela 24, pode-se dizer que o tratamento estatístico das misturas teve um bom comportamento e pouca variabilidade, sendo apenas para a mistura M30, um valor menor de R^2 , mas mesmo assim, aceitável para os parâmetros analisados.

Uma segunda análise realizada com os resultados do ensaio de fadiga a tração-compressão foi a utilização da simulação de ciclos de ruptura desenvolvida por Nascimento (2016), onde abrange-se os parâmetros das curvas C vs S, as envoltórias de ruptura GR e os dados da caracterização viscoelástica obtidos nos resultados dos ensaios. Este método é considerado o mais próximo da realidade do ensaio. Os resultados estão plotados no gráfico da Figura 86.

Figura 86 – Simulação da Nf a partir do critério de ruptura GR, 19°C e 10Hz – Nascimento (2016)



Fonte: autor, 2018.

Corroborando com a análise realizada a partir das envoltórias de GR, a partir da Figura 82, verifica-se que as duas misturas com um possível desempenho melhor à fadiga são as com 10 e 20% de incorporação de material fresado na composição, bem como a mistura de referência tem o seu comportamento definido, possivelmente, como o pior perante a análise de fadiga. A mistura M30, que antes tinha uma posição mais à direita do gráfico – o que lhe proporcionava um desempenho até melhor que M10 e M20 – agora situa-se em uma condição de desempenho inferior às misturas com 10 e 20% de RAP e em uma situação muito parecida à mistura de referência.

Para o cálculo do dano (N/Nf) no software LVECD, foram elaboradas as estruturas seguindo o padrão de acordo com a Figura 87, alterando a espessura do revestimento de 5, 10 e 15cm, para avaliar separadamente a influência das camadas no desempenho a fadiga das misturas. Ainda, as estruturas foram avaliadas com clima da região de Curitiba/PR (mais próxima no software), as camadas consideradas não 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.

Figura 87 – Estruturas utilizadas para análise dos dados no LVECD

	Espessuras (cm)	Módulo (MPa)	ν
REVESTIMENTO	5, 10 e 15	E* (cada mistura)	0,35
BASE	15	202	0,3
SUBBASE	20	197	0,4
SUBLEITO	0	84	0,45

Fonte: autor, 2018.

Os coeficientes de Poisson utilizados estão de acordo com o sugerido por Balbo (2007). Os valores de MR das camadas de base e sub-base foram retirados de Ribas (2014) e os módulos de resiliência do subleito, em Santos (2016) que estudou solos do estado do Rio Grande do Sul. Os Módulos Dinâmicos foram utilizados, pois avalia-se que estes valores levam em consideração os efeitos viscoelásticos na sua formulação. Estes foram extraídos a partir do modelo 2SP1D a 19°C e 10Hz do módulo complexo realizado anteriormente. Estas características são as mesmas para o ensaio de Fadiga a Tração Direta e também para a equação do Nascimento (2015). As três estruturas foram expostas a um tráfego, para 120 meses – tempo final de projeto – de 5×10^6 , 1×10^7 e 5×10^7 .

A partir do software LVECD, os valores de pseudo rigidez e a relação de dano (N/Nf) são calculadas em pontos diferentes na espessura da camada asfáltica. A N/Nf 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/Nf 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. As Figuras 88, 89 e 90 ilustram, respectivamente, nos tráfegos de 5×10^6 , 1×10^7 e 5×10^7 para 120 meses, as curvas de dano acumulado encontradas para todas as misturas estudadas com as três estruturas.

Verifica-se que, em todos os casos, o dano acumulado diminui com o aumento da espessura do revestimento, bem como sofre um decréscimo com o aumento do VDM estudado. É importante salientar que as misturas contendo 10 e 20% de fresado na mistura possuem um comportamento melhor em comparação as outras duas, sendo que até mesmo para o tráfego mais elevado, o valor encontrado para dano na estrutura com menor espessura, fica próximo de 0,60 para M20 e 0,20 para M10. Ainda em relação a estas duas misturas, cabe aqui ressaltar que os valores de dano para as estruturas com camadas de revestimento asfáltico mais espessas e menores volumes de tráfego (5×10^6 e 1×10^7) é praticamente nulo, mesmo quando considerado os 120 meses de projeto de vida da estrutura. Isto demonstra a qualidade da mistura, sendo possível a utilização deste tipo de solução para revestimento de rodovias com VDM considerado médio e pesado.

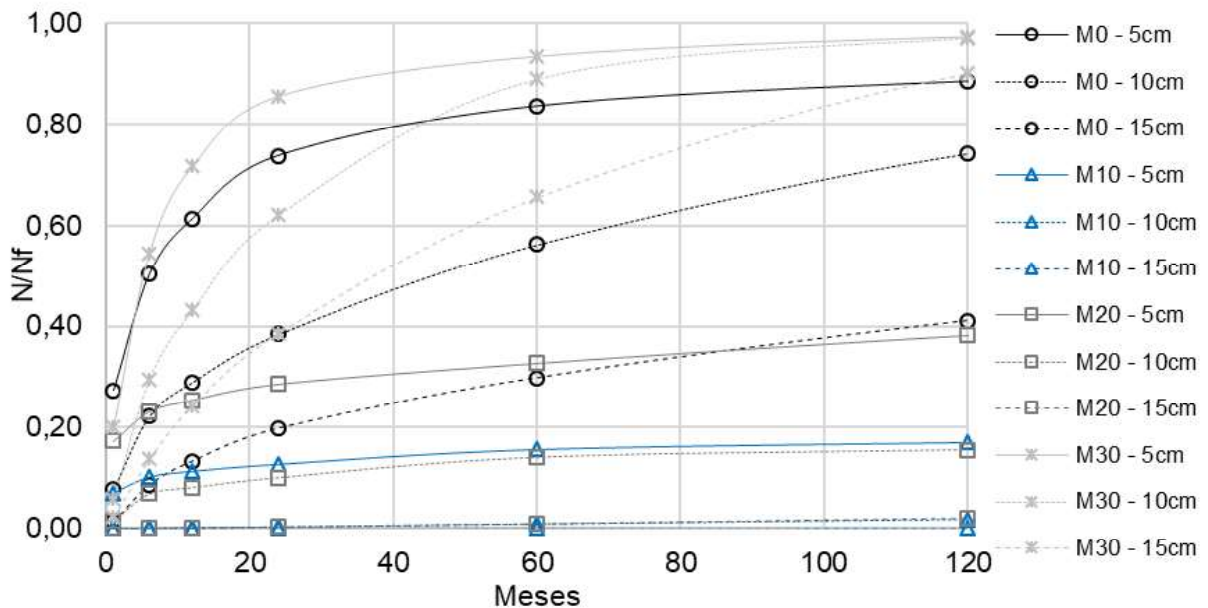
Nas misturas M0 e M30, o resultado encontrado correspondeu ao determinado anteriormente nas simulações de Nf pelas envoltórias de ruptura GR, sendo as duas de pior comportamento em relação ao dano acumulado em virtude de fadiga. A M30, ainda, pode ser ranqueada como última colocada neste quesito, pois até mesmo para o tráfego leve de 5×10^6 , o dano chegou próximo de 1,00 para as estruturas com 5cm de revestimento asfáltico. Para estas duas misturas, há a possibilidade de utilização em rodovias de menor volume de tráfego ou até mesmo em acostamentos e acessos de rodovias de alto VDM.

Quando se avalia a deformação permanente, através do ensaio de Flow Number, nota-se que o comportamento das misturas é o mesmo que para a fadiga, sendo a mistura com 10% de RAP a melhor, seguida da M20, M0 e por fim a M30. Nota-se que percentuais de até 20% de incorporação de material fresado influenciam positivamente nos resultados mecânicos das misturas e não necessitam de processos

avançados de usinagem. Por outro lado, visto os resultados encontrados nos ensaios realizados, a inserção de 30% ou mais de RAP nas misturas, demonstrou uma influência negativa, nestes dois principais parâmetros avaliados, e os processos da usinagem precisam ser revistos.

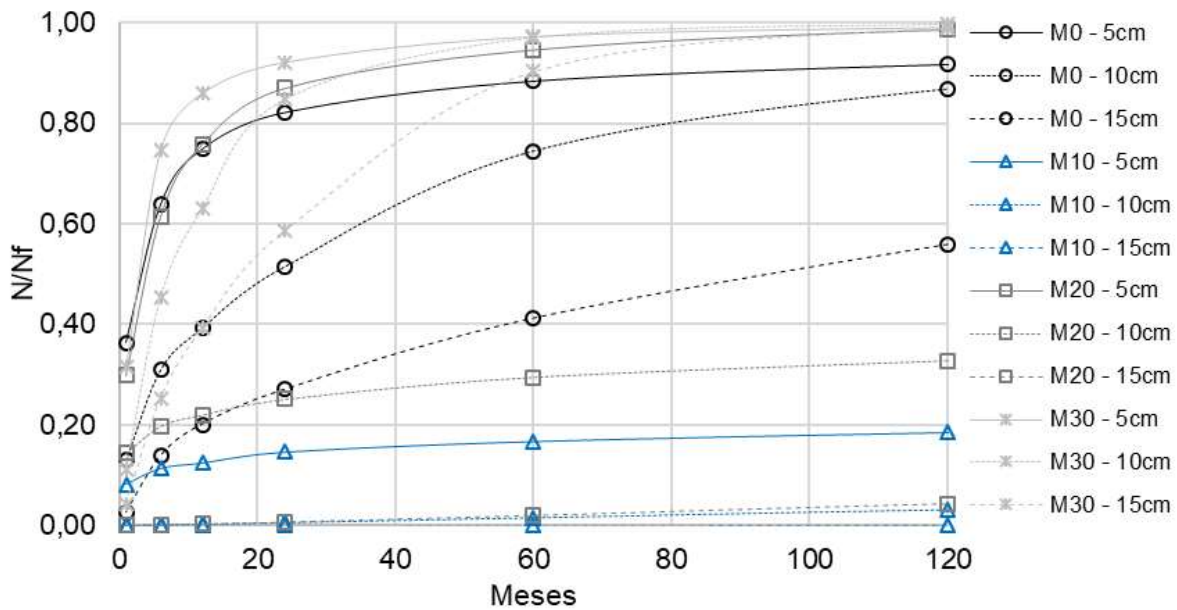
Na comparação destes dois ensaios e, especificamente, analisando a M30, pode-se chegar a dois questionamentos que, em função do quesito prático aplicado, necessitam de mais detalhamentos para conclusões assertivas: o maior percentual de ligante final encontrado influencia na menor rigidez das misturas, mas ao mesmo tempo poderia auxiliar no melhor resultado à fadiga, o que não ocorreu. Por outro lado, isto pode ter ocorrido em consequência da não efetividade do processo de mistura reciclada, o qual com 30% de fresado poderia ter necessidade de implementos específicos para a melhor capacidade de mistura.

Figura 88 – Dano acumulado de 120 meses para todas as misturas com tráfego de 5×10^6



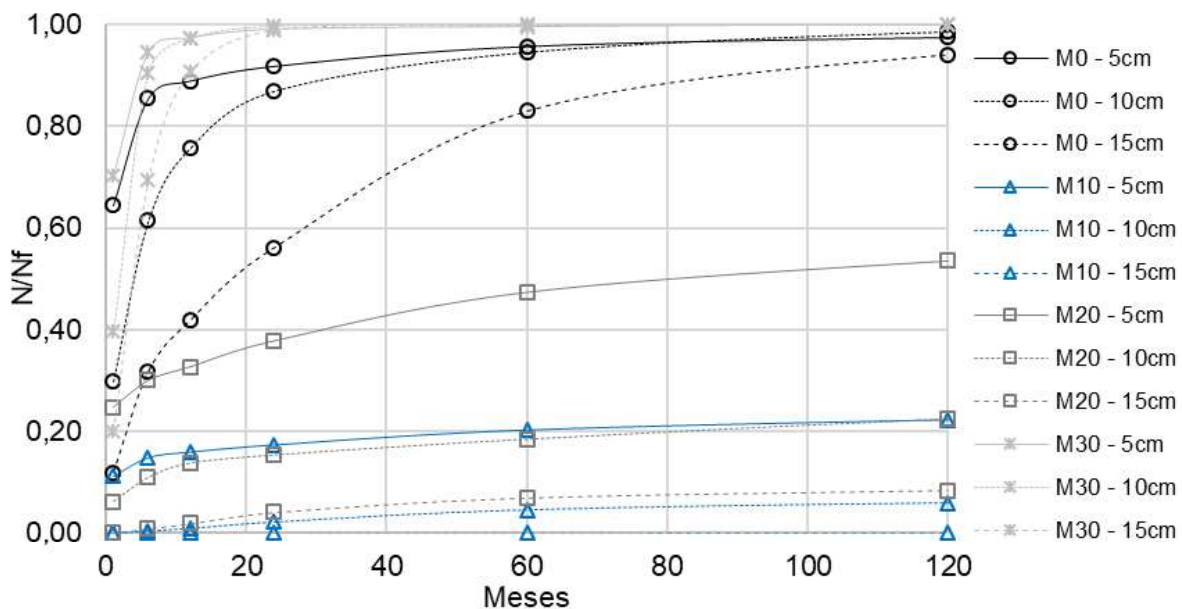
Fonte: autor, 2018.

Figura 89 – Dano acumulado de 120 meses para todas as misturas com tráfego de 1×10^7



Fonte: autor, 2018.

Figura 90 – Dano acumulado de 120 meses para todas as misturas com tráfego de 5×10^7

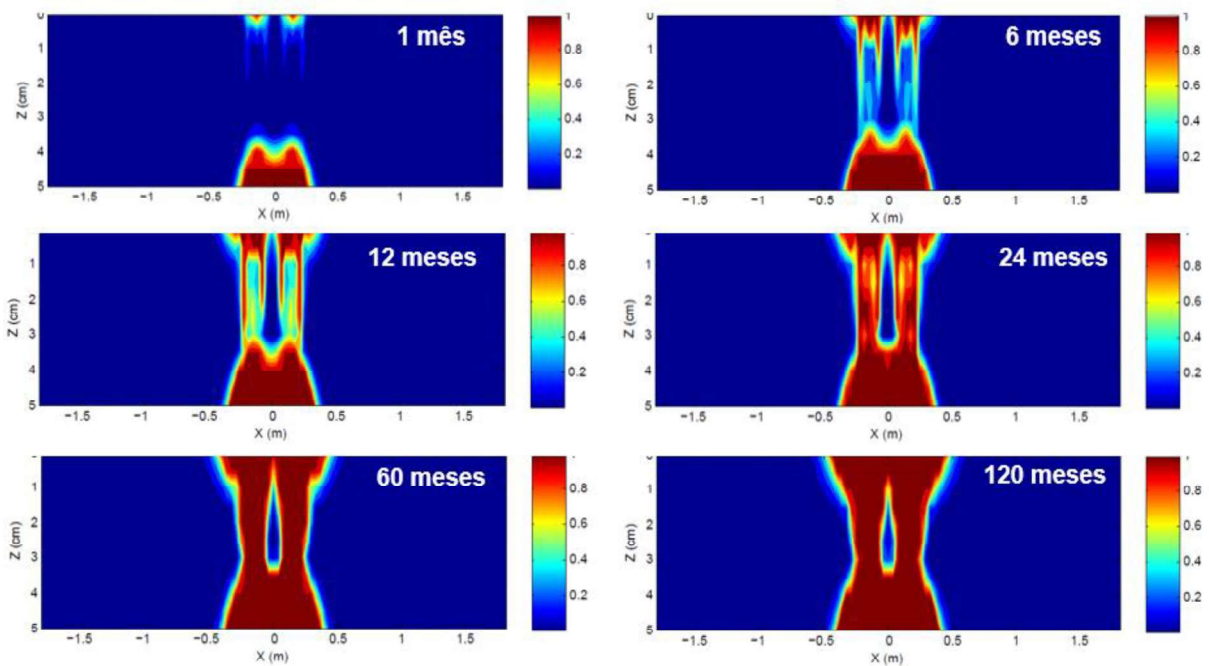


Fonte: autor, 2018.

Os resultados do software LVECD ainda permitem avaliar, a partir de gráficos térmicos, o dano evoluindo dentro da espessura da camada asfáltica para cada período avaliado. A Figura 91 demonstra a evolução do dano (de 1 a 120 meses) na

estrutura de pavimento com revestimento em M0, com 5 centímetros de espessura e um VDM de 5×10^6 . Destaca-se que esta Figura é um exemplo desta possibilidade e todos estes gráficos térmicos para todas as misturas e tráfegos estarão dispostos no apêndice D.

Figura 91 – Dano representado em gráfico térmico – M0 com 5 cm e VDM de 5×10^6



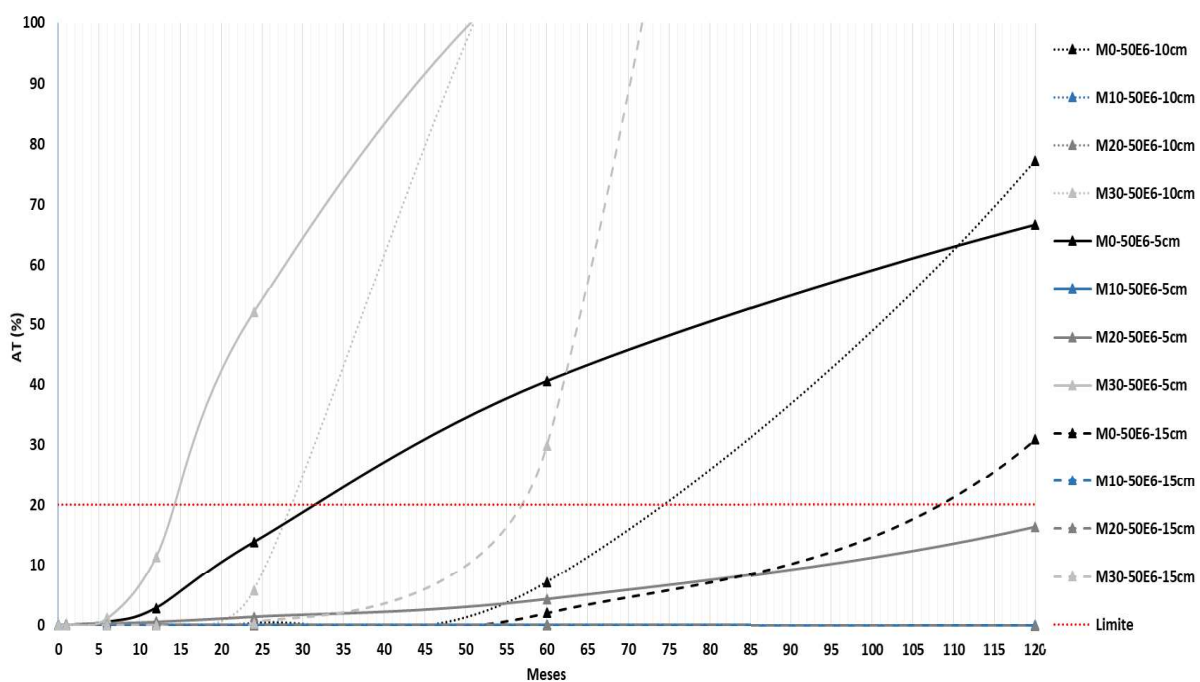
Fonte: autor, 2018.

Como já é sabido e nota-se, claramente, que o maior e primeiro dano atrelado a fadiga é verificado nas fibras inferiores do revestimento (verificado para todas as misturas) e, possivelmente, este pavimento necessitaria de intervenções a partir do mês 24, ou até mesmo antes, quando se avalia o dano por fadiga.

Com o intuito de facilitar o entendimento do funcionamento do comportamento do dano acumulado, realizou-se, através da função de transferência desenvolvida por Nascimento (2015), a transformação de dano acumulado em percentual de área trincada de revestimento, de acordo com os meses de projeto. Assim, a avaliação deste parâmetro se torna mais viável para a possível elaboração de projetos e também na tomada de decisões para a conservação e restauração de pavimentos. Esta função de transferência tem uma abordagem da viscoelasticidade e em ensaios mecânicos utilizando dados de campo e laboratório estudados e monitorado pela Rede Temática de Asfalto em diversos estados brasileiros.

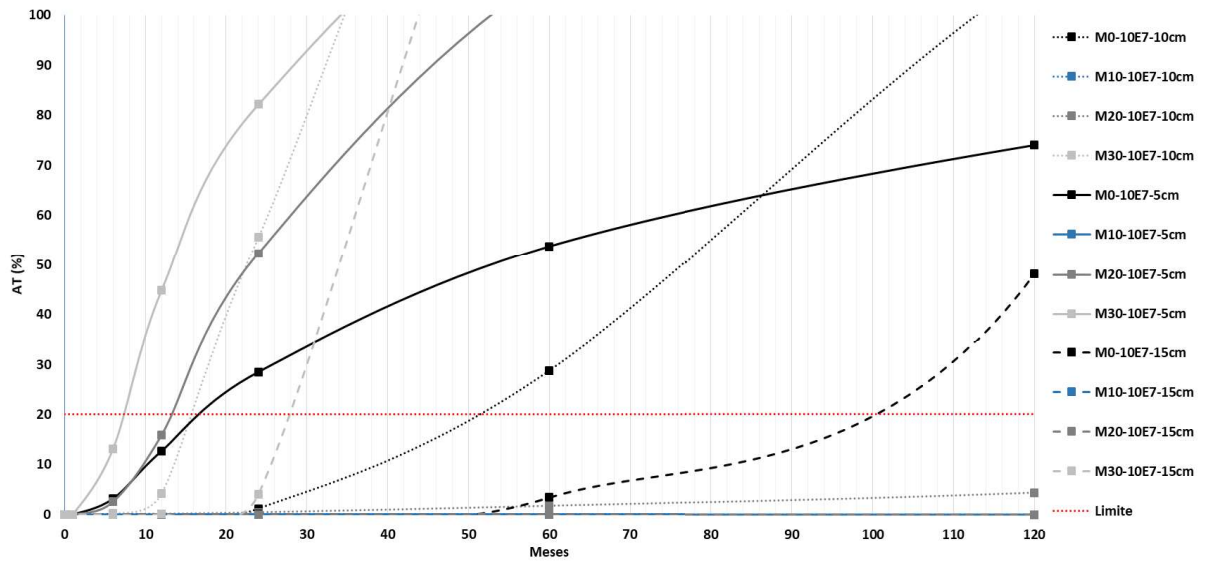
Além da abordagem viscoelástica, Nascimento (2015) utilizou o modelo S-VECD, variações de temperatura, velocidade dos veículos, distribuição horária do tráfego, dados de ensaios de módulo complexo e de fadiga por tração direta. Aplicando-se a função de transferência se chegou a valores de percentual de área de revestimento trincada, as quais foram plotadas em um gráfico, explanando todas as misturas e a evolução desta área nos 120 meses de projeto avaliado e os diferentes VDM utilizados. Adotou-se 20% de limitante para avaliação das misturas, pois este valor condiz com a realidade de um pavimento severamente trincado, (PINTO 1991; DNIT, 2006). As Figura 92, 93 e 94 demonstram todas as curvas de área trincada das misturas nos tráfegos de 5×10^6 , 1×10^7 e 5×10^7 .

Figura 92– Percentual de área trincada de todas as misturas para tráfego de 5×10^6



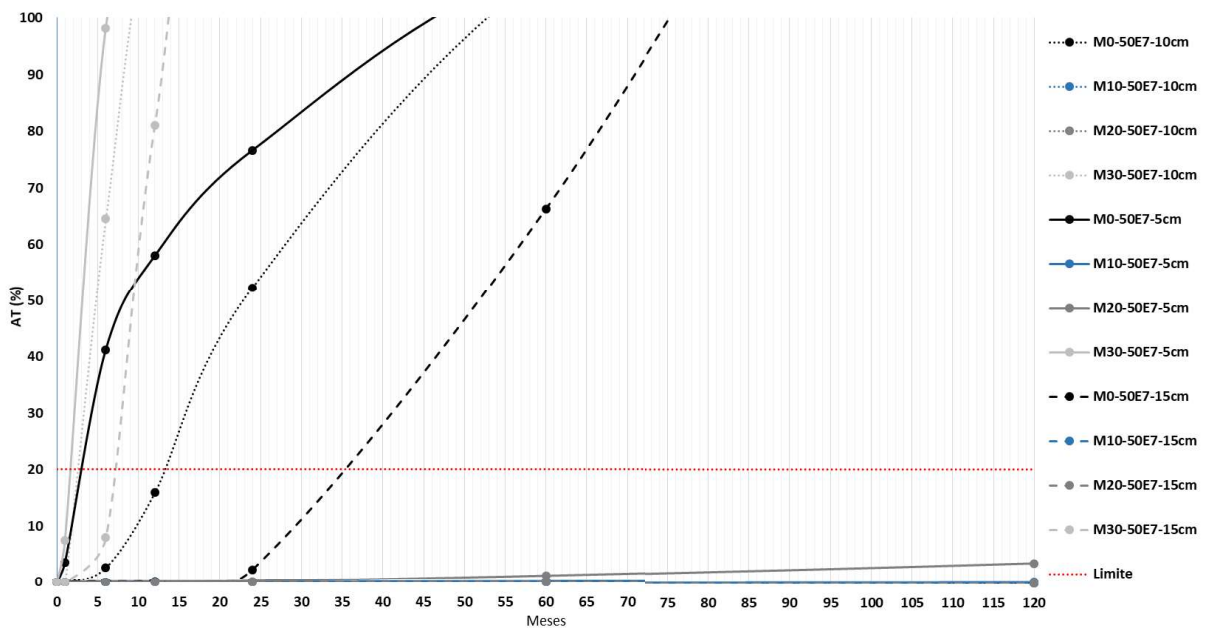
Fonte: autor, 2018.

