



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
PPGEC

Área de Concentração: Infraestrutura e Geotecnia

JOB PÉREZ CANCHANYA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E
REOLÓGICO DE MISTURA ASFÁLTICA COM ADIÇÃO DE 20%
DE MATERIAL FRESADO – RAP**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Glicério Trichês.

Florianópolis
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Canchanya, Job Pérez
AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E REOLÓGICO
DE MISTURA ASFÁLTICA COM ADIÇÃO DE 20% DE MATERIAL
FRESADO – RAP / Job Pérez Canchanya ; orientador,
Glicério Trichês, 2017.
132 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Reciclagem de
pavimentos. 3. Fresagem de revestimentos
asfálticos. 4. Comportamento reológico. 5.
Desempenho mecânico. I. Trichês, Glicério. II.
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E
REOLÓGICO DE MISTURA ASFÁLTICA COM ADIÇÃO DE 20%
DE MATERIAL FRESADO – RAP**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, Agosto de 2017.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Curso e orientador

Banca examinadora:

Prof^a. Laura Maria Goretti da Motta, Dr^a.
Universidade Federal de Rio de Janeiro

Prof^a. Liseane Padilha Thives, Dr^a.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. João Victor Staub de Melo, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Ao único e sábio Deus, autor da vida, que fez os céus, a Terra e tudo o que neles há. Dedico este trabalho a quem pela sua graça sou o que sou, porque dele, e por ele, e para ele, são todas as coisas.

Aos meus pais, Job e Luzmila.

Aos meus irmãos, Elizabeth e Christian.

Aos meus primos Áureo e Kheli.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela sua graça e misericórdia, as quais renovam-se a cada dia. Me sinto grato em saber que sempre tudo esteve e estará sob seu controle, por me auxiliar e me guardar, assim como aos meus. Pela oportunidade do avanço na vida profissional e por me permitir conhecer pessoas especiais com quem compartilhei momentos que agregaram crescimento e conhecimento. Também agradeço pela sua graça que me basta, a qual é a minha força e o meu sustento.

Aos meus pais, Job e Luzmila, e aos meus irmãos, Elizabeth e Cristian, por me oferecerem suporte e motivação. Agradeço pelo amor e apoio incondicional e respaldo que me deram em tantos momentos bons e outros não tão bons. Por acreditarem e orarem por mim, por não medirem esforços para me ver feliz.

A Gi, pelo tempo que esteve ao meu lado, embora curto, obrigado pelo amor e todos os momentos compartilhados. Deus a guarde e abençoe sempre onde você estiver. Ao final é Deus quem sabe de todas as coisas e tudo contribui para o bem.

Aos meus primos, Áureo e Kheli, por abrirem para mim as portas do seu lar, por todo o apoio e suporte que me deram desde que cheguei ao Brasil há mais de quatro anos, Deus os recompense ricamente.

Ao Prof. Glicério, por todos os aportes, ensinamentos transmitidos e pela paciência em todo este processo, minha mais sincera gratidão e admiração.

Aos professores do PPGEC, Liseane, Janaíde, Felipe, Marcelo, João, pelo conhecimento compartilhado e por todas as contribuições feitas ao trabalho.

Ao Prof. João Victor, pela realização das pesquisas que permitiram as análises comparativas aqui apresentadas.

Aos colegas, amigos do Laboratório de Pavimentação da UFSC: Adosindro, Gabriela, Emmanuelle, Allan, Lídia, Jonathan, Sarvia, Vanesa, Thomas, aos amigos da zenzala, Ângela, Cândida e o meu grande amigo Camilo. Gratidão em sobremaneira ao Adosindro e a Gabriela, pela ajuda nas distintas etapas deste trabalho.

Aos meus pastores Edgar Jr. e Arony, a toda a grande família da Igreja Palavra Viva.

Ao PPGEC/UFSC, pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

À Rede Temática de Tecnologia do Asfalto, pelos investimentos realizados no laboratório de Pavimentação da UFSC.