Figura 93 – Percentual de área trincada para todas as misturas de 1×10^7



Fonte: autor, 2018.

Figura 94 – Percentual de área trincada para todas as misturas de 5×10^7



Fonte: autor, 2018.

Nos gráficos das Figuras 92, 93 e 94 pode-se notar que as misturas M10 e M20, praticamente, não possuem valores de área trincada para nenhum dos tráfegos ou espessuras diferentes de revestimento. Este comportamento comprova o avaliado anteriormente, tanto para as envoltórias de GR quanto para a simulação de Nf pela

equação de Nascimento (2015). Estas duas misturas, novamente, demonstram um padrão acima das outras duas no desempenho a fadiga. Isto leva a conclusão da viabilidade de aplicação destas misturas para qualquer fluxo de tráfego, não extrapolando os simulados nesta pesquisa.

A mesma conclusão pode ser extraída para as misturas M0 e M30, visto que tem um pior desempenho frente a fadiga. Destaca-se aqui a maior relevância relacionada a espessura do revestimento, já que o aumento deste quesito tem uma influência maior na vida de fadiga da mistura quando comparada ao aumento do fluxo de veículos. Ainda, verifica-se que a M0 detém o melhor comportamento entre estas duas misturas, quando analisados VDM e espessura de revestimento. Novamente, estas misturas necessitam de avaliações com maiores detalhes, mas, sabe-se que, a partir dos resultados encontrados nos ensaios de fadiga, é necessária a utilização em rodovias de menor tráfego ou em acostamentos e acessos.

Pasetto e Baldo (2017) ao avaliarem misturas com incorporação de 20 a 40% de RAP, analisando a dissipação de energia e perda de rigidez, verificaram que as misturas contendo material fresado e ligante modificado por polímero obtiveram um resultado positivo com o aumento do teor de RAP. Já para as misturas contendo os mesmos percentuais de fresado, mas com ligante convencional, foi encontrada uma piora no comportamento a fadiga de apenas 1% entre as misturas com maior percentual de RAP.

Basueny (2016) analisou misturas contendo de 0, 15, 25 e 40% de fresado frente ao comportamento a fadiga. Encontrou desempenhos a fadiga que, assim como na presente pesquisa, não sofrem influência direta do teor de RAP incorporado, sendo a mistura com 25% a que teve o pior desempenho, a com 0 e 15%, com comportamentos semelhantes e ligeiramente maiores que a de 25% e a de 40%, com o melhor resultado apresentado para todos os níveis de tensão avaliados nos ensaios. Isto pode ser explicado pela maior rigidez inicial medida nesta mistura, o que acarreta a possibilidade de melhor comportamento a fadiga.

Izaks *et al.* (2002) avaliaram misturas contendo alto teor de RAP, uma mistura de referência sem material fresado e adicionado 30 e 50%. Quando se avaliou a fadiga destas misturas, notou-se que houve um comportamento similar entre as misturas com 30% de fresado e a mistura de referência. Para a mistura de 50% de RAP, verificou-se uma diminuição da resistência a fadiga. Isto pode estar atribuído a grande substituição de ligante novo pelo envelhecido e mais enrijecido pertencente ao RAP,

o que confere uma maior rigidez a mistura, mas a perda das características elásticas da mistura.

Ainda, os mesmos autores concluem que há a possibilidade de utilização de altos teores de material fresado nas misturas asfálticas com melhoramento do comportamento mecânico, sem grande influência direta na resistência a fadiga e a possibilidade de reativação de ligante asfáltico envelhecido presente no material fresado utilizado.

O Departamento de Transportes de Nova York também avaliou misturas asfálticas recicladas contendo 50, 75 e 100% de RAP quanto à resistência a fadiga. Avaliou-se que, para todos os níveis de tensão ensaiados, a mistura com 100% apresentou o pior comportamento, já para as misturas intermediárias os resultados têm similaridade. Deste modo, nota-se que não se evidencia um comportamento pré-determinado em função da incorporação do material fresado.

Nota-se que as literaturas apresentadas se aproximam dos resultados aqui avaliados, a inserção de RAP não caracteriza a resistência a fadiga de misturas recicladas e uma modelagem do comportamento deste parâmetro se torna complexa. Mesmo assim, verifica-se que há a possibilidade de utilização destas misturas, melhorando as características mecânicas e reduzindo o impacto ambiental e econômico gerado pela utilização de RAP.

Ainda, realizou-se outra análise comparando os comportamentos a fadiga das misturas desta pesquisa com as de Schuster (2018) e Boeira (2018), utilizando-se dos valores do índice Fator de Área de Fadiga (FAF). De acordo com Nascimento (2015), este índice se dá por meio do cálculo da área sob a curva de fadiga ($\epsilon \times N_f$), em espaço log-log, limitada entre duas amplitudes de deformação, neste caso entre 100 e 200 μs , que segundo o mesmo autor é o intervalo mais próximo das deformações encontradas na fibra inferior dos revestimentos brasileiros.

Simplificadamente, quanto maior o valor do FAF, melhor é o comportamento a fadiga das misturas, visto que, as maiores áreas sob a curva representam um maior número de ciclos. Desta maneira, foi possível elaborar uma classificação das três pesquisas de acordo com o FAF, a qual está descrita na Tabela 29. Cabe aqui salientar que os autores das duas pesquisas citadas não utilizaram material fresado nas composições das misturas, mas a utilização de diferentes tipos de ligantes asfálticos (50/70, modificado por polímero, ecoflex e HIMA) e métodos diferentes de dosagem (Marshall e SUPERPAVE) proporcionaram a verificação do posicionamento

das misturas recicladas desta pesquisa em relação as diferentes possibilidades de misturas asfálticas.

Tabela 29 – Ranking de misturas pelo parâmetro FAF calculado pela equação de Nascimento (2008)

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

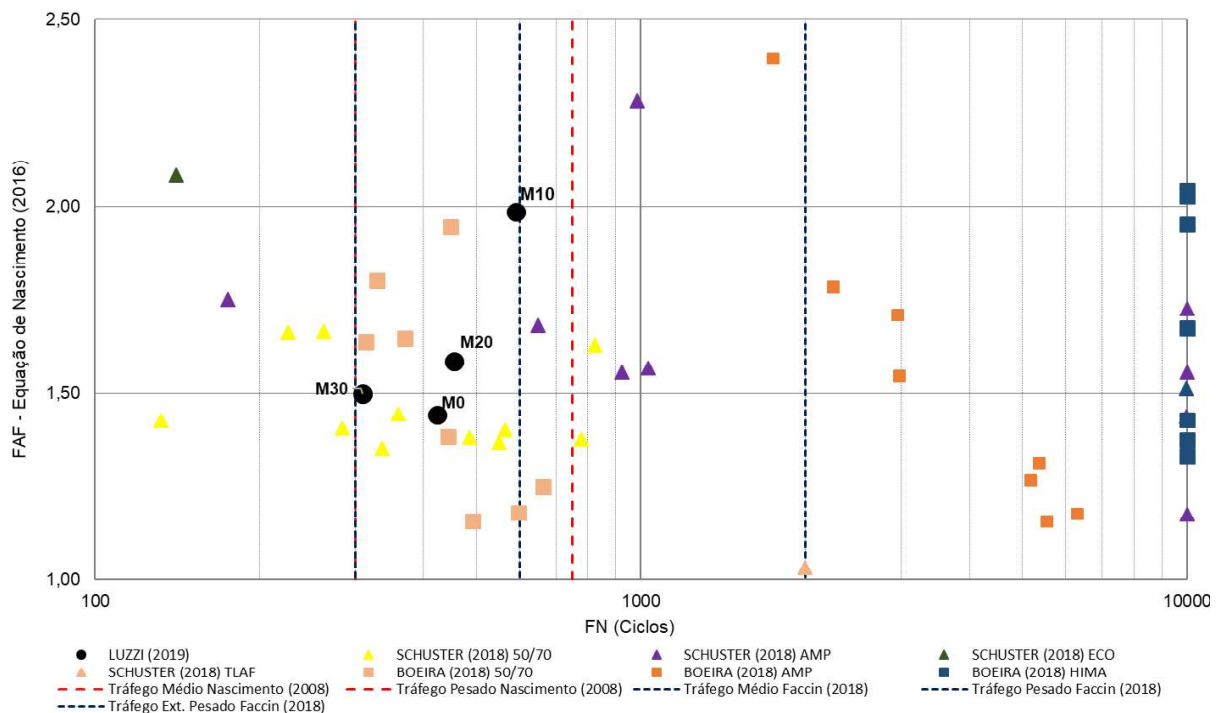
Fonte: autor, 2018.

Nota-se, como visto anteriormente nas curvas de $\epsilon \times N_f$, cálculo de dano e percentual de área trincada, que a M10 possui o melhor comportamento a fadiga comparada a M0, M20 e M30, sendo esta, ainda, bem posicionada perante as demais misturas analisadas. Verifica-se apenas uma mudança entre M0 e M30, tendo a segunda, através do critério FAF, um comportamento melhor a fadiga em relação a primeira. Vê-se também que, além do bom posicionamento da M10, as três outras misturas deste trabalho encontram-se em posições intermediárias na classificação,

ficando à frente de misturas com ligantes modificados, mas atrás de misturas com ligante convencional (50/70). Deste modo, não se verifica um comportamento à fadiga definido das misturas em relação ao tipo de ligante asfáltico ou metodologia de dosagem e, como já constatado, ao percentual de RAP incorporado nas misturas. A caracterização a fadiga das misturas asfálticas é complexa e, assim, denota-se a necessidade de estudos mais aprofundados.

Uma segunda análise foi realizada, utilizando-se de Schuster (2018) e Boeira (2018), a relação entre o FAF e os resultados de Flow Number, ensaio que indica a resistência a deformação permanente das misturas. A figura 95 ilustra os resultados obtidos.

Figura 95 – Comparação entre Luzzi (2019), Schuster (2018) e Boeira (2018) da relação FAF x NF



Fonte: autor, 2018.

Verifica-se que a M10 se sobressai a M0, M20 e M30 nos dois parâmetros propostos e é a única que poderia ser elaborada para a utilização em rodovias de tráfego pesado, de acordo com o limite proposto por Faccin (2018). Ressalta-se que todas as misturas aqui estudadas podem ser utilizadas em rodovias de tráfego médio e com a possibilidade de economia de recursos financeiros e mitigação de impactos ambientais. Vê-se que, em comparação as outras duas pesquisas, o comportamento

das quatro misturas é aproximado àquelas com ligante asfáltico 50/70 e em alguns casos se assemelha ou é superior a algumas misturas com ligante modificado por polímero da pesquisa de Schuster (2018). Salienta-se que as misturas desta pesquisa e Schuster (2018) foram produzidas em usinas e por isso podem acarretar em comportamentos diferentes em comparação as de Boeira (2018), produzidas em laboratório, quando retrata-se o caso do ligante modificado por polímero, visto o desempenho muito superior em FN.

É importante frisar que novas pesquisas em misturas asfálticas, tanto de campo quanto em laboratório, precisam levar em conta o fator vida de fadiga e suas correlações, pois é o parâmetro que determina a condição e tempo de vida útil dos pavimentos. Além disto, cabe aqui lembrar a relevância de comparações entre diferentes revestimentos, pois a variabilidade de insumos e tipos de ligantes asfálticos, por exemplo, pode ser encontrada em diversas regiões do país e o conhecimento do comportamento de uma gama de misturas pode auxiliar na determinação da correta solução a ser adotada.

4.2.4. Viabilidade econômica das estruturas propostas

A avaliação técnica e a ambiental das misturas recicladas à quente é muito relevante, mas de acordo com levantamentos periódicos da ANP, os materiais asfálticos têm se tornado cada vez mais caros e estes resultados necessitam de uma análise de viabilidade econômica para a motivação da execução dos serviços de pavimentação asfáltica utilizando revestimentos que possuam material fresado em sua composição.

A estrutura exposta na Figura 86 foi deteriorada, sendo os Valores de E^* para Base, Sub-base e subleito de 150, 130 e 70 MPa, redução de espessura de 15 para 10 na base e 20 para 15cm na sub-base, já que, como será abordado na análise de resultados, a estrutura para M10 e M20 não chegaram a 20% de área trincada por fadiga em 120 meses e, para esta análise de viabilidade, é necessária uma igualdade de condições entre as estruturas.

Para se chegar a um valor de usinagem e aplicação (R\$/m³) para cada uma das quatro misturas estudadas foram utilizadas as composições do Sistema de Custos Rodoviários (SICRO)/DNIT do mês de julho de 2018 para serviços e preços de materiais asfálticos – para o mesmo período – retirados do site da Agência Nacional

do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), para o estado do Rio Grande do Sul.

Ainda, no cálculo foram considerados a usinagem, aplicação e transporte de concreto asfáltico, compra e transporte de ligante asfáltico, bem como o transporte do fresado de uma obra de fresagem até o pátio da usina. Cabe aqui salientar que a distância média de transporte tanto para o concreto asfáltico quanto para o do material fresado foi fixada em 60 km. As camadas inferiores de pavimento não entraram neste cálculo por serem iguais para as estruturas.

O custo unitário por m³ para usinagem e aplicação das misturas foram calculados e os resultados estão resumidos na tabela 30. Verifica-se que o custo para os serviços descritos diminuiu com a inserção de material fresado, o que era esperado, visto que o teor de ligante novo inserido reduziu em aproximadamente 28% e o material asfáltico representa, aproximadamente, 50% do total dos serviços. Entretanto, a redução não se demonstrou na mesma magnitude (aproximadamente, 6,5%) da diferença encontrada entre os teores ótimos no momento da dosagem dos projetos. Isto pode ter acontecido em razão da adição de novos serviços, como o transporte de RAP, bem como um incremento de valor da usinagem das misturas com fresado em função do beneficiamento e logística necessária anteriormente a introdução na usina. Esta redução de custos ainda pode ser maximizada conforme o aumento da escala da produção das misturas, onde a otimização dos serviços inerentes aos tratamentos do RAP reduz o custo associado ao produto final.

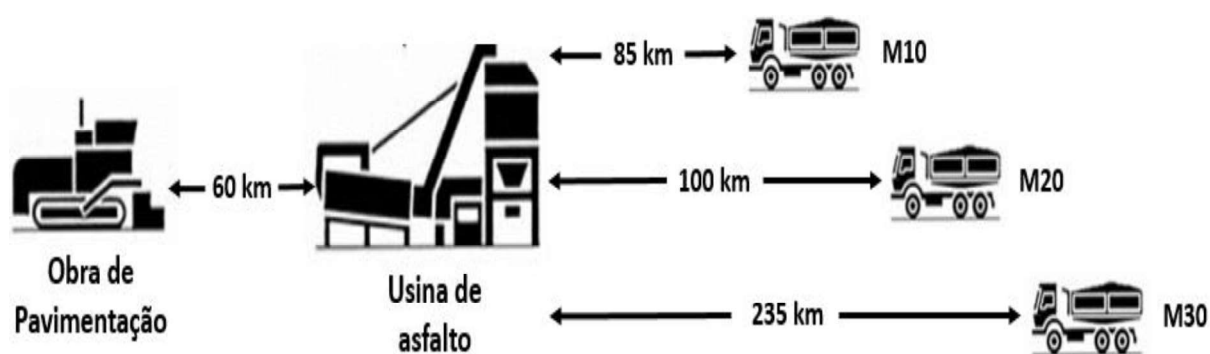
Tabela 30 – Custos de usinagem e aplicação por m³ para cada uma das misturas

Mistura	Ligante + Transp. ligante (R\$/m³)	Usinagem + Aplicação CBUQ (R\$/m³)	Transp. CBUQ (R\$/m³)	Transp. Fresado (R\$/m³)	TOTAL (R\$/m³)
M0	347,21	266,20	63,54	-	676,94
M10	325,27	281,49	63,45	4,69	674,91
M20	298,82	298,30	63,70	9,38	670,20
M30	240,61	316,85	64,28	14,08	635,82

Fonte: autor, 2018.

Com os resultados obtidos na Tabela 26 e fixando-se a distância de transporte entre a usina e a obra em 60 km, pode-se avaliar as distâncias máximas de transporte de RAP, do estoque/trecho até a usina, as quais, igualariam o preço final das misturas recicladas a de referência, ou seja, neste caso todas chegariam a R\$ 676,94/m³. Nesse critério, a M10 poderia ser utilizada transportando-se fresado de uma distância de, aproximadamente, 85 km até usina enquanto a M20 e M30 de 100 e 235 km, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 96. Isto denota a viabilidade financeira do uso de reciclagem de misturas asfálticas.

Figura 96 – Distâncias de transporte possíveis para o RAP em função do custo das misturas



Fonte: autor, 2018.

De posse dos dados das Figura 92, 93 e 94, verificou-se que as estruturas contendo as misturas M20 e M30 não chegaram a alcançar 20% de área trincada, mesmo quando utilizados os maiores tráfegos nas estruturas menos resistentes. Todas as estruturas foram deterioradas para a possibilidade da segunda avaliação econômica, o custo da estrutura ao longo da sua vida útil.

Ainda, a M10 e M20 não tiveram grandes alterações em seu comportamento e o limitante de área trincada reduziu para 10%, o que condiz com a realidade dos parâmetros de desempenho das Concessionárias de Rodovias Brasileiras. Para a M10 – que não sofreu, praticamente, nenhum dano nas estruturas – o Nf foi determinado em 180 meses, admitindo-se, mesmo sem ter alcançado, os 10% de área trincada. Para as outras estruturas, o Nf foi calculado e os resultados estão expostos na Tabela 31.

Tabela 31 – Custos das estruturas ao longo da vida útil

Mistura	R\$/m³	Nf	R\$/Nf
M0	R\$ 676,94	2,50E+05	R\$ 0,0027078
M10	R\$ 674,91	8,11E+07	R\$ 0,0000083
M20	R\$ 670,20	7,19E+07	R\$ 0,0000093
M30	R\$ 635,82	1,67E+05	R\$ 0,0038149

Fonte: autor, 2018.

Verifica-se que, avaliando unicamente o valor associado aos serviços, a escolha seria por utilizar a mistura com 30% de material fresado, o que pode se tornar equivocado. Por outro lado, quando se analisa o R\$/Nf, nota-se que, assim como nos resultados de ensaios que inferem a resistência a deformação permanente e de vida de fadiga, o ideal é a escolha da mistura com 10% de RAP, seguida da M20, M0 e posteriormente da M30. Isto permite concluir que projetos de estruturas de pavimentos com revestimentos asfálticos reciclados à quente necessitam passar por esta análise, pois o RAP influencia negativa ou positivamente no comportamento das misturas e, assim se define soluções a serem tomadas para o melhor desempenho das estruturas propostas, sendo avaliadas técnica, ambiental e economicamente.

5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa buscou demonstrar a possibilidade de produzir misturas asfálticas recicladas a partir da implementação de uma usina de produção volumétrica e verificar a influência do RAP, tanto no processo de usinagem quanto nos ensaios laboratoriais. Avalia-se positivamente o alcance dos objetivos propostos.

As granulometrias do material fresado foram realizadas antes e depois da passagem na grelha de diâmetro 3/4" e após em uma peneira de diâmetro 3/4". Neste primeiro processo, o RAP se demonstrou com uma granulometria mais graúda e houve uma dificuldade em enquadrar as misturas dentro das especificações do DNIT utilizadas nesta pesquisa. Assim, tornou-se indispensável o melhor tratamento do fresado anteriormente a entrada da usina. Quanto ao segundo processo de peneiramento, avaliou-se positivamente, pois, além das composições granulométricas das misturas puderem ser elaboradas de modo que as tolerâncias estipuladas pela normativa vigente não fossem extrapoladas em nenhum dos projetos propostos, no processo de usinagem não ocorreram produtivos.

O processo proposto de implementação de RAP na usina pode ser avaliado de maneira satisfatória. Na instalação do silo e correia não foram encontradas dificuldades e apenas o ajuste com calha metálica com a abertura superior do misturados precisaram ser realizados. Com as instalações realizadas, o avanço das etapas se fez de forma convencional e as misturas puderam ser usinadas sem prejuízo ao produto final.

No controle tecnológico realizado percebeu-se algumas inconsistências quanto ao teor de ligante asfáltico final e as granulometrias das misturas. Isto pode estar relacionado diretamente ao beneficiamento do RAP, a falta de calibração da usina e incorporação de agregados com descontinuidades de granulometria e umidades ou possíveis contaminações. Entretanto, estes detalhes podem ser corrigidos facilmente e a qualidade e produtividade das misturas asseguradas.

Para a avaliação das propriedades de deformabilidade das misturas, no ensaio de módulo de Resiliência, verificou-se que a incorporação de material fresado enrijece as misturas, sendo a M20 a que possui maior MR. Apenas na M30, o valor de MR sofreu um decréscimo em relação a M20, o que pode ser explicado em função do teor de ligante asfáltico final maior na M30, possibilitando a menor rigidez. No Módulo Complexo, não se pode definir um comportamento com maior participação da parcela

elástica ou viscosa das misturas. Isto, de certo modo, era esperado em virtude de os teores entre misturas serem baixos (10%) e o total incorporado, 30%, também. Além disto, soma-se a não utilização de diferentes tratamentos necessários aos ligante no processo de dosagem das misturas asfálticas recicladas.

O Desgaste Cântabro, que avalia a abrasão das misturas após 300 revoluções no aparelho Los Angeles, não demonstrou uma característica para a incorporação de material fresado, mas os resultados encontrados estão muito abaixo do limite máximo estipulado pela especificação. Para o Dano por umidade induzida, a mesma característica pôde ser percebida e, o efeito da água para as misturas avaliadas não pode ser considerado prejudicial.

Na sequência foram realizados os ensaios em que há a necessidade de danificação das misturas. No Flow Number não se observou uma característica com a incorporação de material fresado nas misturas. Em ordem, as misturas que demonstraram o melhor comportamento neste ensaio são: M10, M20, M0 e M30. Ressalta-se, ainda, que todas estas misturas podem se enquadrar em projetos para rodovias para tráfego médio ou pesado, dependendo dos critérios que estão sendo utilizados. No ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral, o comportamento dos resultados encontrados se assemelha ao encontrado para o MR, fato que pode estar atribuído ao mesmo sentido de carregamento de ensaio. O ensaio de Fadiga Tração-Compressão trouxe um comportamento das misturas que se assemelha ao encontrado no FN. Tanto as envoltórias de ruptura de $GR \times N_f$, as simulações de vida de fadiga realizadas a partir de Nascimento (2016), as curvas de dano acumulado e os percentuais de área trincada depois da utilização da função de transferência, demonstraram que a mistura que possui o melhor comportamento a fadiga é a M10, seguidas da M20, M0 e, após, considerada a pior de desempenho a fadiga, a M30. Assim como nesta pesquisa, as literaturas internacionais consultadas também não encontraram um comportamento definido da incorporação do RAP nas misturas.

Não se pode concluir a respeito do comportamento das misturas conforme o teor de RAP inserido, o que pode ser devido ao fato dos diferentes teores inseridos e finais de ligante asfáltico encontrados, o desconhecimento da eficiência do misturador para misturas recicladas com entrada de RAP a frio, bem como os baixos e pequenos intervalos entre os teores de material fresado incorporados. Isto denota a necessidade da continuidade de estudos práticos em relação a reciclagem à quente, os quais,

principalmente, necessitam implementar outras metodologias de inserção de RAP, avaliar o procedimento apropriado e eficiente de mistura em diferentes tipos de usina, bem como diferentes tipos de ligantes asfálticos e agregados de origens diversas.

Ademais, aliado as questões técnica e ambiental avaliadas, uma análise de custos foi realizada, a partir dos resultados encontrados nos ensaios de fadiga, a fim de auxiliar na verificação da viabilidade de aplicação da técnica por completo. Verificou-se que a M30 teve menor custo unitário por m³, o que era esperado pelo menor teor de ligante inserido, mas quando se avalia este custo estendido na vida de fadiga das misturas, a M10 deve ser a escolhida, já que pelos ensaios avaliados é a que suportaria as cargas oriundas do tráfego, por um preço associado menor quando comparada as demais misturas.

Por fim, avalia-se como positiva a reciclagem à quente das misturas, tanto do ponto de vista ambiental e técnico, quanto do econômico, visto que pode gerar uma grande economia de recursos associados à usinagem e serviços de concreto asfáltico. Alguns pontos, como o processo de usinagem, ainda precisam ser revistos e atualizados, mas há a possibilidade de utilização e os resultados dos ensaios mostram que esta técnica é viável e promissora.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após as conclusões da presente pesquisa, pode-se sugerir para trabalhos futuros:

- ✓ Realizar ensaios de fadiga a compressão diametral com as misturas desta pesquisa, com o intuito de alimentar o novo método de dimensionamento (Medina);
- ✓ Realizar a usinagem e aplicação de misturas recicladas à quente, em campo, para posterior análise da evolução de trincamentos e deformações permanente;
- ✓ Avaliar o comportamento de misturas com material fresado, com outros agregados minerais e tipos de ligantes asfálticos;
- ✓ Avaliar diferentes métodos de reativação de ligantes do material fresado para melhor aproveitamento;

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ARSHAD, A. K., AWANG, H., SHAFFIE, E., HASHIM, W., RAHMAN, Z. A. **Performance Evaluation of Hot Mix Asphalt with Different Proportions of RAP Content**. International Conference on Civil & Environmental Engineering (CENVIRON) Penang, Malaysia, 2017.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Hot-Mix Recycling**. Manual Series n. 20 (MS-20). Second Edition. College Park, Maryland, USA. 1986.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION - ARRA. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book**. U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-98-042, Washington, D.C. December, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15897- Misturas asfálticas à quente – Preparação de corpos de prova com compactador giratório Superpave**. Rio de Janeiro, 2010.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO. **Standard Specifications for SUPERPAVE Volumetric Mix Design**. AASHTO MP2, Washington, D. C., 2001.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BAPTISTA. A. M. C. **Misturas Betuminosas Recicladas à quente em Central: Contribuição para o seu estudo e aplicação**. 2006. 340 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal, 2006.

BARKSDALE, R. D.; ALBA J.; KHOSLA N. P. K.; KIM R.; RAHMAN M.S. **Laboratory determination of resilient modulus for flexible pavement design**. Project 1-28, Final Report, Georgia Tech Project, USA, 1997.

BASTOS, J. B. S.; J. B. Soares; L. A. H. Nascimento. **Critérios Para os Resultados do Ensaio Uniaxial de Carga Repetida de Misturas Asfálticas em Laboratório a partir do desempenho em Campo**. Transportes, v. 25, n. 2, p. 19-40, 2017.

BASUENY, A. **Complex modulus and fatigue behaviour of recycled hot mix asphalt: laboratory investigation and modelling at the material levels**. 506 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Superior de Tecnologia da universidade de Quebec, Canadá, 2016.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro. PETROBRAS: ABEDA, 2008. 475 p.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales**. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

BOEIRA, F. D. **Estudo da rigidez, da deformação permanente e da fadiga de misturas asfálticas com ligantes convencionais e modificados**. 284p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. São Paulo. Exceção Editorial, 3ª Ed. 2016. 127 p.

BOHN, K. A. **Avaliação de Misturas Asfálticas Recicladas Mornas com Uso de Ligantes Convencional e Modificado por Polímero**. 255 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017.

BROCK, J. D. (2003). **“Milling and Recycling”**. Technical Paper. T-127, ASTEC, Chattanooga, USA, 34p.

BROSSEAUD, Y. **Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França**. 3º Salão de Inovação ABCR – 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões, Foz do Iguaçu/PR, 2011.

BUKOWSKI, J. R. **Guidelines for the Design of Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)**. Memorandum, ETG Meeting, FHWA Superpave Mixtures Expert Task Group, San Antonio, TX, 1997.

CARDOSO, A. P. P. **Estudo em laboratório do comportamento mecânico de misturas betuminosas utilizadas em pistas experimentais**. 170 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2002.

CASTRO NETO, A. M. **Proposta de Projeto de Dosagem de Concreto Betuminoso Reciclado à quente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2000.

CAVALCANTI, L. S. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas**. 196p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CENTOFANTE, R. **Estudo Laboratorial da Utilização de Material Fresado em Misturas Asfálticas Recicladas à quente**. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

CEZARO JUNIOR, T. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas**. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008.

CIBER. **Usinas de Asfalto: Tecnologias e Processos**. Porto Alegre, 2012. 110 p.

Confederação Nacional de Transportes – CNT. **Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos**. 67 p. Brasília. 2018.

CUNHA, C. M. **Reciclagem de Pavimentos Rodoviários Flexíveis - Diferentes Tipos de Reciclagem**. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, 2010.

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING - UNIVERSITY OF MINNESOTA. **Investigation Of Recycled Asphalt Pavement (RAP) Mixtures**. Final Report 1998-2002. Minnesota, USA, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER. **PRO 13: Coleta de amostra de misturas betuminosas para pavimentação**. Rio de Janeiro, 1994, 5 p.

_____. DNER-ME 043/95: **Misturas Betuminosas à quente – Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, 1995, 11p.

_____. DNER-ME 053/94: **Misturas Betuminosas – Percentagem de betume**. Rio de Janeiro, 1994, 5p.

_____. DNER-ME 054/97: **Equivalente de areia**. Rio de Janeiro, 1997.

_____. DNER-ME 081/98: **Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNER-ME 086/94: **Agregado – determinação do índice de forma**. Rio de Janeiro. 5p, 1994

_____. DNER-ME 089/94: **Agregados - Avaliação da durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou de magnésio**. Rio de Janeiro, 1994

_____. DNER - ME 383/99: **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com Asfalto-Polímero - Ensaio Cântabro**. Rio de Janeiro, 1999.

_____. DNER - ES 385/99: **Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero**. Rio de Janeiro, 15p. 1999.

_____. DNER - ES 386/99: **Pavimentação - Pré-misturado à quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito**. Rio de Janeiro, 1999.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **ES 031: Pavimentos Flexíveis - Concreto Asfáltico**. Rio de Janeiro, 2006. 14 p.

_____. DNIT. ES 033: **Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico reciclado à quente na usina**. Rio de Janeiro, 2005. 13 p.

_____. DNIT – ME 135/2018: **Pavimentação asfáltica – Mistura asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2018, 6p. Origem: DNER-ME 133/1994.

_____. DNIT. ME 136: **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Rio de Janeiro, 2018. 6 p.

_____. DNIT. ME 180: **Misturas asfálticas – Determinação do dano por umidade induzida**. Rio de Janeiro, 2010. 9 p.

_____. DNIT. IPR 720: **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. 2º ed. Rio de Janeiro, 2006, 310 p.

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

DOYLE, J. D.; HOWARD, I. L. **Compactability and bitumen utilization of 100% warm mixed RAP**. In: Transportation Research Board Annual Meeting, 89, 2010, Washington. Anais... Washington: TRB, 2010.

EL-MAATY, A. E. A.; ELMOHR, A. I. **Characterization of Recycled Asphalt Pavement (RAP) for Use in Flexible Pavement**. American Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol 8, Issue 2, pg 233-248. Dubai, UAE, 2015.

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.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION – EAPA. **Industry Statement on the recycling of asphalt mixes and use of waste of asphalt pavements**. Brussels, Belgium. July, 2005.

FACCIN, C. **Concretos Asfálticos em Utilização no Rio Grande do Sul: Comportamento Mecânico e Desempenho em Campo quanto à Deformação Permanente**. 222 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) PPGE/Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

FALCÃO, M.F.B.; SOARES, J.B. **Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação**. In: CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 26. Natal. ANPET, v. 1, p. 169-81, 2002.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Pavement Recycling Executive Summary and Report**. U.S. Department of Transportation, FHWA-SA-95-060, Washington, D.C. March, 1996.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice**. U.S. Department of Transportation, FHWA-HRT-11-021, Washington, D.C. April, 2011.

FURLAN, A. P. **Considerações a cerca da adesão e da suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2006.

GENNESSEAU, M. M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas à quente e mornas contendo material fresado.** 182 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2015.

GOMES, L. F. S. **Reciclagem de Misturas Betuminosas à quente em Central.** 227 p. Dissertação (Mestrado em Vias de Comunicação) – Universidade do Porto, Portugal, 2005.

HUANG, H. Y. **Pavement Analysis and Design.** Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1993. 805p.

HUANG, B.; LI, G.; VUKOSAVLJEVIC, D.; SHU, X.; EGAN, B.K. 2005. **Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board No. 1929, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 37–45. 2005.

INSTITUTO DE INFRAESTRUTURAS RODOVIÁRIAS – INIR. **Disposição Normativa: Construção e Reabilitação de Pavimentos – Reciclagem de Pavimentos.** Portugal, 2009, 49 p.

IZAKS R., V. HARITONOV, I. KLASA, M. ZAUMANIS. **Hot mix asphalt with high rap content.** In: 1st International Conference on Structural Integrity. 676-684. 9p. Riga, Latvia, 2002.

KENNEDY, T.W.; MOULTHROP, J. S. e HUBER, G.A. **Development of SHRP Mixture Specification and Design and Analysis System.** Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists-AAPT, EUA, Vol. 62, 1993.

KANDHAL, P.S.; FOO, K.Y. **Designing recycled hot mix asphalt mixtures using Superpave technology, progress of Superpave – evaluation and implementation.** ASTM STP 1322. Robert N. Jester (Ed.), 1997.

KANDHAL, P. S.; MALLICK, R. B. **Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments.** Federal Highway Administration, Report No FHWA-SA-98-042. Form DOT F 17007.7 (8-72). 1997.

KARIM, H.; IBRAHIM AL H.; ZAYNAB I. Q.; AHMED D. M. **Tensile strength for mixture content reclaimed asphalt pavement.** Global Journal of Engineering Science and Research Management. Vol 3, 2016.

KODIPPILY, S.; HOLLERAN, G.; HOLLERAN I.; HENNING, T. F.P.; WILSON, D. **Performance of Recycled Asphalt Pavement Mixes – Comparing New Zealand Experience to American Experience.** 93rd Annual Meeting. Auckland, New Zealand, 2014.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas à quente**. 117 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2003.

LO PRESTI, D.; VASCONCELOS, K.; OREŠKOVIĆ, M.; MENEGUSSO G.P.; BRESSI, S. **On the degree of binder activity of reclaimed asphalt and degree of blending with recycling agentes**. Road Materials and Pavement Design. 2019.

MCDANIEL, R.; ANDERSON, R.M. **Incorporation of reclaimed asphalt pavement in the Superpave system**. Final report for National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board – National Research Council. USA, 2000.

MCDANIEL, R.; ANDERSON, R.M. **Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual**. NCHRP Report, n. 452, 2001.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3ª ed. Rio de Janeiro. 2015. Editora UFRJ.

MINNESOTA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – DOT. **Investigation of recycled asphalt pavement (RAP) mixtures**. Department of Civil Engineering, University of Minnesota. Minnesota, EUA, 2015.

NASCIMENTO, L.A. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. 204 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 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**. Tese (Doutorado Civil Engineering). North Carolina State University. Raleigh-USA, 2015.

NASCIMENTO, M. V., SILVA, J. A. A., LUCENA, A. E. F. L., LUCENA, L. C. F. L., COSTA, S. C. F. E. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas recicladas com uso de compactação por impacto e por amassamento**. Science & Engineering Journal. Vol 22, pg 115-120, 2013

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.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION - NAPA. **Recycling Hot Mix Asphalt Pavements**. Information Series 123. Lanham, Maryland, EUA, 1996, 28 p.

_____. NAPA. **Best Practices for RAP and RAS Management**. Quality Improvement Series 129. Lanham, Maryland, EUA, 2015, 44 p

NEW YORK STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION – NYSDOT. **Advanced Characterization Testing of RAP Mixtures Designed and Produced Using a “RAP Binder Contribution Percentage”**. Bureau of Materials. 50 Wolf Road. 11 p. Albany, New York, 2018.

OLARD, F, E DI BENEDETTO, H. **General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes**. Road Materials and Pavement Design, 4:2, 185-224, (2003).

OLIVEIRA, J. R. M.; SILVA, H. M. R. D.; ABREU, L., P., F.; GOZALEZ-LEONC, J. A. **The role of a surfactant based additive on the production of recycled warm mix asphalts – Less s more**. Construction and Building Materials. Vol. 35. P 693-700, 2012.

Paniz E. P. **Estudo Laboratorial das Propriedades Mecânicas de Misturas com Diferentes Cimentos Asfálticos de Petróleo Produzidos no Brasil**. 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

PASETTO, M. BALDO, N. **Fatigue Performance of Recycled Hot Mix Asphalt: A Laboratory Study**. In: Advances in Materials Science and Engineering. 10 p. New York, EUA, 2017

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. 496 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PREUSSLER, E. S. **Estudo de deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço**. 268L p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1983.

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 (Mestrado em Engenharia Civil) – UFSM, Santa Maria. 2014.

ROCHA, I. G., OLIVEIRA, J. A., CASTELO BRANCO, V. T. F., SOARES, J. B., REIS JUNIOR, H. S. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas à quente (MARQ) com diferentes granulometrias**. Reunião de Pavimentação Urbana, São Luís, Maranhão, 2012.

ROCHA, I. G., CASTELO BRANCO, V. T. F., VASCONCELOS, K. L. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com incorporação de elevado percentual de fresado**. 9º CBR&C/BRASVIAS. Brasília, 2015.

ROCHA, I. G., CASTELO BRANCO, V. T. F., VASCONCELOS, K. L., HOLANDA, A. S. **Misturas asfálticas recicladas à quente com incorporação de elevado percentual de fresado como alternativa para camada de módulo elevado**. Revista TRANSPORTES v. 24, n. 4, p. 85-94, 2016.

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.

SANTOS, T. A. **Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) UFSM, 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**. 268p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

SILVA, J. P. S.; FARIAS, M. M.; ABRAHIM, I. A. **Avaliação do efeito do calor e do ar no envelhecimento de Ligantes Asfálticos utilizando o Modelo de Arrhenius**. In: 7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões – CBR&C / Exposição Internacional de Produtos para Rodovias. Foz do Iguaçu/PR. BRASVIAS, 2011.

SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus**. 280 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – PPGEC/Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2004.

SUZUKI, K. **Avaliação do percentual de material fresado em misturas asfálticas recicladas à quente e aplicação em projetos de restauração de pavimentos**. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2018.

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

VASCONCELOS, K. L. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas à quente dosadas pelas metodologias Marshall e Superpave com diferentes granulometrias**. 149 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2004.

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

WEST, R., KVASNAK, A., TRAN, N., POWELL, B., TURNER, P. **Testing of Moderate and High Reclaimed Asphalt Pavement Content Mixes**. Transportation Research Record 2126, 2009.

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

WIRTGEN GROUP. **Cold Recycling: Wirtgen Cold Recycling Technology.** Windhagen, Germany, 2012, 367 p.

WIRTGEN GROUP. **Road News for new roads.** Windhagen, Germany, 2018, 69 p.

WITCZAK, M. W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T.; EL-BASYOUNY, M. E VON QUINTUS, H. **Simple performance test for superpave mix design.** NCHRP Report 465. National Research Council, Transportation Research Board. Washington, D.C, 2002.

WHITEOAK, D. **The Shell bitumen handbook.** 1 ed. Cambridge, 1990.

YUSOFF, N. I.; CHAILLEUX, E.; AIREY, G. D. **A Comparative Study of the Influence on shift Factor Equations on Master Curve Construction.** International Journal of Pavement Research and Technology. Vol. 4. No. 6. Nov. 2011.

ZAUMANIS, M. MALLICK, R. B. FRANK, R. **100% Recycled hot mix asphalt: A review and analysis.** Journal: Resources, Conservation and Recycling. 2014, 16p.

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

APÊNDICES

APÊNDICE A – DADOS BRUTOS DO MÓDULO COMPLEXO

Tabela A. 1 – Dados da Mistura M0

Temp.	F (Hz)	E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	AF (°)	DP (°)	CV (%)
-10 °C	25	29132	163	0,56	2,43	0,35	14,29
-10 °C	20	28984	110	0,38	2,56	0,39	15,22
-10 °C	10	28421	134	0,47	2,79	0,23	8,11
-10 °C	5	27797	124	0,45	3,14	0,28	8,80
-10 °C	2	26880	140	0,52	3,66	0,29	7,93
-10 °C	1	26125	146	0,56	4,06	0,33	8,01
-10 °C	0,5	25313	168	0,66	4,55	0,32	7,00
-10 °C	0,2	24172	132	0,55	5,17	0,31	6,02
-10 °C	0,1	23327	85	0,36	5,65	0,30	5,39
-10 °C	0,01	20663	118	0,57	7,46	0,15	1,99
4 °C	25	40000	27105	67,76	64,78	65,82	101,60
4 °C	20	22192	375	1,69	6,85	0,23	3,30
4 °C	10	20920	427	2,04	7,57	0,31	4,11
4 °C	5	19655	482	2,45	8,33	0,36	4,33
4 °C	2	17930	559	3,12	9,48	0,47	4,92
4 °C	1	16606	614	3,70	10,47	0,59	5,67
4 °C	0,5	15291	675	4,41	11,49	0,70	6,10
4 °C	0,2	13571	687	5,06	12,93	0,94	7,28
4 °C	0,1	12288	699	5,69	14,11	1,07	7,62
4 °C	0,01	8541	897	10,51	18,36	2,02	11,01
21 °C	25	11256	486	4,32	18,28	0,54	2,98
21 °C	20	11892	945	7,94	15,94	1,29	8,12
21 °C	10	10495	850	8,10	16,93	2,14	12,61
21 °C	5	9141	782	8,56	18,29	2,59	14,15
21 °C	2	7523	740	9,83	20,55	2,67	12,98
21 °C	1	6397	689	10,77	22,33	2,57	11,50
21 °C	0,5	5350	634	11,84	24,59	1,83	7,45
21 °C	0,2	4091	564	13,79	27,82	0,53	1,91
21 °C	0,1	3258	487	14,96	30,63	1,26	4,11
21 °C	0,01	1311	111	8,47	29,50	5,33	18,07
37 °C	25	3638	433	11,90	113,14	38,66	34,17
37 °C	20	3474	495	14,25	33,07	1,39	4,19
37 °C	10	2596	468	18,03	35,20	1,76	5,00
37 °C	5	1858	333	17,93	38,67	2,74	7,09
37 °C	2	1240	209	16,88	39,33	2,09	5,32
37 °C	1	895	138	15,39	39,88	1,93	4,84
37 °C	0,5	645	92	14,20	40,37	2,16	5,36
37 °C	0,2	401	63	15,61	31,59	4,28	13,54
37 °C	0,1	297	43	14,62	34,27	2,24	6,54
37 °C	0,01	140	6	4,29	27,20	7,30	26,83
54 °C	25	727	168	23	42,61	0,59	1,39
54 °C	20	637	158	25	42,78	0,95	2,23
54 °C	10	450	115	26	40,41	1,29	3,20
54 °C	5	318	81	25	38,51	2,12	5,51
54 °C	2	202	51	25	33,27	0,62	1,87
54 °C	1	149	42	28	26,19	30,24	115,50
54 °C	0,5	101	33	32	46,74	1,18	2,53
54 °C	0,2	83	15	18	60,65	1,65	2,72
54 °C	0,1	63	12	19	51,97	1,36	2,63
54 °C	0,01	57	3	5	14,01	1,24	8,84

Tabela A. 2 – Dados da Mistura M10

Temp.	F (Hz)	E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	AF (°)	DP (°)	CV (%)
-10 °C	25	27530	979	3,56	2,35	0,08	3,32
-10 °C	20	27330	880	3,22	2,52	0,01	0,56
-10 °C	10	26814	767	2,86	2,81	0,08	2,77
-10 °C	5	26223	675	2,57	3,13	0,04	1,36
-10 °C	2	25358	569	2,24	3,64	0,06	1,75
-10 °C	1	24641	485	1,97	4,03	0,09	2,28
-10 °C	0,5	23870	397	1,66	4,48	0,13	3,00
-10 °C	0,2	22776	300	1,32	5,06	0,16	3,22
-10 °C	0,1	21973	260	1,18	5,49	0,18	3,22
-10 °C	0,01	19700	121	0,61	6,32	1,05	16,68
4 °C	25	21835	442	2,02	6,05	0,46	7,60
4 °C	20	21537	410	1,90	6,27	0,40	6,32
4 °C	10	20534	383	1,86	7,00	0,47	6,77
4 °C	5	19463	350	1,80	7,63	0,45	5,84
4 °C	2	17949	356	1,98	8,62	0,47	5,50
4 °C	1	16790	358	2,13	9,33	0,45	4,78
4 °C	0,5	15615	350	2,24	10,21	0,45	4,43
4 °C	0,2	14078	332	2,36	11,40	0,45	3,97
4 °C	0,1	13007	270	2,08	12,33	0,42	3,38
4 °C	0,01	9502	2	0,02	15,67	0,11	0,68
21 °C	25	12231	315	2,57	13,76	0,71	5,19
21 °C	20	11812	264	2,23	14,29	0,49	3,42
21 °C	10	10528	255	2,42	15,97	0,23	1,42
21 °C	5	9261	272	2,93	17,39	0,23	1,34
21 °C	2	7705	257	3,33	19,72	0,11	0,54
21 °C	1	6634	240	3,62	21,52	0,36	1,68
21 °C	0,5	5627	214	3,80	23,51	0,71	3,01
21 °C	0,2	4416	153	3,48	26,11	0,95	3,63
21 °C	0,1	3613	104	2,88	27,94	1,15	4,10
21 °C	0,01	1587	62	3,92	34,12	2,38	6,99
37 °C	25	3660	12	0,33	34,52	0,88	2,54
37 °C	20	3394	16	0,48	34,64	1,70	4,92
37 °C	10	2602	16	0,60	36,73	2,53	6,89
37 °C	5	1942	11	0,58	38,34	3,10	8,10
37 °C	2	1275	8	0,61	40,30	4,23	10,49
37 °C	1	914	5	0,58	41,03	5,22	12,72
37 °C	0,5	657	3	0,48	40,56	5,41	13,34
37 °C	0,2	430	13	2,97	39,33	5,29	13,45
37 °C	0,1	309	23	7,36	38,59	4,50	11,65
37 °C	0,01	133	4	3,24	19,03	14,38	75,56
54 °C	25	976	113	12	40,24	0,60	1,49
54 °C	20	840	114	14	41,45	0,27	0,65
54 °C	10	592	75	13	40,82	0,24	0,59
54 °C	5	413	45	11	39,80	0,58	1,46
54 °C	2	258	23	9	37,38	0,10	0,26
54 °C	1	190	11	6	27,48	1,95	7,10
54 °C	0,5	124	3	3	51,03	1,19	2,33
54 °C	0,2	94	16	17	33,50	33,05	98,66
54 °C	0,1	74	14	20	37,17	28,02	75,40
54 °C	0,01	61	16	26	13,90	6,94	49,96

Tabela A. 3 – Dados da Mistura M20

Temp.	F (Hz)	E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	AF (°)	DP (°)	CV (%)
-10 °C	25	28237	521	1,85	3,95	2,10	53,23
-10 °C	20	28723	938	3,26	2,43	0,11	4,66
-10 °C	10	28146	892	3,17	2,77	0,06	2,04
-10 °C	5	27543	875	3,18	3,11	0,13	4,09
-10 °C	2	26663	844	3,17	3,57	0,16	4,36
-10 °C	1	25449	98	0,39	3,95	0,17	4,30
-10 °C	0,5	25170	775	3,08	4,35	0,11	2,60
-10 °C	0,2	24090	726	3,01	4,94	0,16	3,30
-10 °C	0,1	23271	660	2,84	5,37	0,11	2,11
-10 °C	0,01	20819	36	0,17	6,74	0,22	3,25
4 °C	25	12954	12630	97,50	18,38	17,86	97,18
4 °C	20	22105	633	2,86	6,08	0,19	3,14
4 °C	10	21065	605	2,87	6,75	0,14	2,10
4 °C	5	19948	561	2,81	7,43	0,15	2,00
4 °C	2	18439	552	2,99	8,34	0,18	2,20
4 °C	1	17268	561	3,25	9,09	0,17	1,87
4 °C	0,5	16094	525	3,26	9,88	0,21	2,15
4 °C	0,2	14568	467	3,21	11,07	0,24	2,17
4 °C	0,1	13434	453	3,37	11,99	0,14	1,18
4 °C	0,01	9774	476	4,87	16,24	0,28	1,74
21 °C	25	5894	634	10,76	53,35	74,08	138,88
21 °C	20	11567	423	3,66	17,48	2,74	15,70
21 °C	10	10421	429	4,11	18,36	2,96	16,14
21 °C	5	9087	636	7,00	19,27	1,70	8,85
21 °C	2	7611	835	10,97	21,32	0,91	4,28
21 °C	1	6529	792	12,13	23,10	0,48	2,08
21 °C	0,5	5523	655	11,86	24,73	0,26	1,06
21 °C	0,2	4284	525	12,27	26,94	0,23	0,87
21 °C	0,1	3461	468	13,53	28,43	0,58	2,04
21 °C	0,01	1526	308	20,16	32,35	1,72	5,31
37 °C	25	5000	463	9,26	29,43	1,59	5,41
37 °C	20	4670	421	9,01	30,00	2,16	7,21
37 °C	10	3742	384	10,26	31,94	2,35	7,37
37 °C	5	2942	346	11,78	33,30	2,29	6,88
37 °C	2	2075	281	13,53	34,47	2,23	6,48
37 °C	1	1539	233	15,12	35,29	2,37	6,71
37 °C	0,5	1125	179	15,90	35,79	2,18	6,11
37 °C	0,2	747	115	15,46	35,07	2,07	5,91
37 °C	0,1	533	76	14,31	34,26	1,91	5,57
37 °C	0,01	208	8	4,08	32,55	6,15	18,90
54 °C	25	1101	148	13	38,95	0,61	1,56
54 °C	20	974	110	11	38,92	0,08	0,20
54 °C	10	699	65	9	37,61	0,35	0,92
54 °C	5	504	41	8	36,21	0,45	1,25
54 °C	2	330	22	7	34,51	0,01	0,04
54 °C	1	257	12	5	31,45	0,12	0,38
54 °C	0,5	207	4	2	28,22	0,58	2,05
54 °C	0,2	161	5	3	23,64	1,92	8,14
54 °C	0,1	138	8	6	19,76	2,54	12,85
54 °C	0,01	98	14	15	12,16	4,12	33,92