RESUMO

No Brasil, a maior parte do transporte de passageiros e de cargas é realizada por meio do sistema rodoviário, cerca do 97% das rodovias são de pavimentos tipo flexíveis e a estrutura é dimensionada para um período de projeto de 10 anos. Com a finalidade de garantir as condições de circulação, conforto, segurança e economia, rotineiramente organismos do governo federal, estadual e prefeituras realizam os serviços de manutenção e restauração rodoviária. Com a execução desses serviços, gera-se um grande passivo ambiental de resíduos que, em sua maioria, não tem um destino final ambientalmente adequado. Um dos grandes passivos desses serviços são os resíduos oriundos da fresagem do revestimento asfáltico RAP (Reclaimed Asphalt Pavement). Nessas intervenções adota-se o mecanismo de fresagem do revestimento asfáltico do pavimento, procedimento que consiste na retirada e fragmentação, parcial ou total da camada antiga do revestimento feita por uma fresadora asfáltica. No Brasil a grande maioria das entidades públicas como também empresas do setor privado, fazem pouca ou nenhuma utilização do RAP. No melhor dos casos, este material é utilizado na estabilização de camadas de sub-base ou até de bases. No caso da prefeitura de Florianópolis, o material fresado das vias urbanas é transportado até um depósito de materiais da Companhia de Melhoramentos da Capital (COMCAP), onde é guardado para sua pós utilização em estradas não pavimentadas, onde o material fresado é espalhado na superfície atuando como Anti-pó. Algumas vezes, o material fresado acaba infelizmente nos depósitos ou bota fora, sendo inutilizados, constituindo-se dessa maneira num grande agente que atenta contra o meio ambiente. Desde a década dos anos 1980, uma série de pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de mostrar o potencial de utilização do RAP em misturas asfálticas, dando um destino adequado a um resíduo tão nobre. Este trabalho de dissertação apresenta os resultados da avaliação do desempenho mecânico e reológico de uma mistura asfáltica com adição de material fresado (RAP) bem como o seu desempenho quanto à deformação permanente e fadiga. Foi definida uma mistura convencional de referência e a partir dela adicionou-se uma porcentagem de 20% de RAP em substituição ao agregado virgem. Os resultados obtidos mostram que a mistura com 20% de RAP tem desempenho superior para alguns parâmetros em relação à mistura de referência desenvolvida por Melo (2014).

Palavras-chave: Reciclagem de pavimentos. Fresagem de revestimentos. Comportamento reológico. Desempenho mecânico.

ABSTRACT

In Brazil, most of the transportation of passengers and freight is carried out through the national road system, where about 97% of the highways are flexible type pavements and its structure designed for a 10 year project period. With the purpose of guaranteeing the conditions of circulation, comfort, safety and economy; federal, state and municipal agencies routinely carry out services of maintenance and restoration of roads. With the execution of these services, a large environmental liability of waste is generated, which for the most part, does not have an environmentally appropriate final destination. One of the major liabilities of these services is the waste from the milling of the Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). In these interventions the milling mechanism of the pavement asphalt is adopted, a procedure that involves the removal and fragmentation, partial or total of the old layer of the coating made by an asphalt milling machine. In Brazil, the vast majority of public entities, as well as private sector companies, make little or no use of RAP. At best, this material is used in the stabilization of sub-base layers or even bases. In the case of Florianópolis, the milled material of urban roads is transported to a warehouse of materials from the Capital Improvement Company (COMCAP), where it is stored for post-use on unpaved roads, then milled material is spread on the surface acting as Anti-dust. Unfortunately, sometimes the milled material ends up in the deposits or boot out, being unused, constituting in this way an agent that attacks the environment. Since the 1980s, a number of researches have been developed to show the potential of RAP use in asphalt mixtures, giving a suitable destination to such a noble residue. This work presents the results of the evaluation of the mechanical and rheological performance of an asphalt mix with addition of milled material (RAP), as well as its performance regarding permanent deformation and fatigue. A conventional reference mixture was defined and from there a 20% RAP was added instead of the virgin aggregate. The results show that the mixture with 20% of RAP has a superior performance for some parameters in relation to the reference mixture developed by Melo (2014).

Keywords: Recycling of pavement. Coatings milling. Rheological behavior. Mechanical performance.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP - Agência Nacional do Petróleo.
ARRA - The Asphalt Recycling and Reclaiming Association.
AR - Agente de reciclagem.
ASTM - American Society For Testing Materials.
BBR - Bending Beam Rheometer.
BBSG - Concreto betuminoso semi-graduado.
CA - Concreto asfáltico.
CAP - Cimento de Asfalto de Petróleo.
CAUQ - Concreto Asfáltico Usinado a Quente.
CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente.
CNT - Confederação Nacional do Transporte.
DC - Deformação controlada.
DDT - Direct Tension Tester.
DER - Departamento de Estradas de Rodagem.
DMT - Densidade máxima teórica.
DSR - Dynamic Shear Rheometer.
EIA - Estudo de impacto ambiental.
EM - Estabilidade Marshall.
EME - Misturas asfálticas de módulo elevado.
HAP - Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos.
HMA - Hot Mix Asphalt.
LCPC - Laboratoire Central des Ponts et Chaussée.
MARQ - Misturas Asfálticas Recicladas à Quente.
MF - Material Fresado.
MPa - Megapascal.
MR - Material Recuperado.
MR - Módulo de resiliência.
PAV - Pressure Aging Vessel
PG - Performance Grade.
RAM - Agregado reutilizável (Reclaimed Aggregate Mineral).
RAP - Revestimento Asfáltico Reutilizável (Reclaimed Asphalt Pavement).
RBV - Relação Betume – Vazios.
RVT - Rotacional Viscometer.
RIMA - Relatório de impacto ambiental.
Rt - Resistência à tração por compressão diametral.
RTFOT - Rolling Thin Film Oven Test.
R² - Coeficiente de regressão.
SUPERPAVE - Superior Performance Asphalt Pavements.
SHRP - Strategic Highway Research Program.