Tabela A. 4 – Dados da Mistura M20

Temp.	F (Hz)	E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	AF (°)	DP (°)	CV (%)
-10 °C	25	28444	416	1,46	2,24	0,08	3,48
-10 °C	20	28337	532	1,88	2,36	0,06	2,70
-10 °C	10	27804	534	1,92	2,67	0,07	2,65
-10 °C	5	27184	519	1,91	3,01	0,08	2,59
-10 °C	2	26308	489	1,86	3,47	0,07	2,04
-10 °C	1	25586	472	1,85	3,86	0,02	0,55
-10 °C	0,5	24824	457	1,84	4,27	0,00	0,00
-10 °C	0,2	23745	396	1,67	4,84	0,01	0,15
-10 °C	0,1	22984	313	1,36	5,20	0,01	0,14
-10 °C	0,01	20905	231	1,11	5,80	1,05	18,18
4 °C	25	23556	1501	6,37	5,30	0,56	10,55
4 °C	20	23123	1228	5,31	5,58	0,47	8,36
4 °C	10	21780	771	3,54	6,44	0,15	2,31
4 °C	5	20702	749	3,62	7,12	0,10	1,39
4 °C	2	19221	697	3,63	8,08	0,08	0,96
4 °C	1	18059	680	3,76	8,82	0,04	0,40
4 °C	0,5	16881	653	3,87	9,63	0,09	0,96
4 °C	0,2	15312	653	4,27	10,82	0,08	0,78
4 °C	0,1	14166	655	4,62	11,69	0,07	0,60
4 °C	0,01	10552	609	5,77	15,11	0,25	1,68
21 °C	25	12995	797	6,13	14,38	0,35	2,46
21 °C	20	12534	711	5,67	15,25	0,42	2,78
21 °C	10	11196	612	5,46	16,19	0,38	2,36
21 °C	5	9900	557	5,63	17,66	0,28	1,56
21 °C	2	8269	477	5,76	19,71	0,29	1,47
21 °C	1	7121	389	5,46	21,32	0,26	1,23
21 °C	0,5	6056	322	5,32	22,95	0,30	1,33
21 °C	0,2	4776	238	4,99	25,20	0,38	1,52
21 °C	0,1	3943	181	4,59	26,65	0,53	1,99
21 °C	0,01	1879	54	2,90	30,49	1,39	4,57
37 °C	25	4213	410	9,73	32,80	1,11	3,39
37 °C	20	3943	399	10,11	32,82	0,77	2,35
37 °C	10	3089	336	10,88	34,97	0,27	0,77
37 °C	5	2359	273	11,57	36,50	0,13	0,35
37 °C	2	1593	200	12,57	38,23	0,50	1,31
37 °C	1	1164	147	12,64	38,85	0,91	2,33
37 °C	0,5	847	111	13,12	38,52	0,70	1,82
37 °C	0,2	551	77	13,88	37,55	0,49	1,32
37 °C	0,1	393	60	15,29	37,55	1,85	4,93
37 °C	0,01	161	19	11,98	21,35	23,66	110,82
54 °C	25	1107	86	8	38,79	0,50	1,29
54 °C	20	985	67	7	37,97	0,48	1,27
54 °C	10	700	40	6	36,89	0,78	2,13
54 °C	5	492	29	6	35,50	0,57	1,59
54 °C	2	308	20	7	34,24	0,54	1,59
54 °C	1	230	14	6	31,32	0,74	2,37
54 °C	0,5	180	12	6	27,31	0,64	2,33
54 °C	0,2	134	15	11	22,71	4,26	18,74
54 °C	0,1	102	11	11	19,76	8,15	41,22
54 °C	0,01	84	14	17	13,80	2,64	19,16

APÊNDICE B – CURVAS ISOTERMAS E ISÓCRONAS MÓDULO DINÂMICO E ÂNGULO DE FASE

Figura B. 1 – Isotermas de Módulo Dinâmico

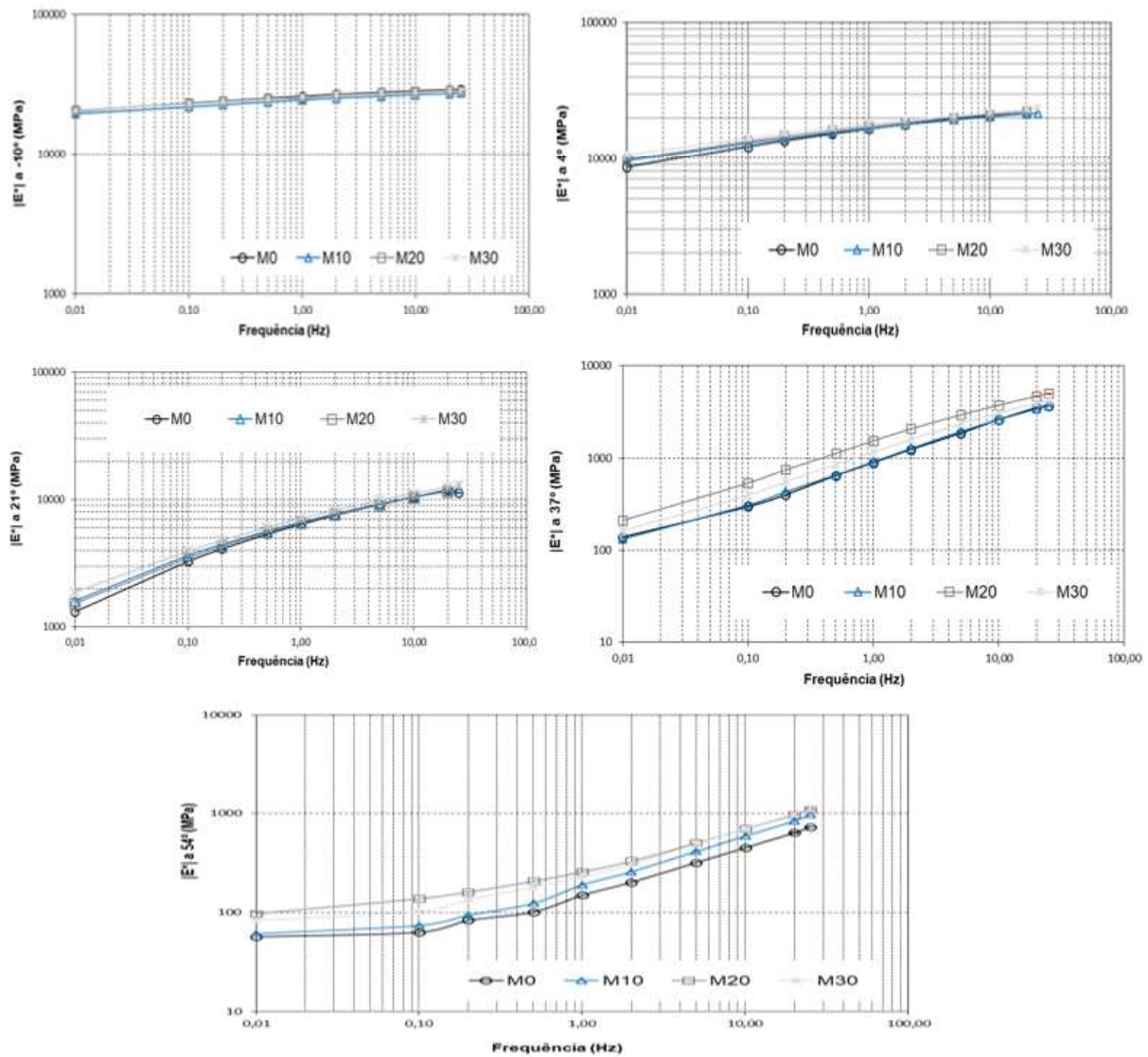


Figura B. 2 – Isotermas de Ângulo de Fase

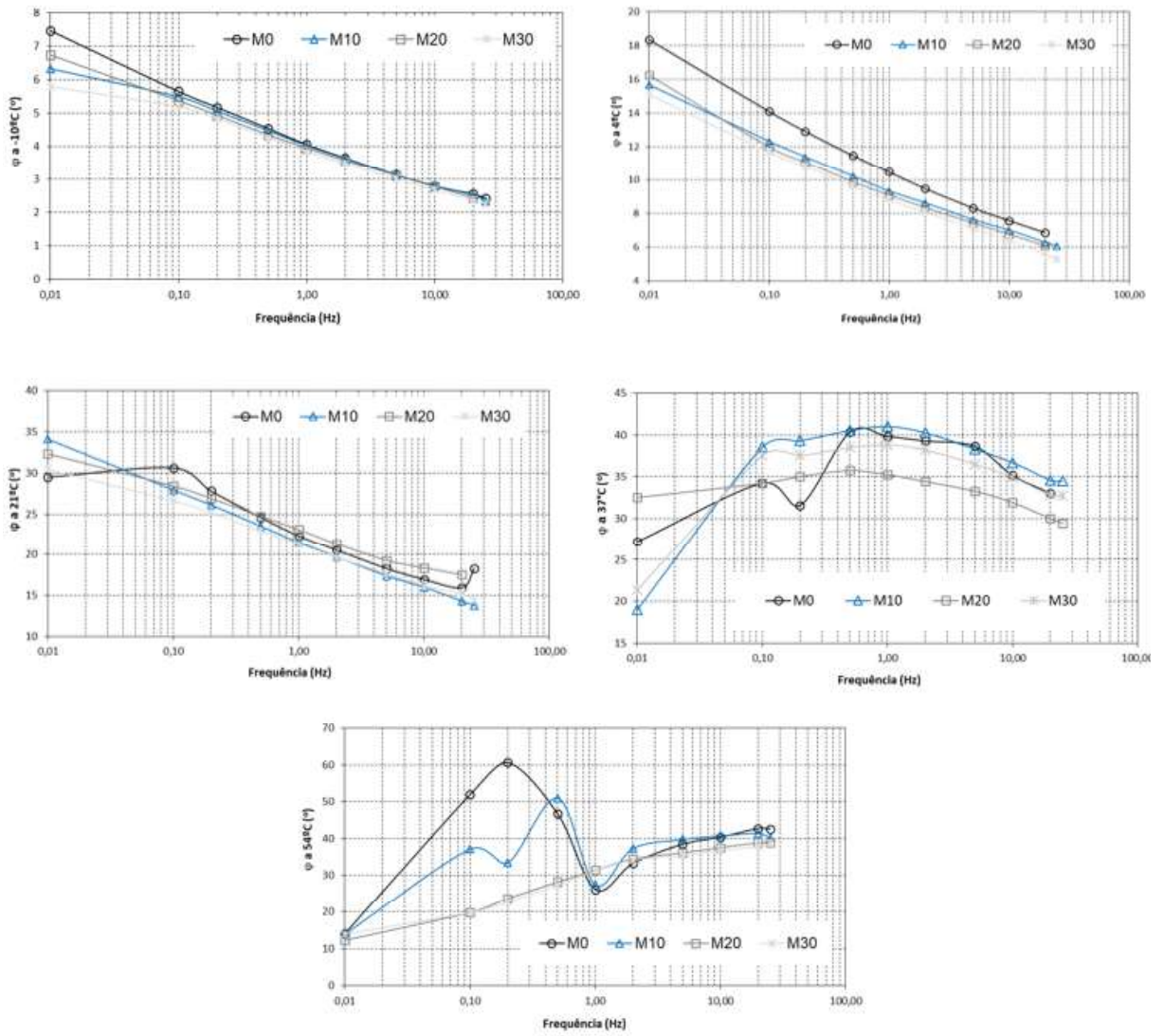


Figura B. 3 – Isócronas de Módulo Dinâmico

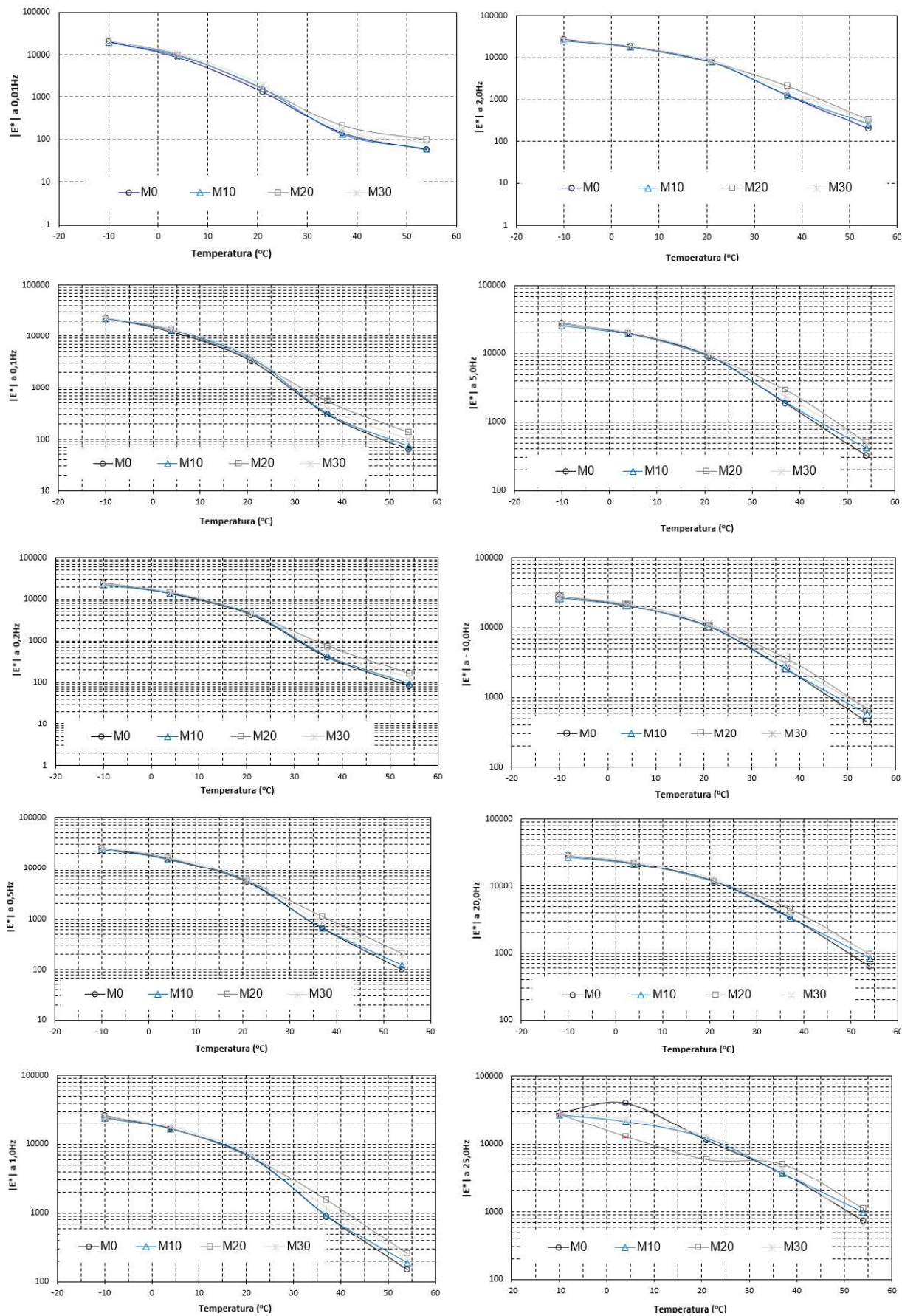
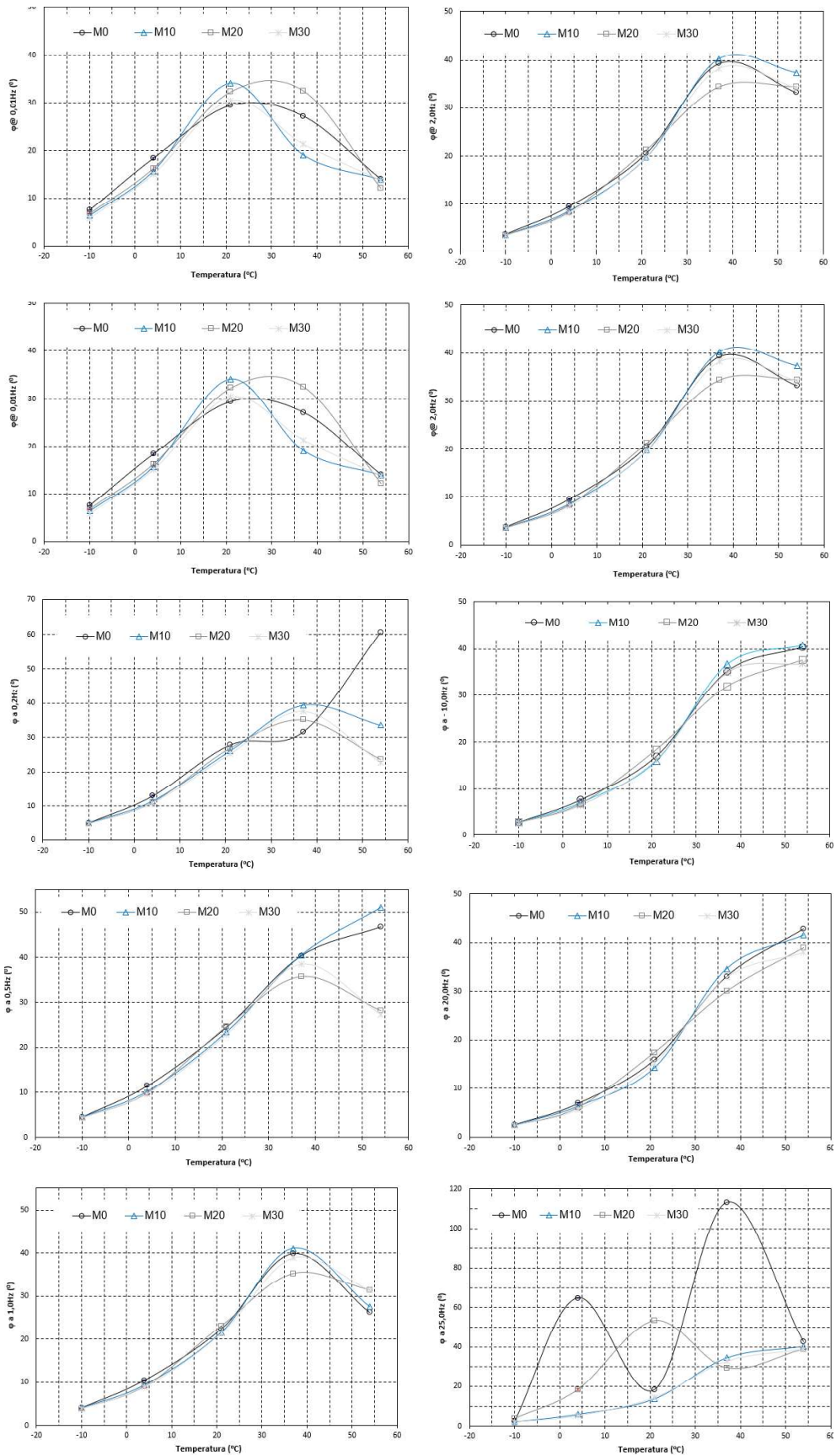


Figura B. 4 – Isócronas de Ângulo de Fase



APÊNDICE C – CURVAS ESPAÇO COLE-COLE, DIAGRAMA BLACK E MESTRAS

Figura C. 1 – Espaço Cole-Cole para Mistura de Referência (M0)

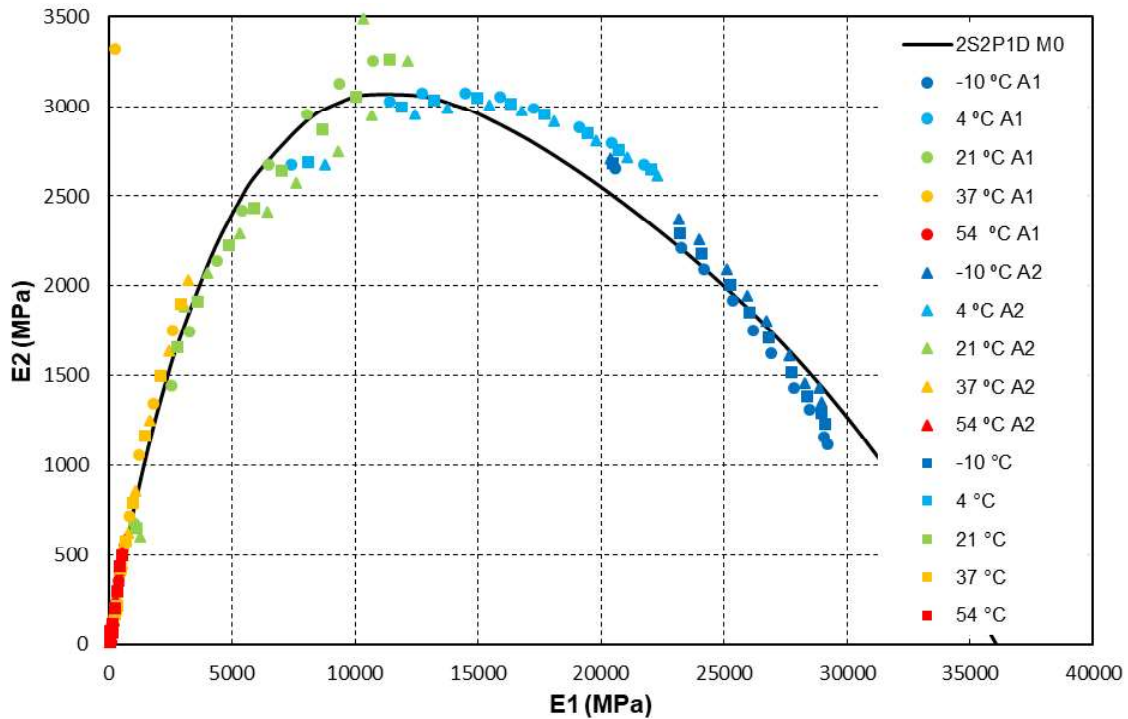


Figura C. 2 – Diagrama Black para Mistura de Referência (M0)

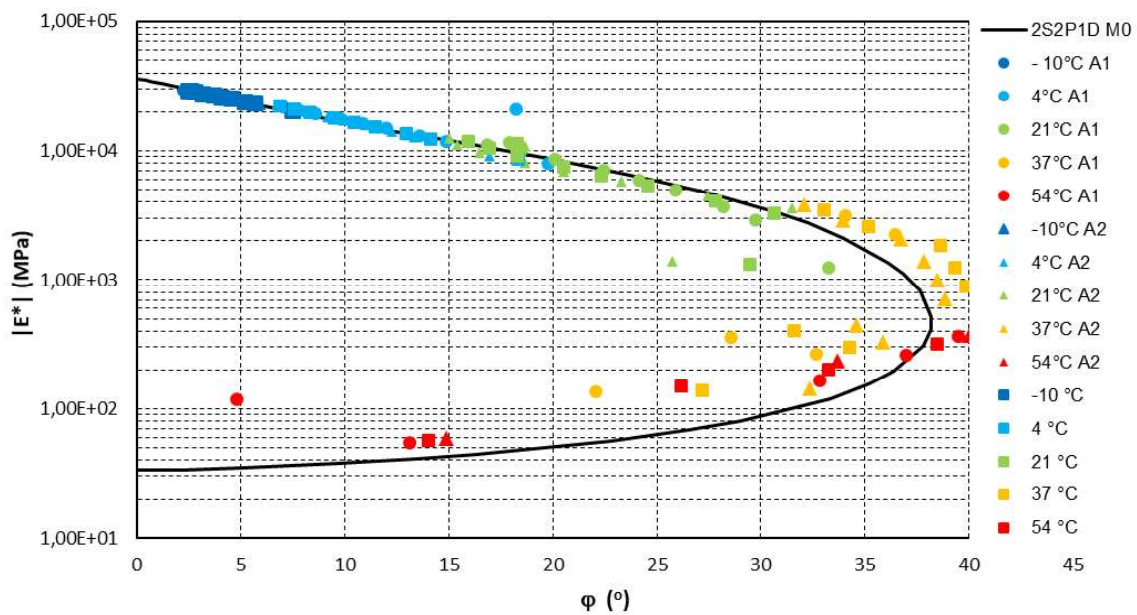


Figura C. 3 – Curva Mestre de Módulo Complexo para Mistura de Referência (M0)

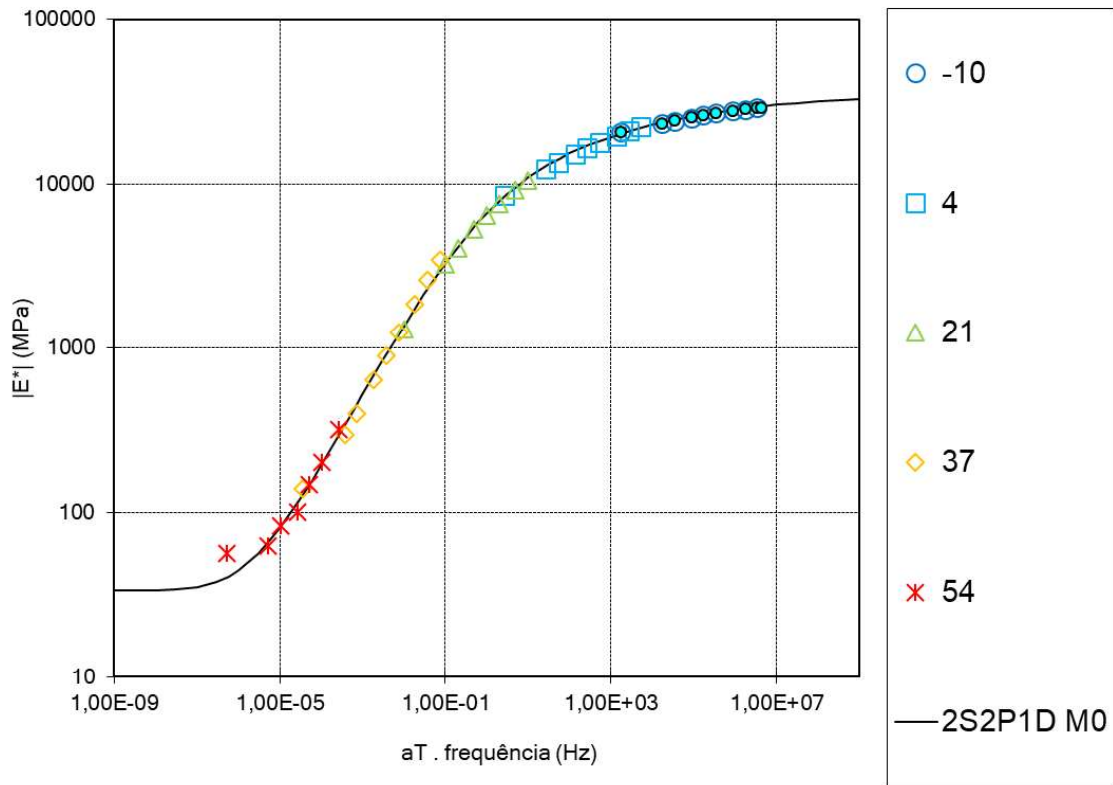


Figura C. 4 – Curva Mestre de Ângulo de Fase para Mistura de Referência (M0)

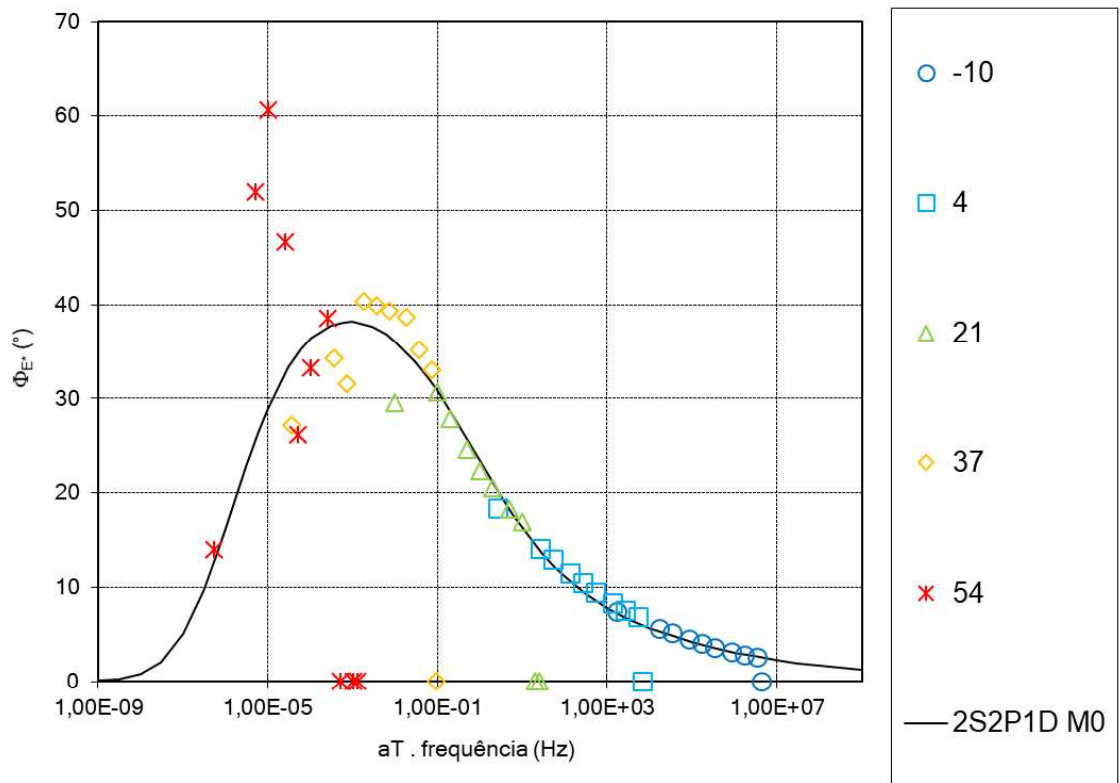


Figura C. 5 – Espaço Cole-Cole para Mistura com 10% de RAP (M10)

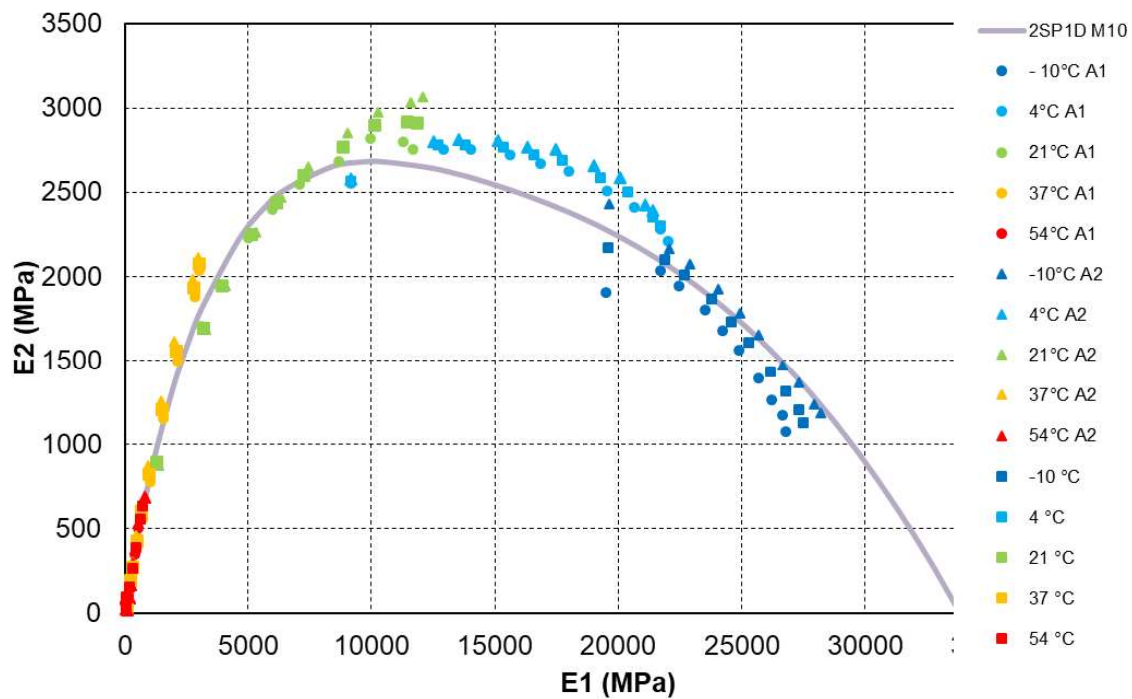


Figura C. 6 – Diagrama Black para Mistura com 10% de RAP (M10)

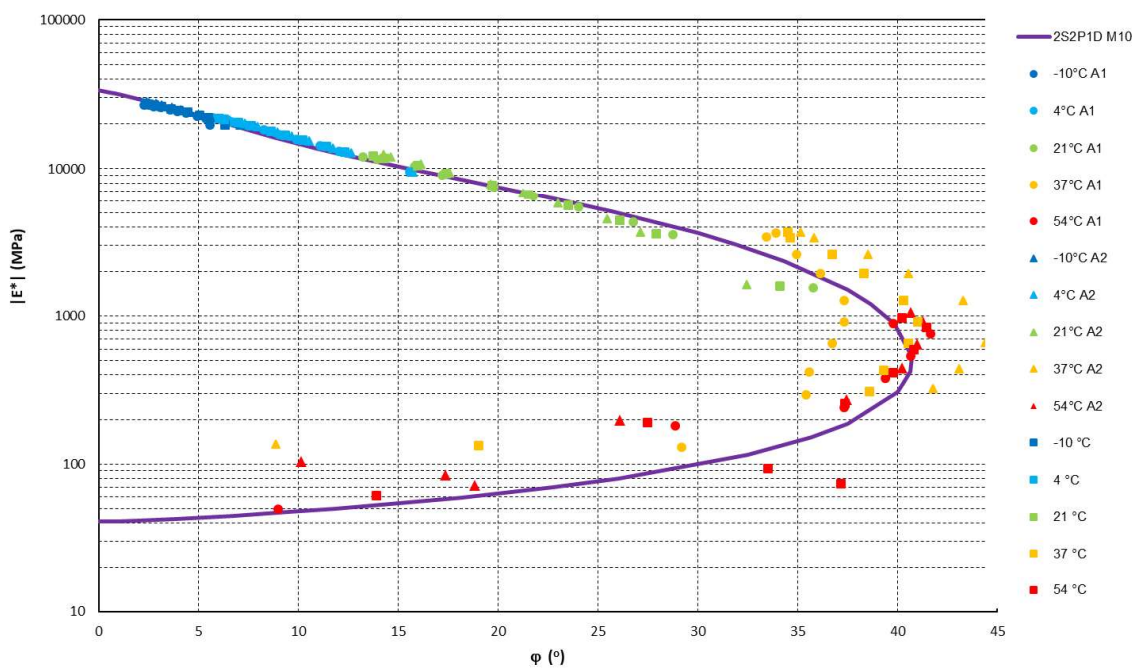


Figura C. 7 – Curva Mestre de Módulo Complexo para Mistura com 10% de RAP (M10)

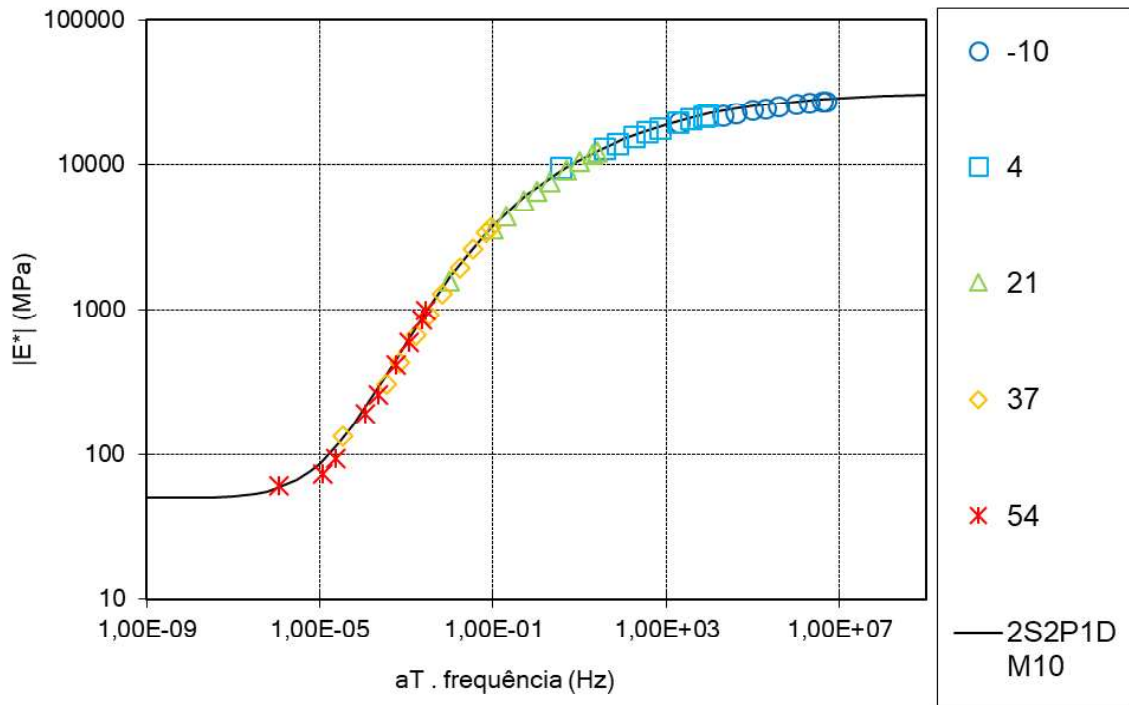


Figura C. 8 – Curva Mestre de Ângulo de Fase para Mistura com 10% de RAP (M10)

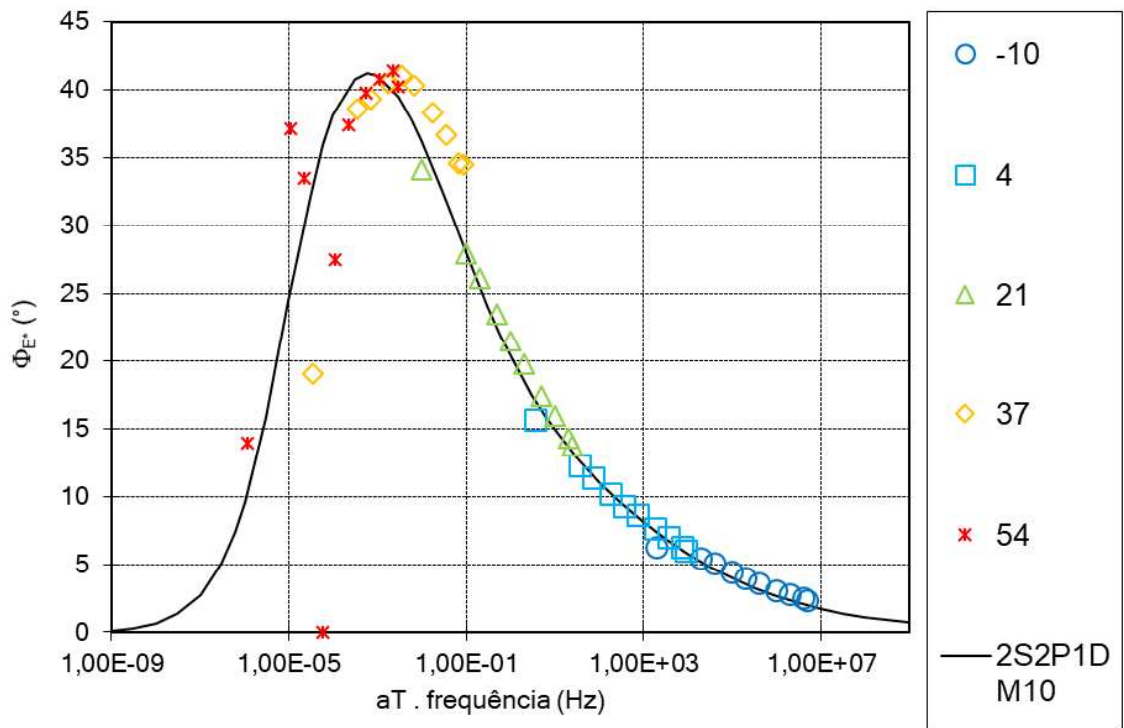


Figura C. 9 – Espaço Cole-Cole para Mistura com 20% de RAP (M20)

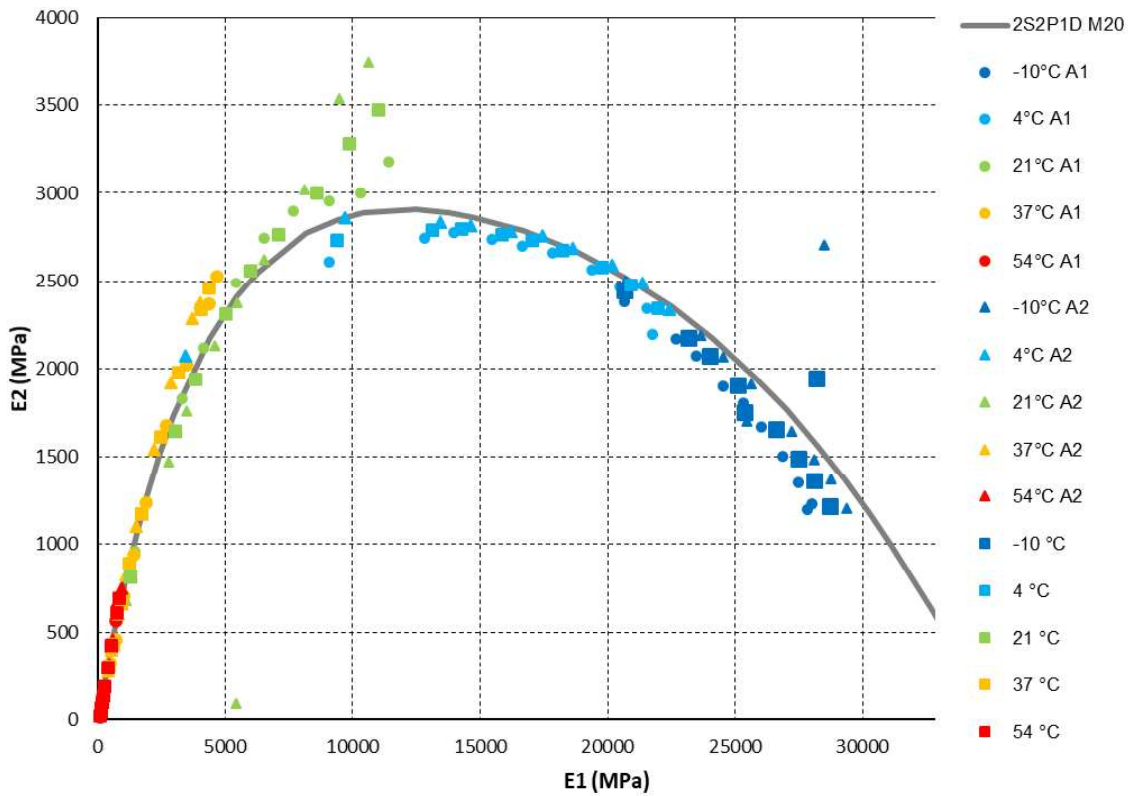


Figura C. 10 – Diagrama Black para Mistura com 20% de RAP (M20)

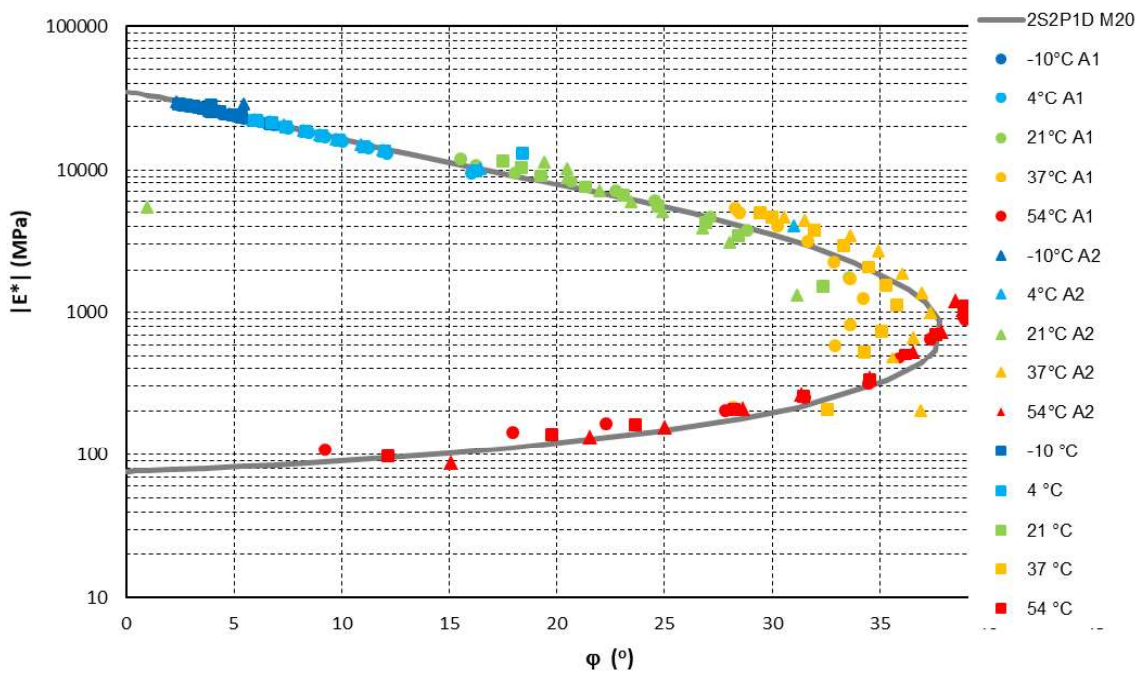


Figura C. 11 – Curva Mestre de Módulo Complexo para Mistura com 20% de RAP (M20)

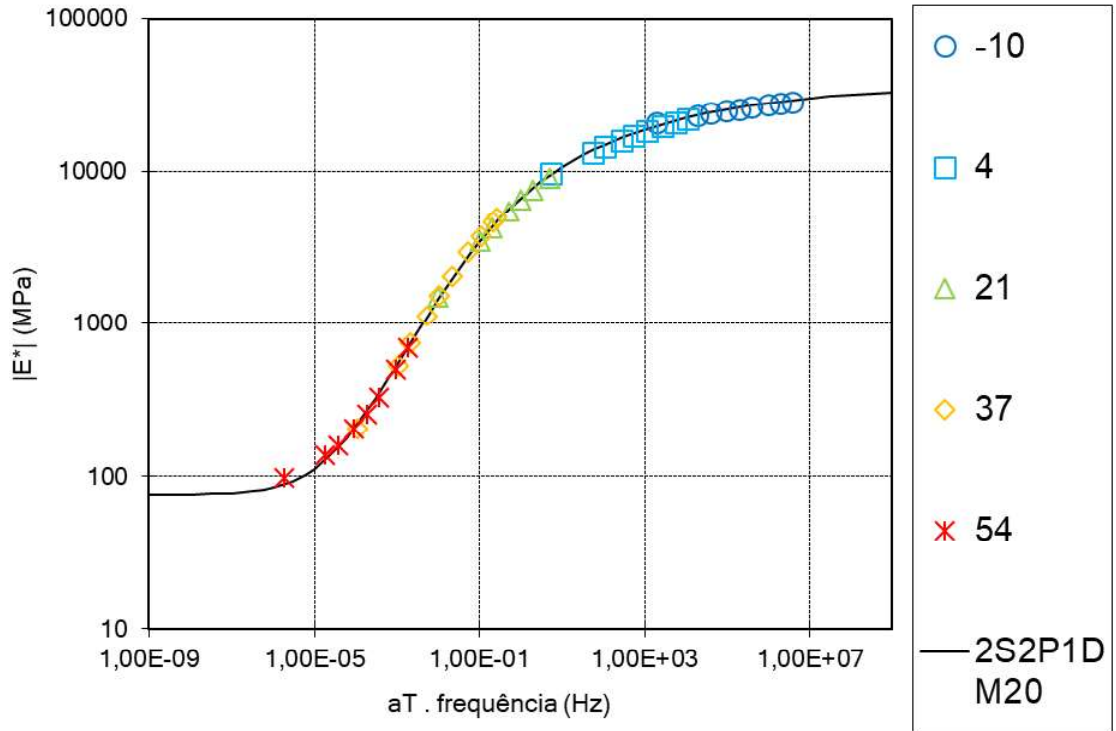


Figura C. 12 – Curva Mestre de Ângulo de Fase para Mistura com 20% de RAP (M20)

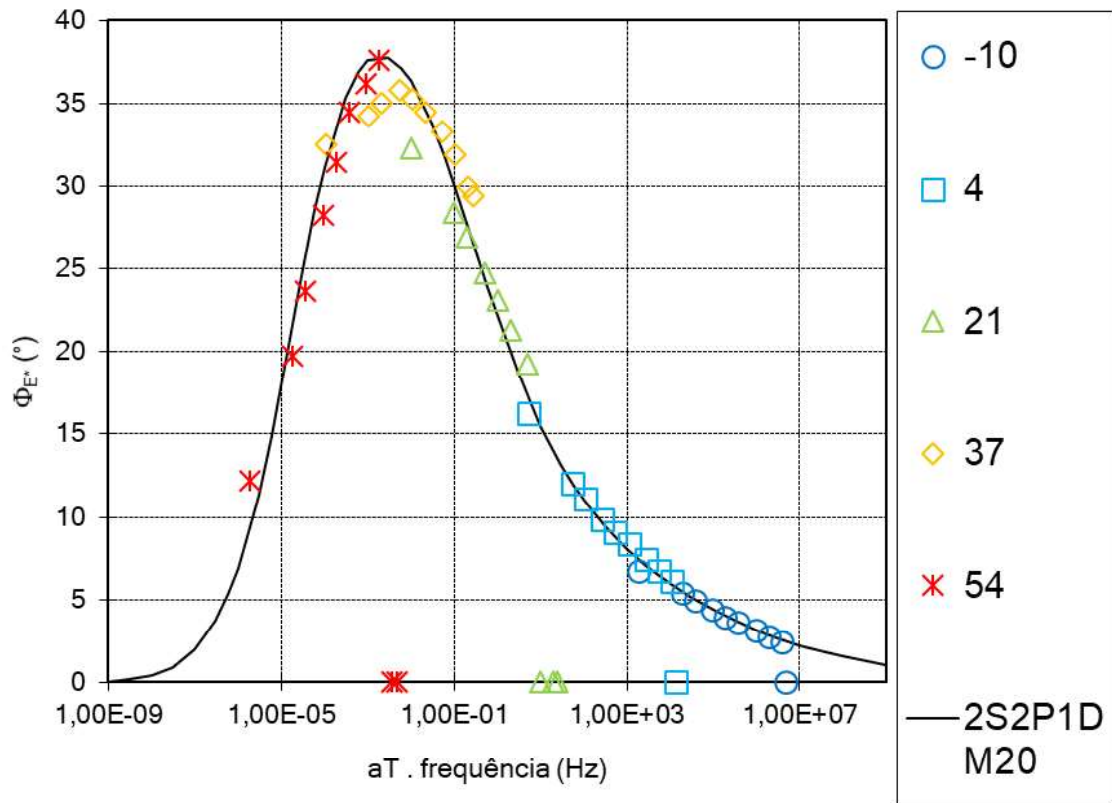


Figura C. 13 – Espaço Cole-Cole para Mistura com 30% de RAP (M30)

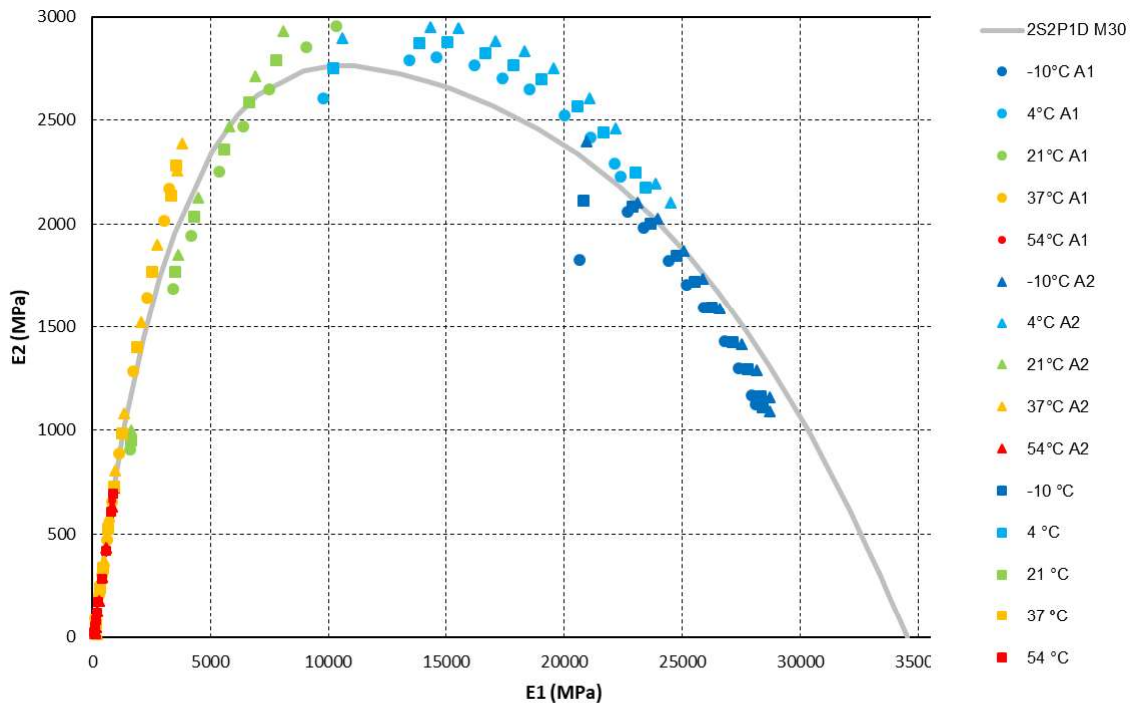


Figura C. 14 – Diagrama Black para Mistura com 30% de RAP (M30)

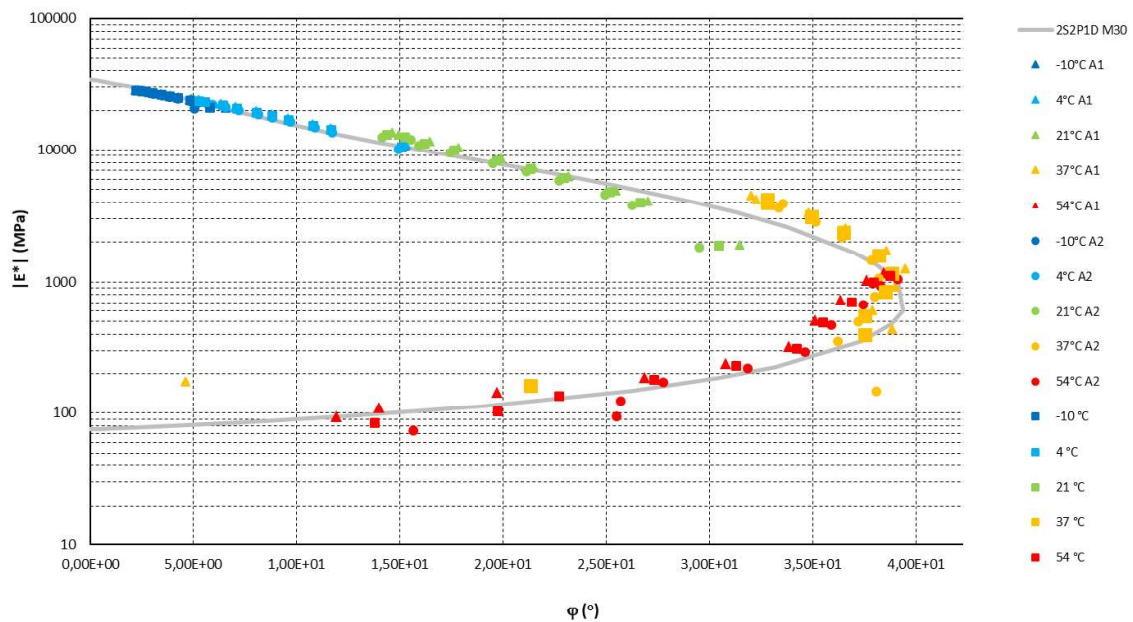


Figura C. 15 – Curva Mestra de Módulo Complexo para Mistura com 30% de RAP (M30)

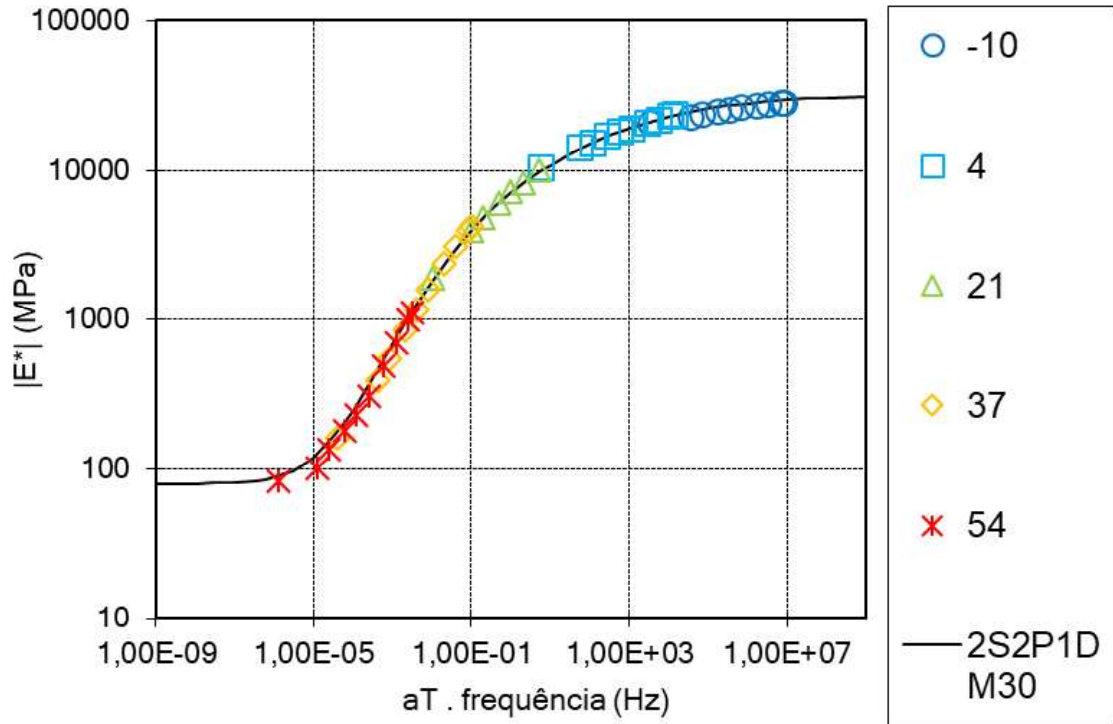
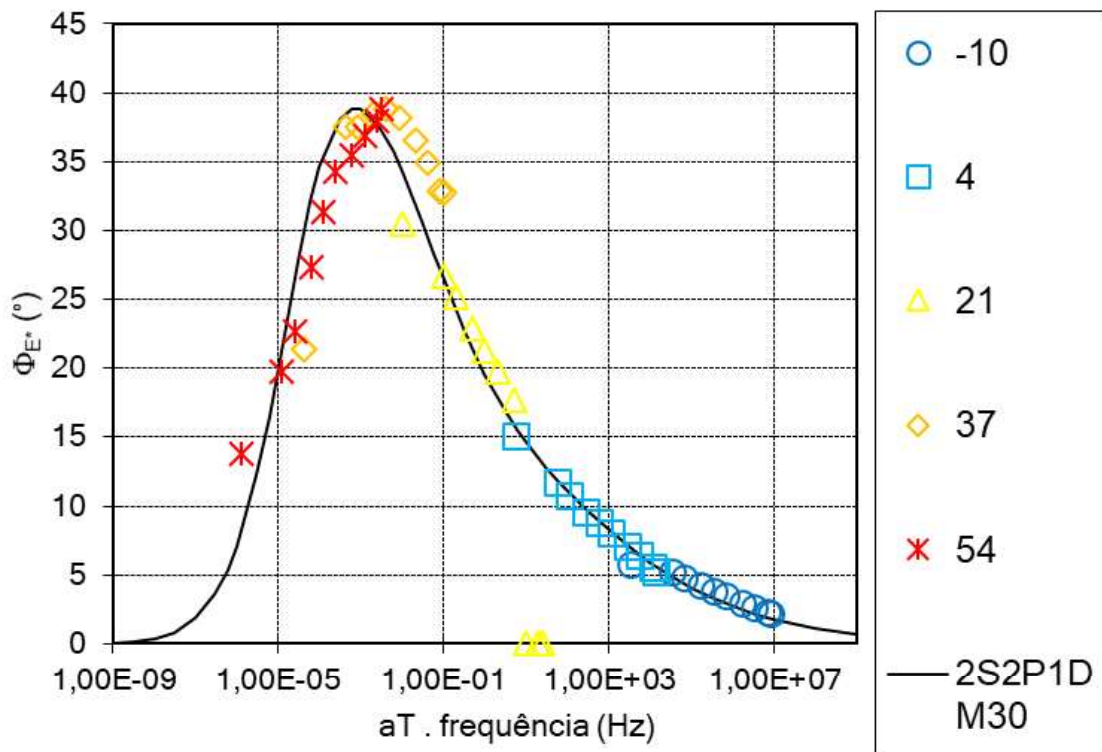


Figura C. 16 – Curva Mestra de Ângulo de Fase para Mistura com 30% de RAP (M30)



APÊNDICE D – GRÁFICOS TÉRMICOS DA EVOLUÇÃO DE DANO NAS ESTRUTURAS DE PAVIMENTO

Figura D. 1 – M0 com 5 cm de revestimento e tráfego de 5×10^6

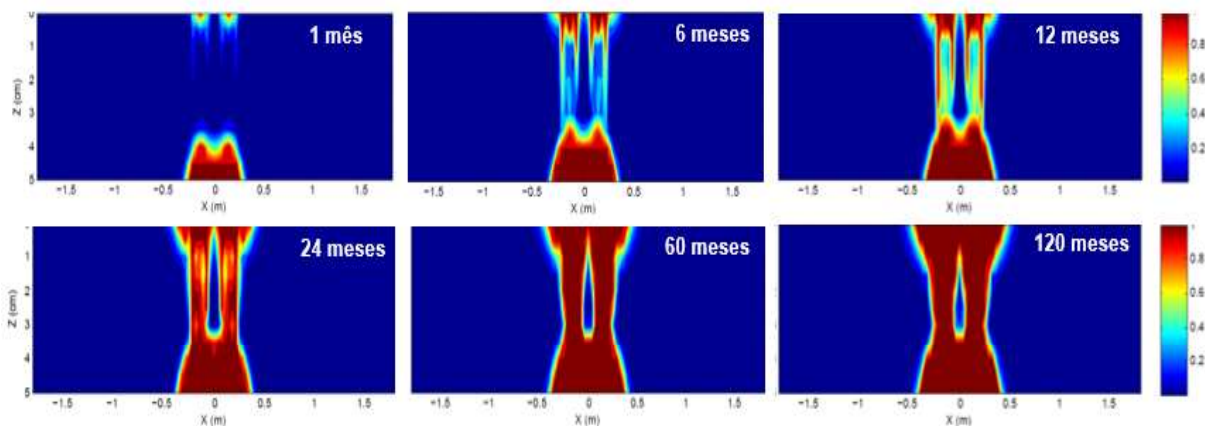


Figura D. 2 – M0 com 10 cm de revestimento e tráfego de 5×10^6

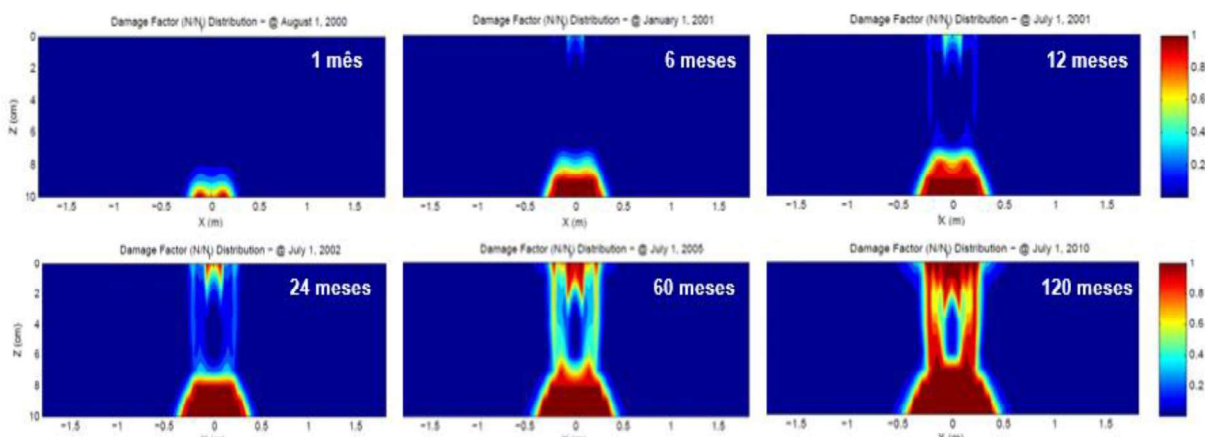


Figura D. 3 – M0 com 15 cm de revestimento e tráfego de 5×10^6

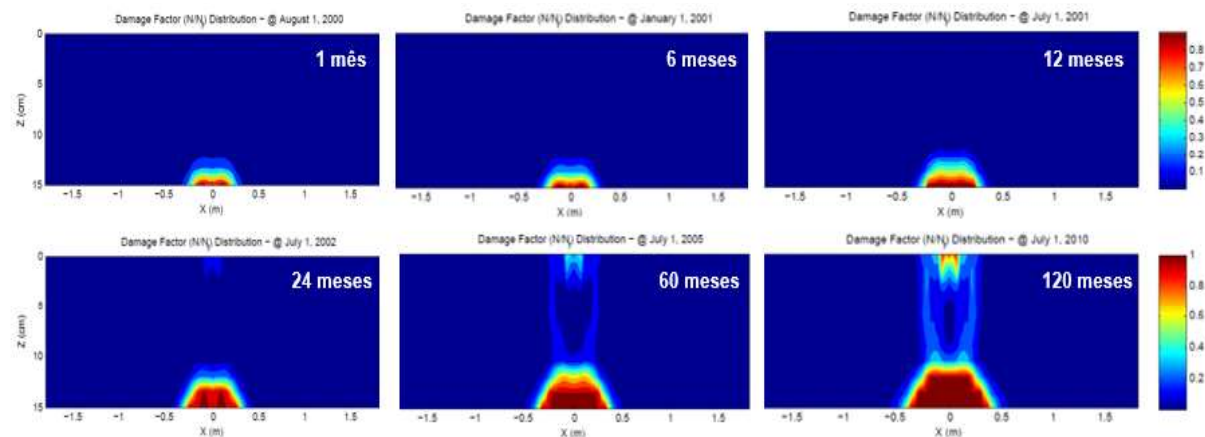


Figura D. 4 – M0 com 5 cm de revestimento e tráfego de 1×10^7

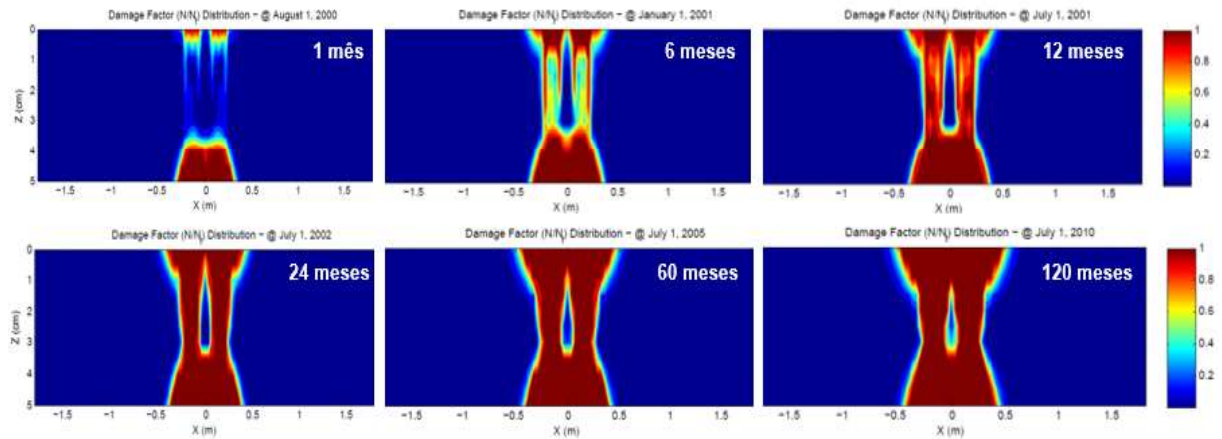


Figura D. 5 – M0 com 10 cm de revestimento e tráfego de 1×10^7

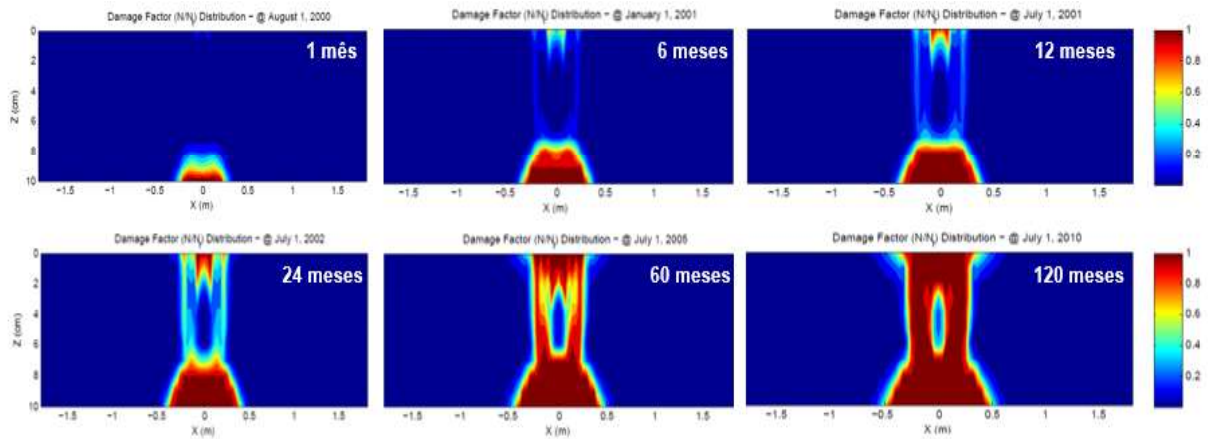


Figura D. 6 – M0 com 15 cm de revestimento e tráfego de 1×10^7

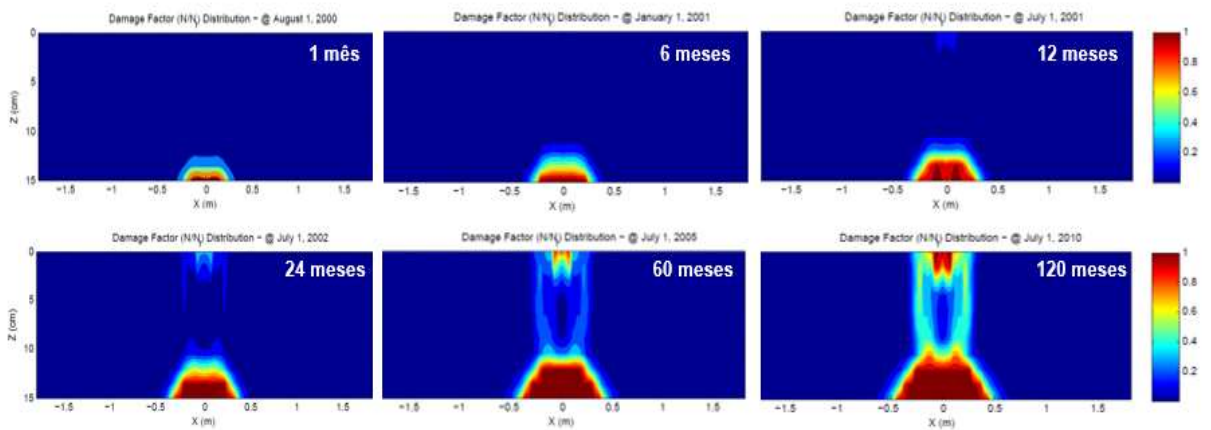


Figura D. 7 – M0 com 5 cm de revestimento e tráfego de 5×10^7

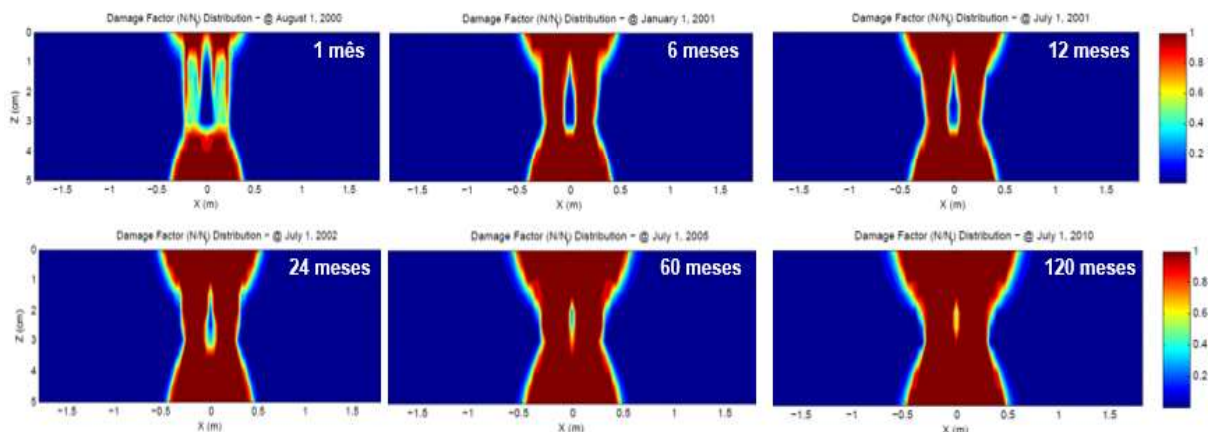


Figura D. 8 – M0 com 10 cm de revestimento e tráfego de 5×10^7

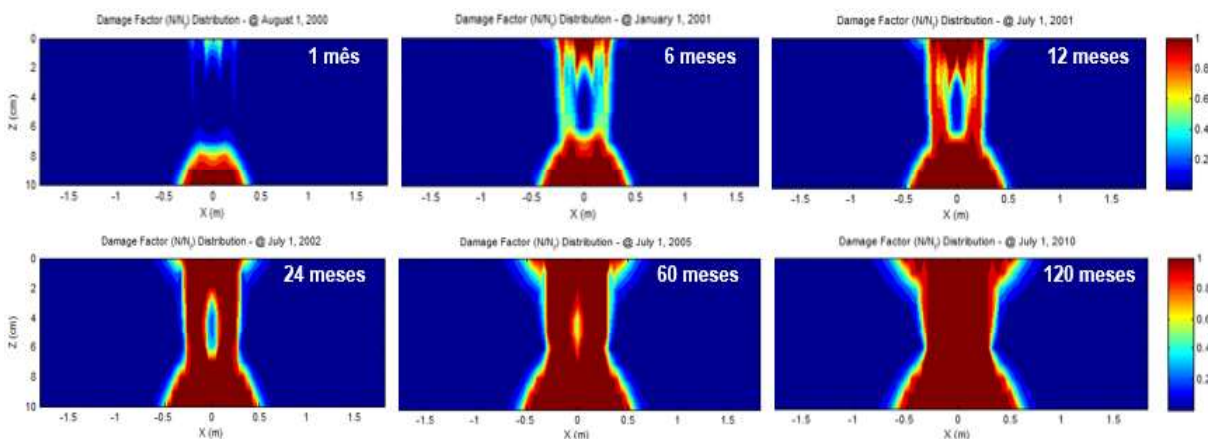


Figura D. 9 – M0 com 15 cm de revestimento e tráfego de 5×10^7

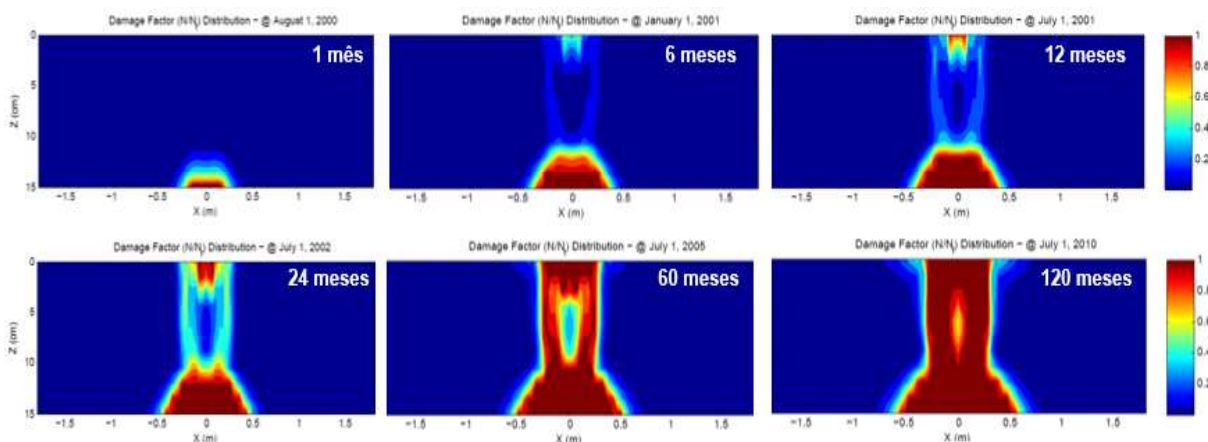


Figura D. 10 – M10 com 5 cm de revestimento e tráfego de 5×10^6

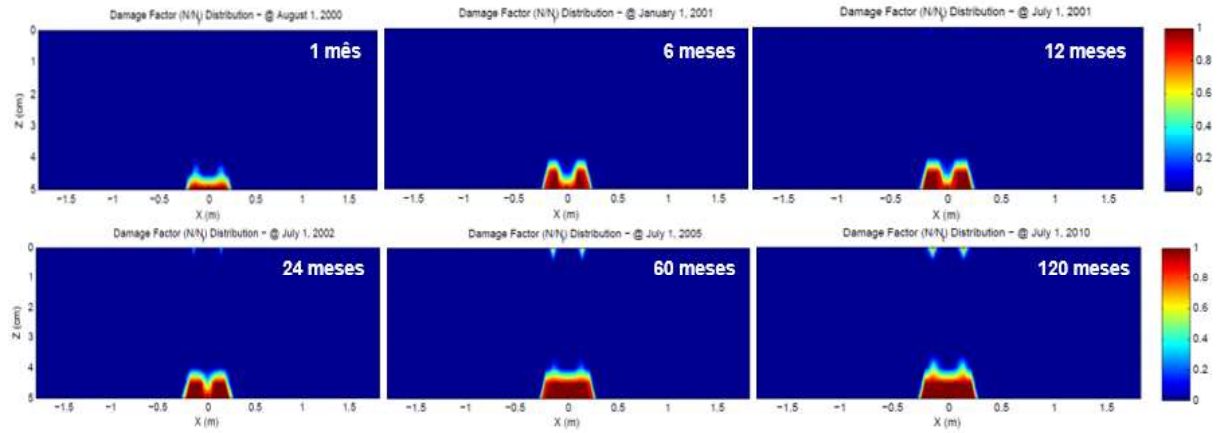


Figura D. 11 – M10 com 10 cm de revestimento e tráfego de 5×10^6

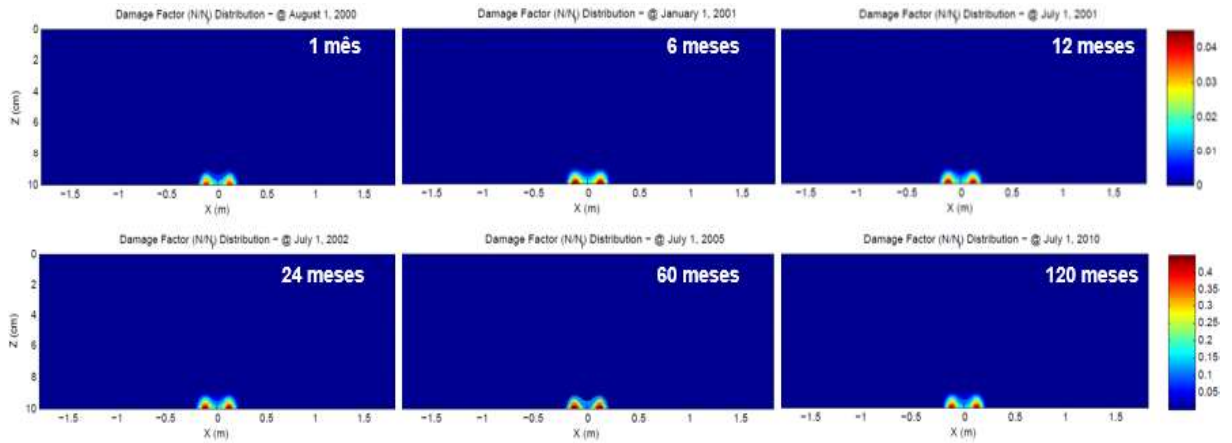


Figura D. 12 – M10 com 15 cm de revestimento e tráfego de 5×10^6

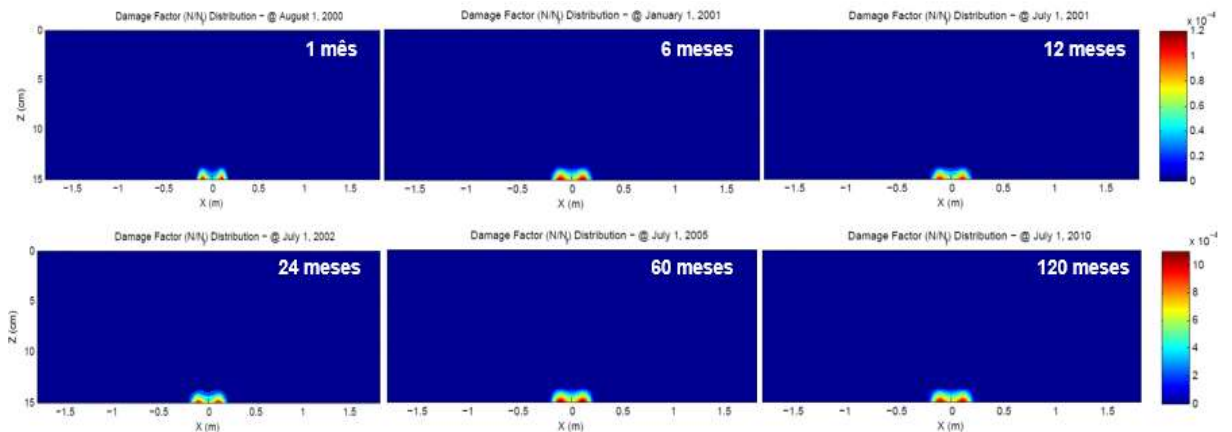


Figura D. 13 – M10 com 5 cm de revestimento e tráfego de 1×10^7

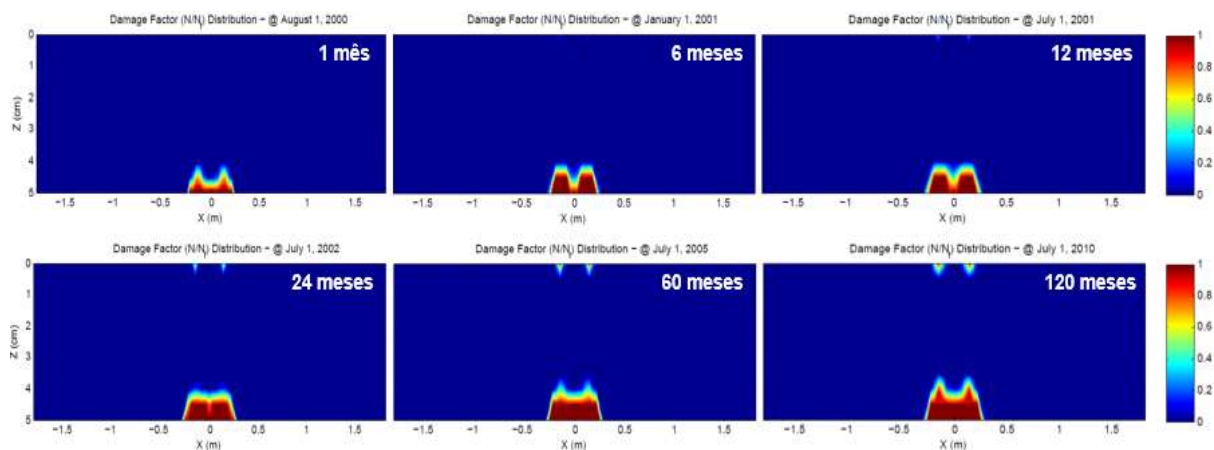


Figura D. 14 – M10 com 10 cm de revestimento e tráfego de 1×10^7

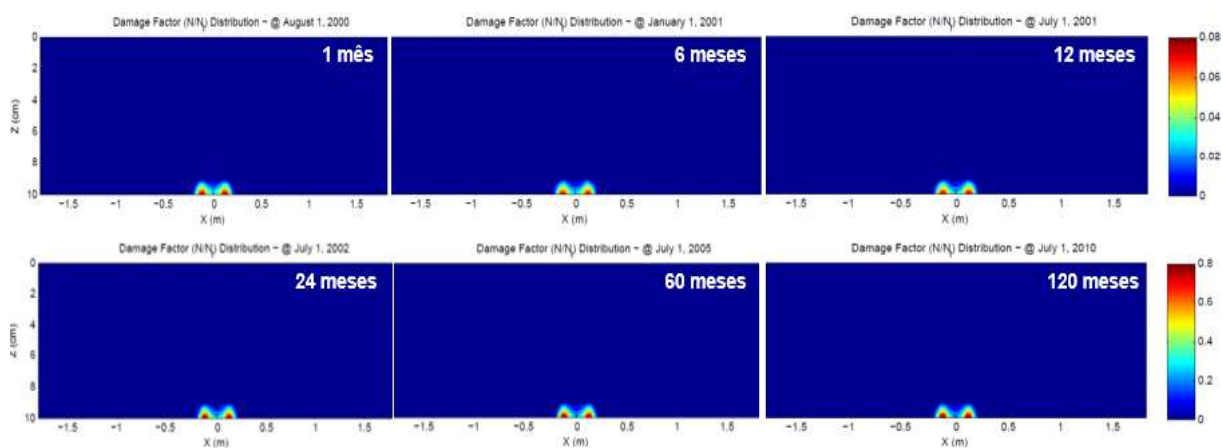


Figura D. 15 – M10 com 15 cm de revestimento e tráfego de 1×10^7

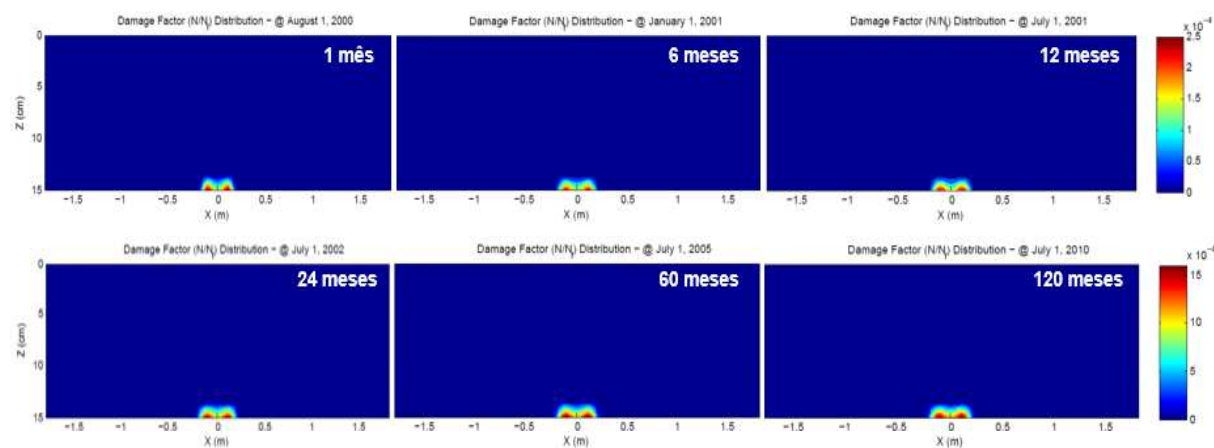


Figura D. 16 – M10 com 5 cm de revestimento e tráfego de 5×10^7

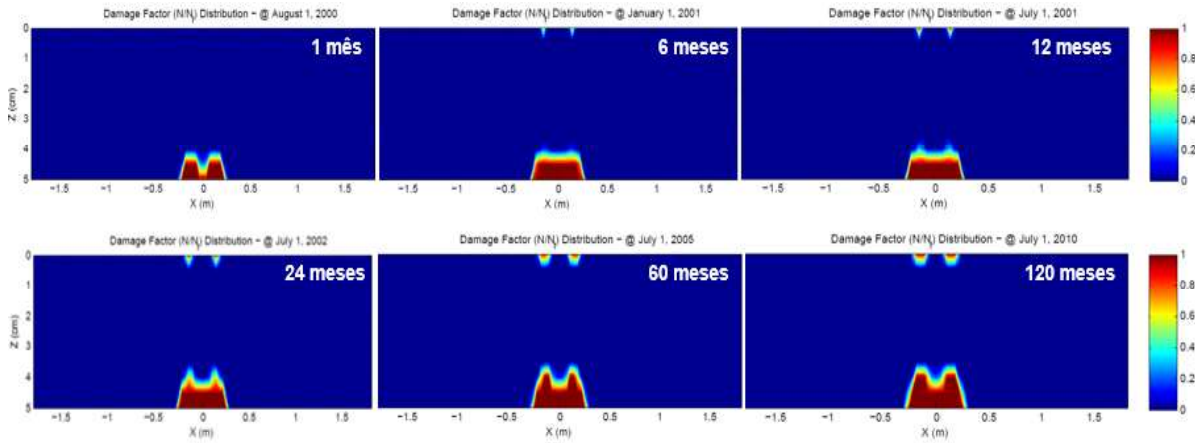


Figura D. 17 – M10 com 10 cm de revestimento e tráfego de 5×10^7

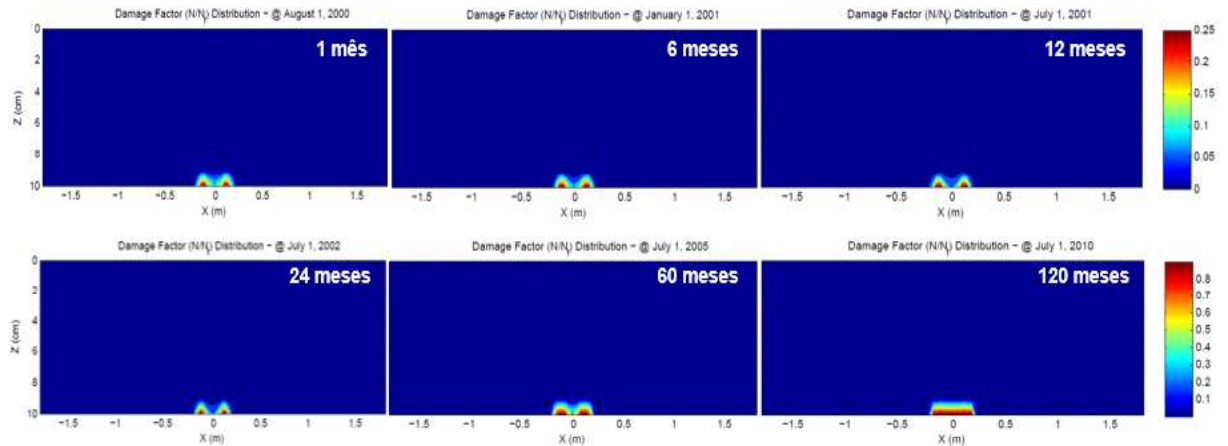


Figura D. 18 – M10 com 15 cm de revestimento e tráfego de 5×10^7

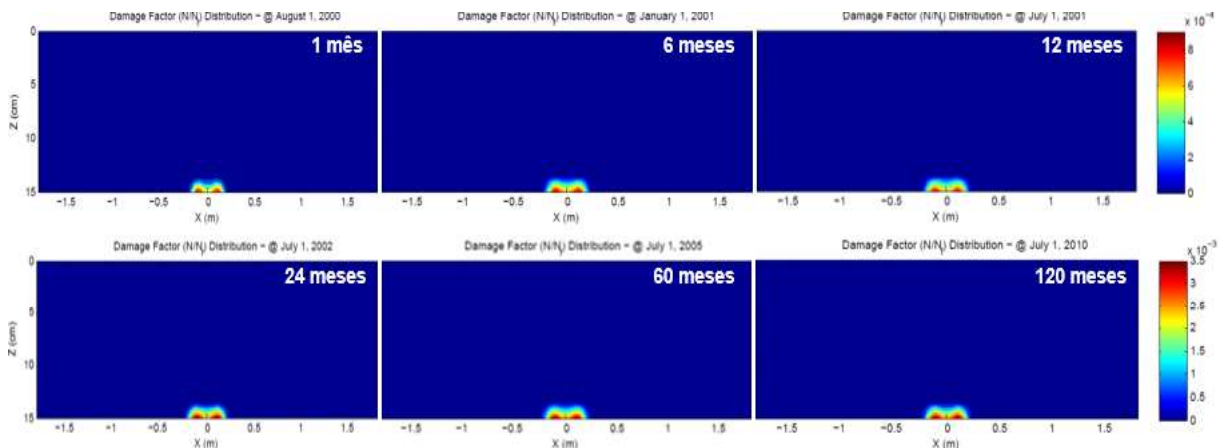


Figura D. 19 – M20 com 5 cm de revestimento e tráfego de 5×10^6

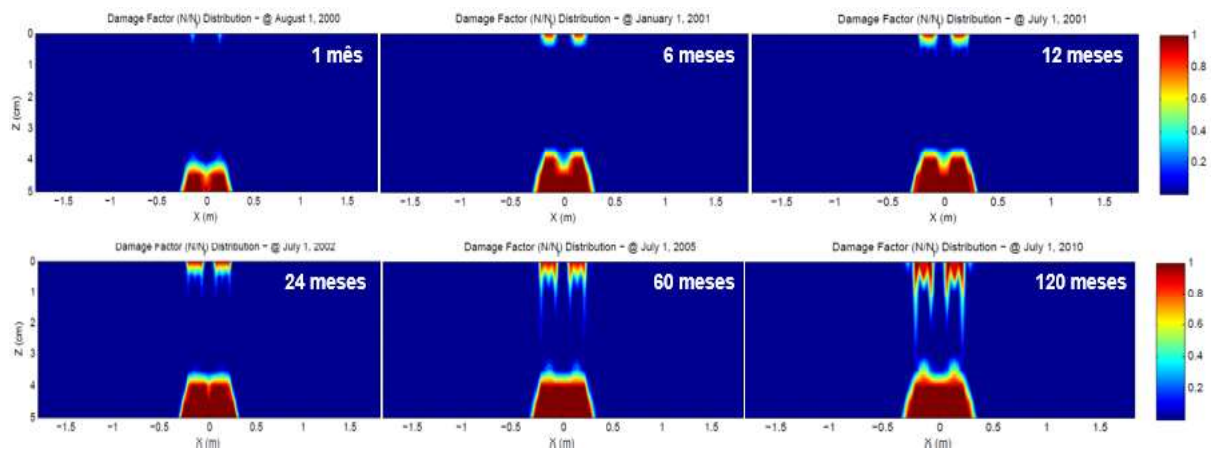


Figura D. 20 – M20 com 10 cm de revestimento e tráfego de 5×10^6

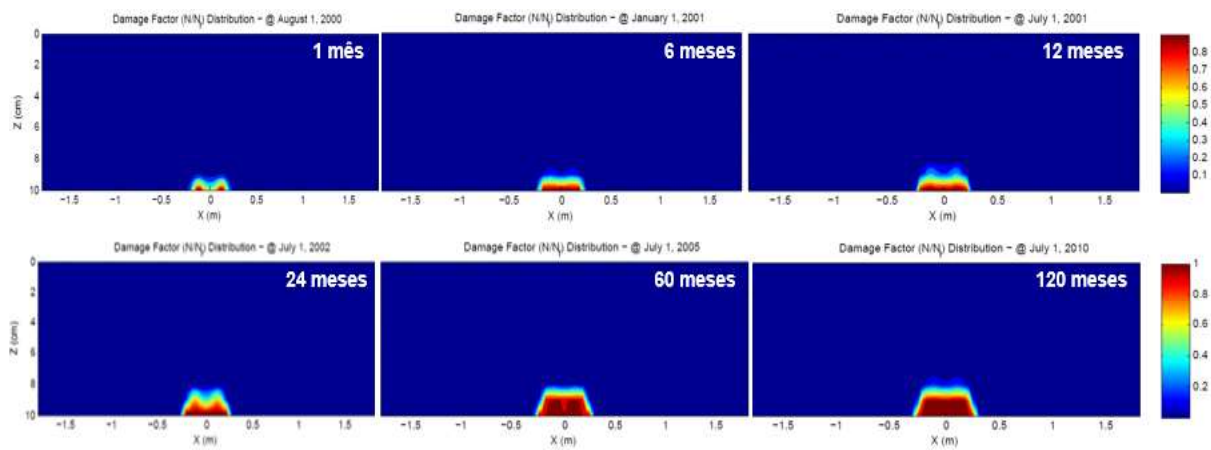


Figura D. 21 – M20 com 15 cm de revestimento e tráfego de 5×10^6

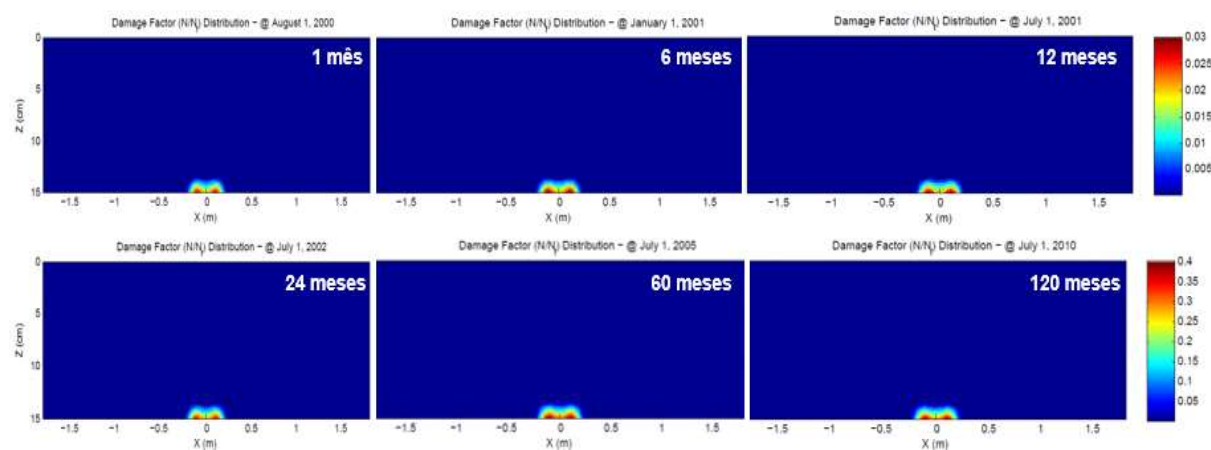


Figura D. 22 – M20 com 5 cm de revestimento e tráfego de 1×10^7

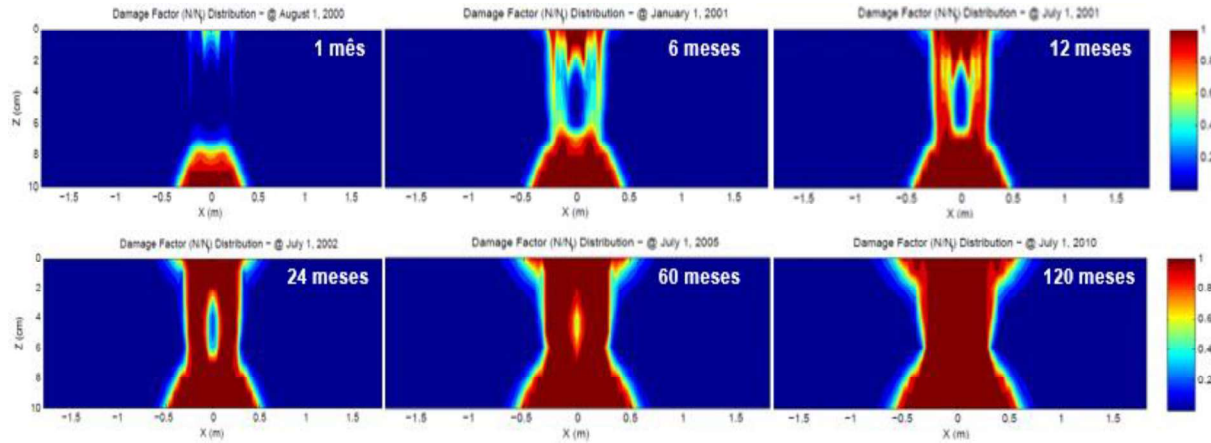


Figura D. 23 – M20 com 10 cm de revestimento e tráfego de 1×10^7

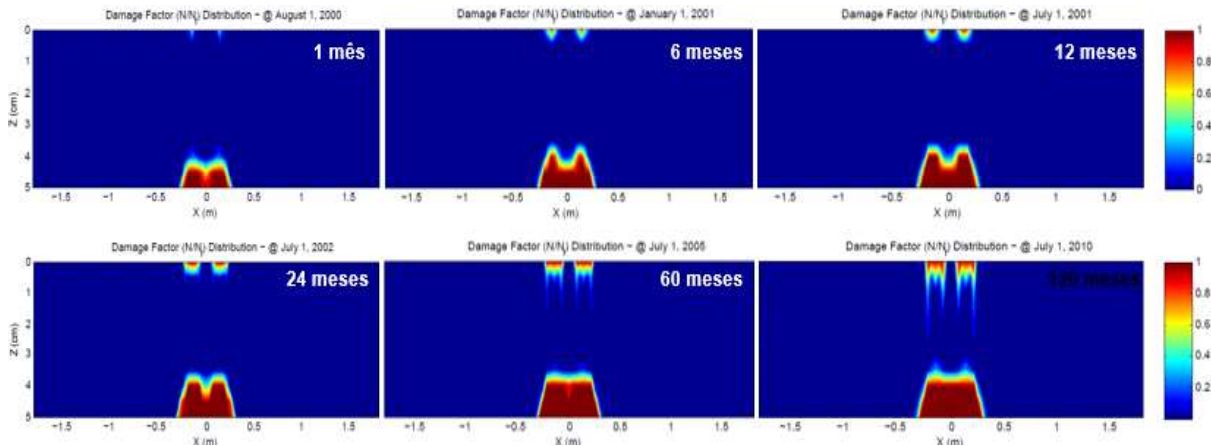


Figura D. 24 – M20 com 15 cm de revestimento e tráfego de 1×10^7

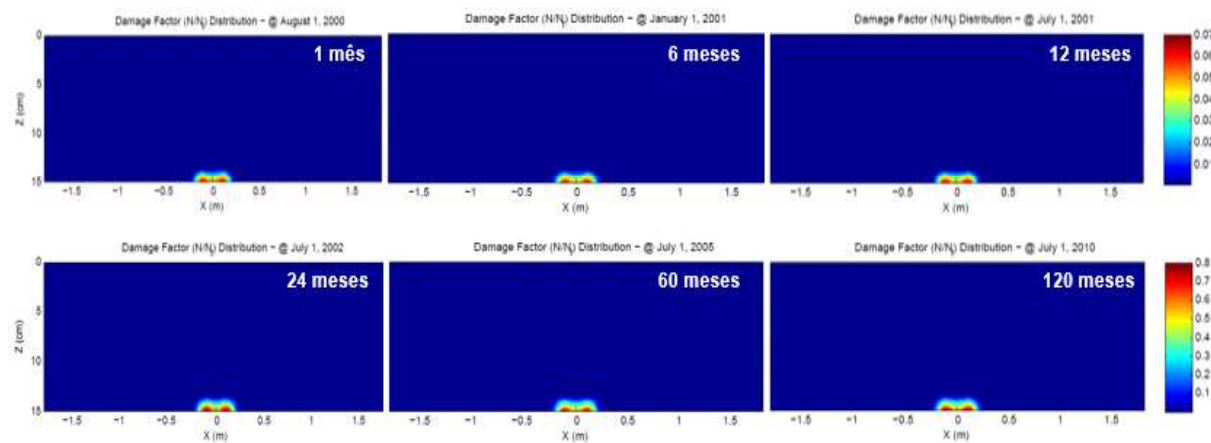


Figura D. 25 – M20 com 5 cm de revestimento e tráfego de 5×10^7

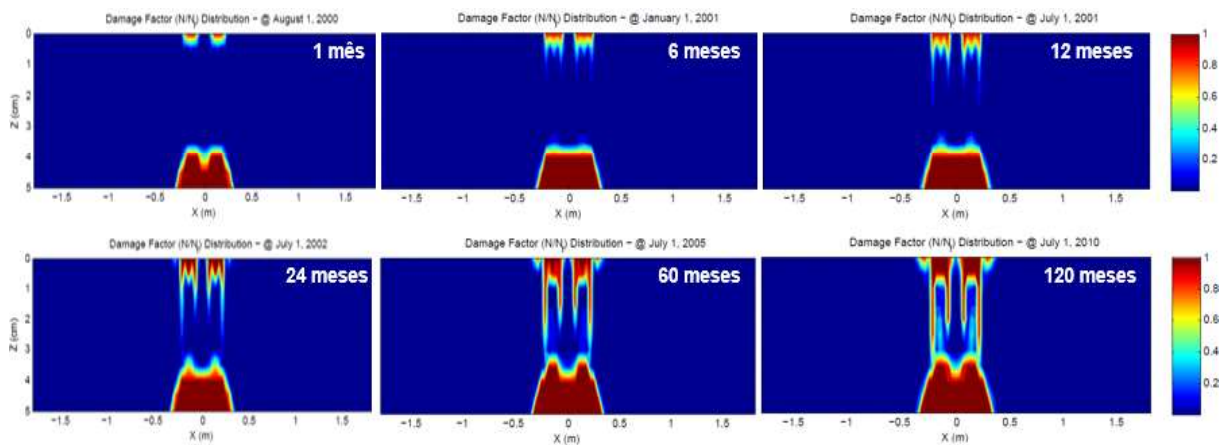


Figura D. 26 – M20 com 10 cm de revestimento e tráfego de 5×10^7

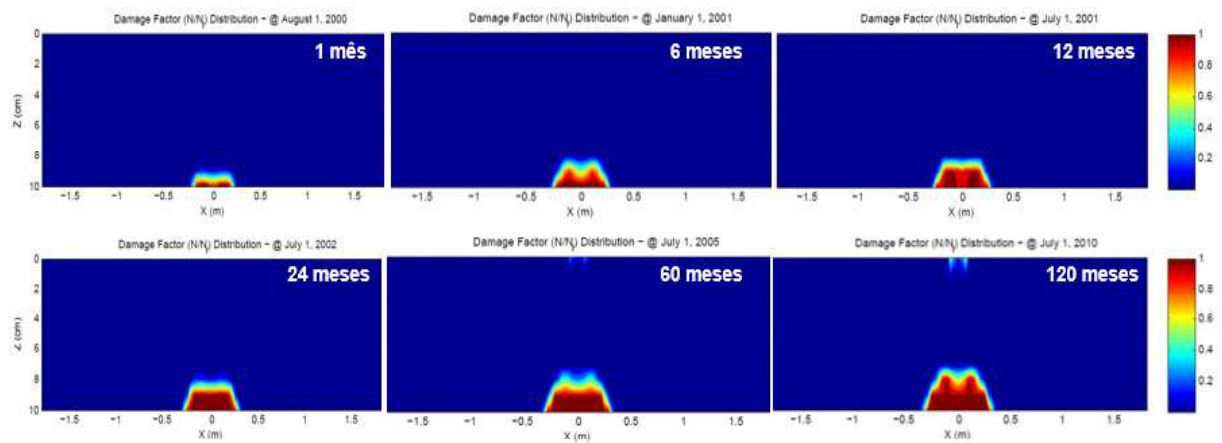


Figura D. 27 – M20 com 15 cm de revestimento e tráfego de 5×10^7

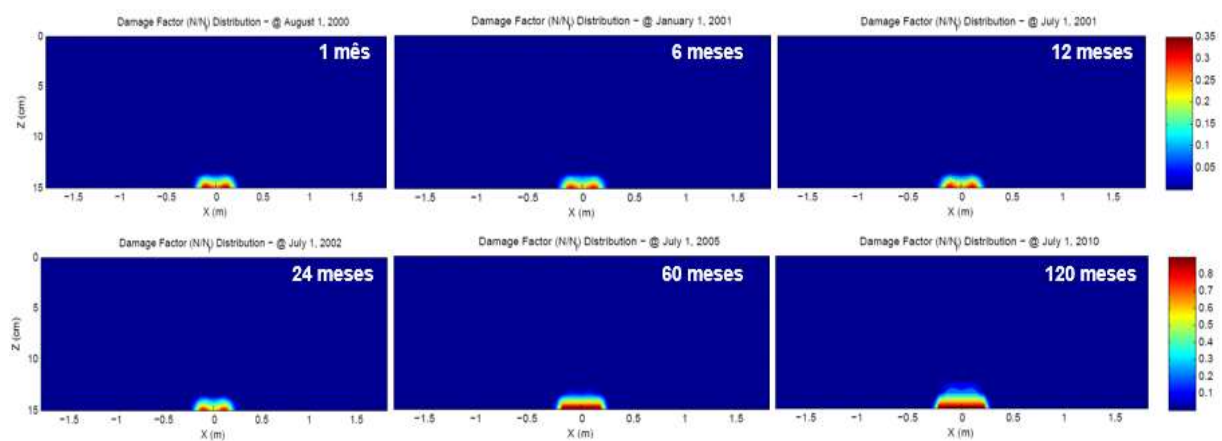


Figura D. 28 – M30 com 5 cm de revestimento e tráfego de 5×10^6

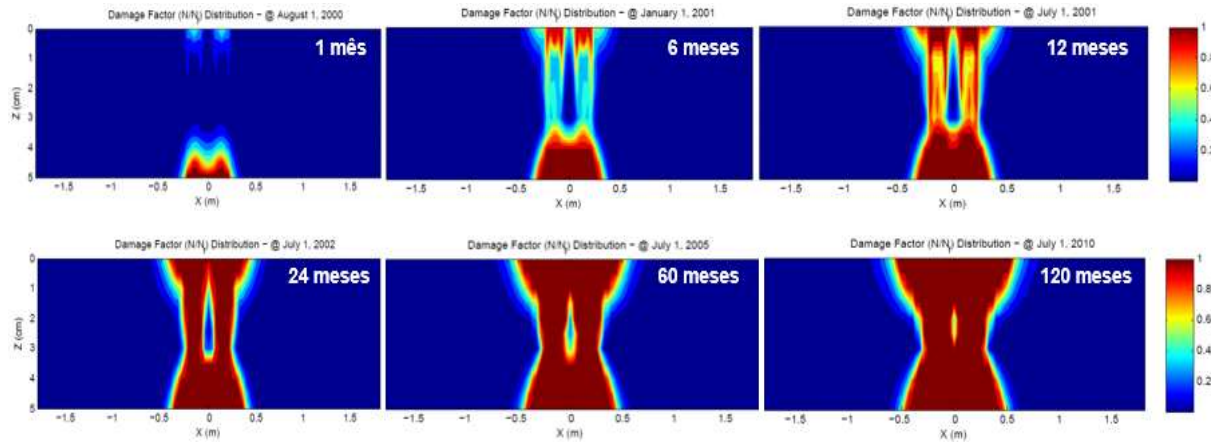


Figura D. 29 – M30 com 10 cm de revestimento e tráfego de 5×10^6

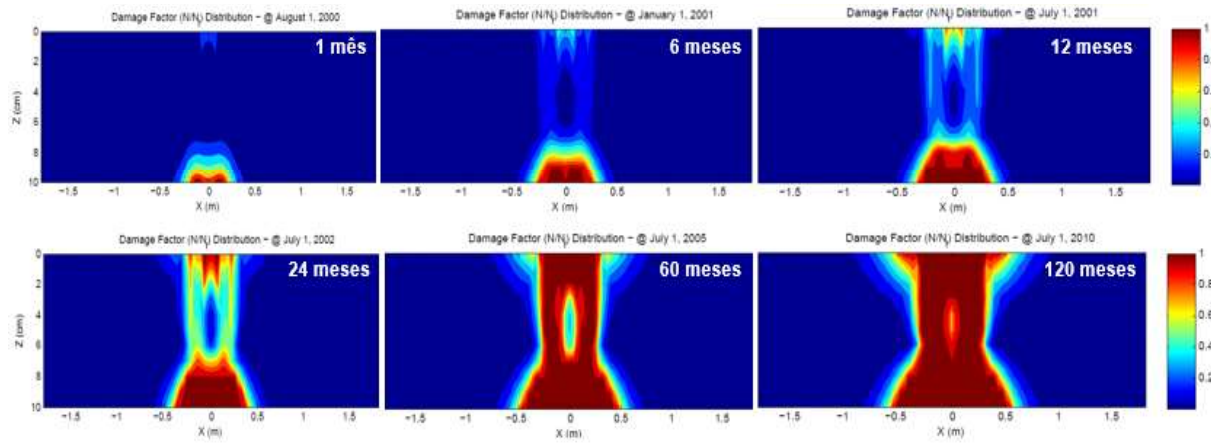


Figura D. 30 – M30 com 10 cm de revestimento e tráfego de 5×10^6

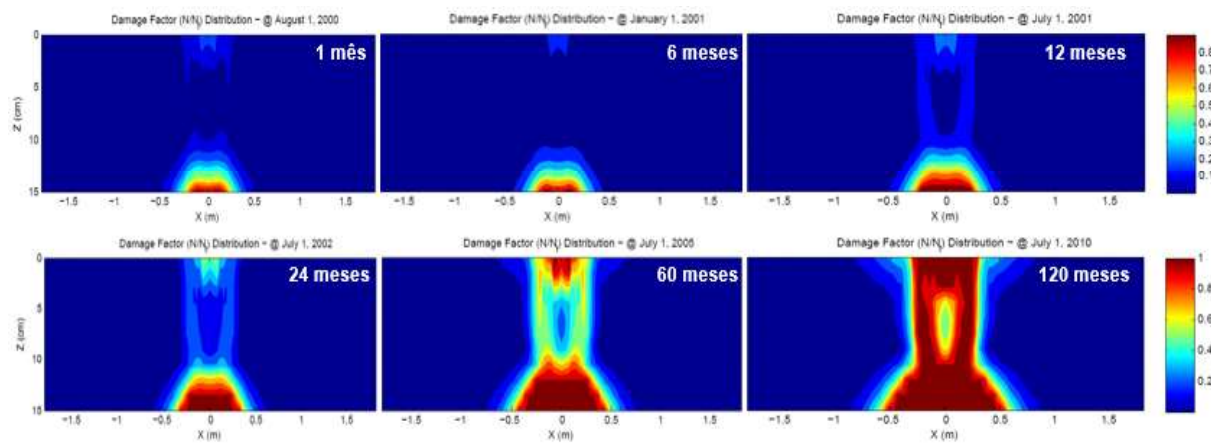


Figura D. 31 – M30 com 5 cm de revestimento e tráfego de 1×10^7

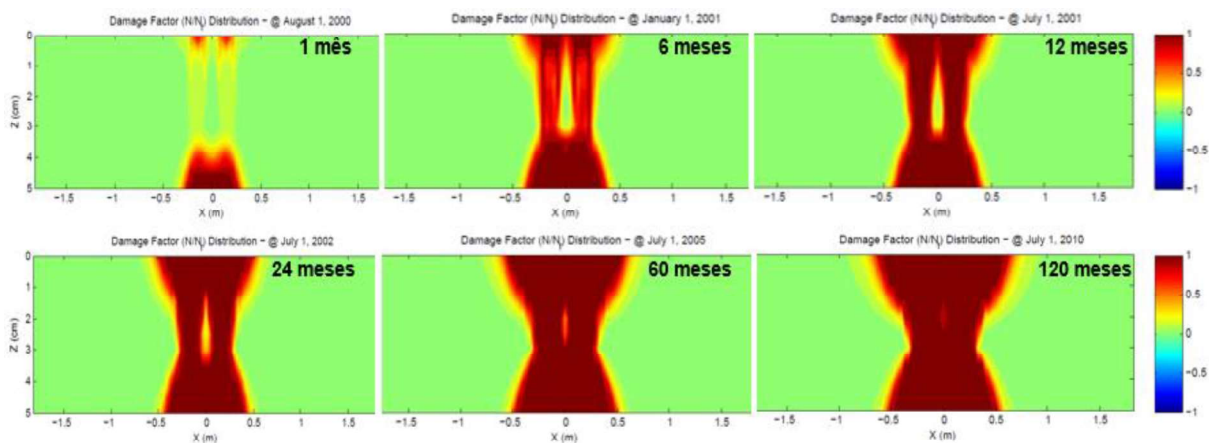


Figura D. 32 – M30 com 10 cm de revestimento e tráfego de 1×10^7

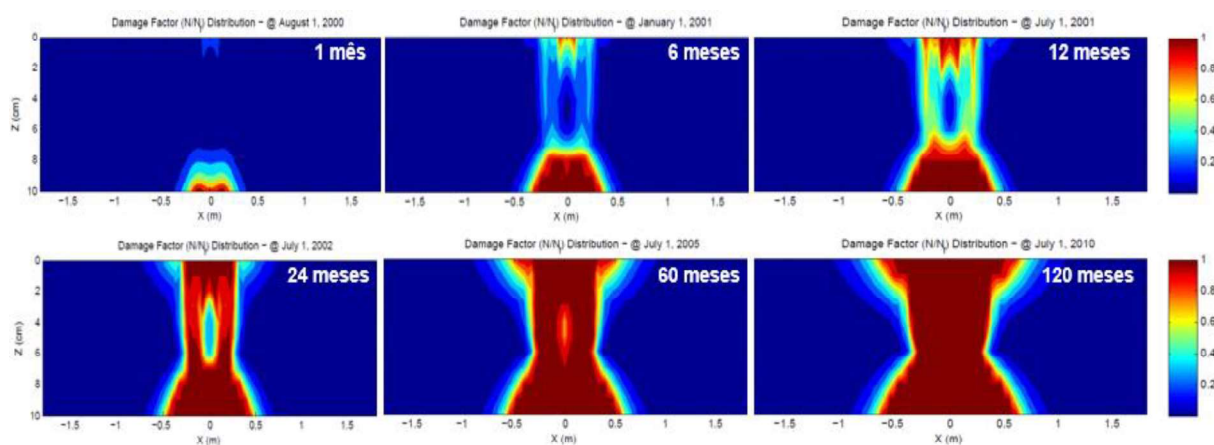


Figura D. 33 – M30 com 15 cm de revestimento e tráfego de 1×10^7

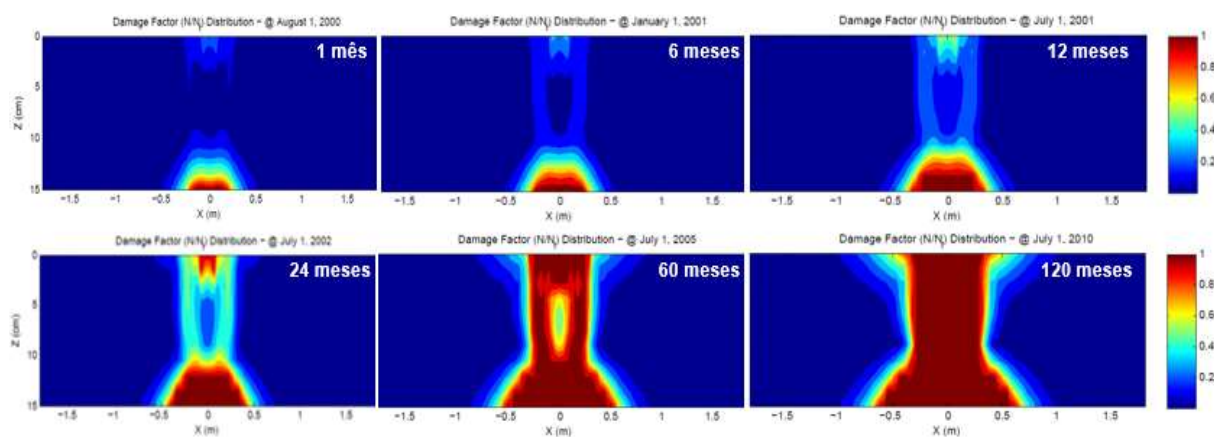


Figura D. 34 – M30 com 5 cm de revestimento e tráfego de 5×10^7

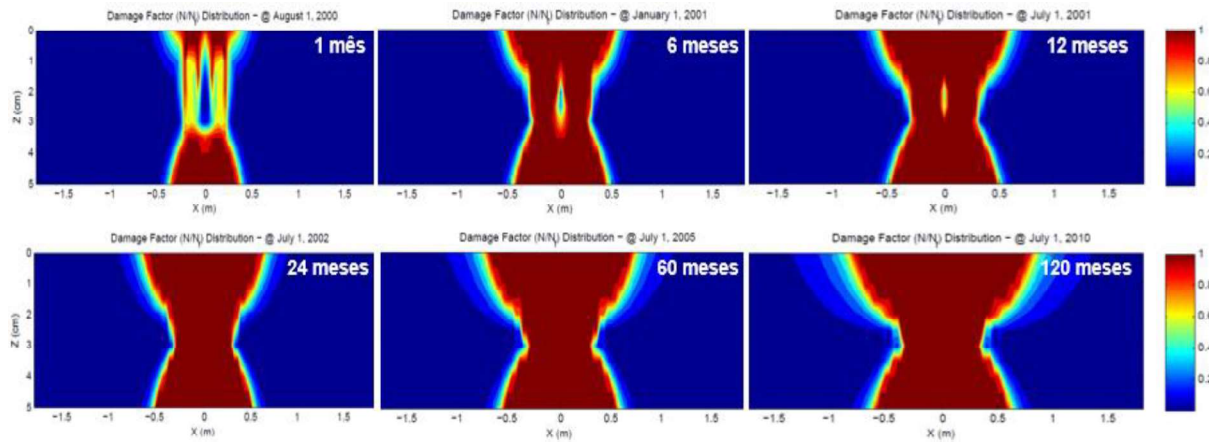


Figura D. 35 – M30 com 10 cm de revestimento e tráfego de 5×10^7

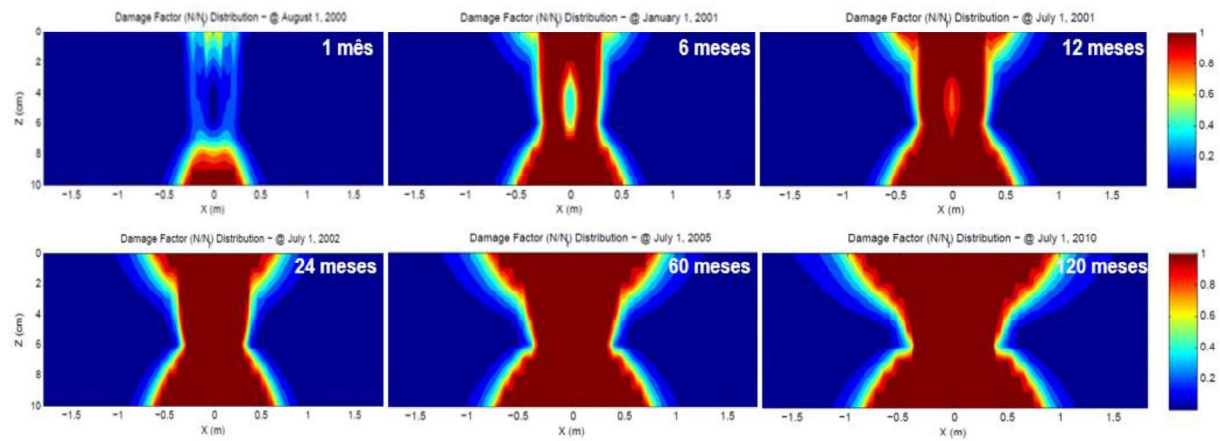


Figura D. 36 – M30 com 15 cm de revestimento e tráfego de 5×10^7