TBA - Penetração.

TSE - Tambor-Secador-Usinagem.

USACE - United States Army Corps of Engineers.

VAM - Vazios no Agregado Mineral.

Vv - Porcentagem de Vazios.

WMA - Warm Mix Asphalt.

4PBB - Four-Point Bending Beam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Solicitações do tráfego e ação climática na estrutura de um pavimento flexível.	42
Figura 2 - Desenho esquemático do comportamento viscoelástico sob carregamento harmônico.	48
Figura 3 - Exemplo de valores de módulo dinâmico de cisalhamento, deslocados ao longo do eixo da frequência.	49
Figura 4 - Deformação permanente no revestimento asfáltico.	52
Figura 5 - Formas de pulsos de carregamento utilizados em ensaios de fadiga.	54
Figura 6 - Relação entre rigidez inicial e rigidez no ciclo "i" (E_0/E_i) x número de ciclos, para os dois modos distintos de carregamento.	55
Figura 7 - Curva granulométrica da composição de agregados do agregado virgem.	72
Figura 8 - Curva granulométrica do RAP sem ligante.	73
Figura 9 - Curvas granulométricas: Composição de agregados e do RAP.	73
Figura 10 - Curva granulométrica da mistura com adição de 20% de RAP.	74
Figura 11 - Simulador de tráfego Orniéreur, desenvolvido pelo LCPC utilizado nesta pesquisa.	81
Figura 12 - Pontos de leitura das deformações permanentes na placa de concreto asfáltico.	82
Figura 13 - Equipamento de teste Quatro Pontos.	83
Figura 14 - Massa específica máxima medida (G_{mm}) da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP em função do teor de ligante.	88
Figura 15 - Massa específica aparente (G_{mb}) da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP função do teor de ligante.	88
Figura 16 - Porcentagem do volume de vazios (V_v) em função do teor de ligante.	89
Figura 17 - Massa Específica Aparente vs Teor de Asfalto.	90
Figura 18 - Volume de Vazios vs Teor de Asfalto.	90
Figura 19 - Estabilidade vs Teor de Asfalto.	91
Figura 20 - Relação Betume/Vazios vs Teor de Asfalto.	91
Figura 21 - Moldagem das placas para ensaio de deformação permanente.	94
Figura 22 - Compactação de uma placa de concreto asfáltico (60×40×9 cm).	95
Figura 23 - Corpos de prova prismáticos (400,0×50,8×63,5mm) serrados de uma das placas (60×40×9 cm).	96
Figura 24 - Placa de concreto asfáltico desta pesquisa durante ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego francês <i>Orniéreur</i>	98

Figura 25 - Placas de mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e 4,0% de teor de ligante, após ensaio no simulador de tráfego.....	98
Figura 26 - Desempenho frente à deformação permanente das misturas asfálticas.....	99
Figura 27 - Evolução do afundamento: Placa direita.....	100
Figura 28 - Evolução do afundamento: Placa esquerda.....	100
Figura 29 - Isotermas da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e da mistura de referência de Melo (2014).....	103
Figura 30 - Isócronas da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e da mistura de referência de Melo (2014).....	103
Figura 31 - Curvas mestras da mistura de referência de Melo (2014) e a mistura com adição de 20% de RAP.....	105
Figura 32 - Espaço de Black da mistura asfáltica de referência de Melo (2014) e a mistura com adição de 20% de RAP.....	106
Figura 33 - Isotermas do ângulo de fase em função da frequência de carregamento da mistura asfáltica de referência de Melo (2014) e a mistura com adição de 20% de RAP.....	107
Figura 34 - Plano complexo da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP.....	108
Figura 35 - Plano complexo da mistura asfáltica de referência (Melo, 2014).....	108
Figura 36 - Plano complexo da mistura asfáltica da mistura asfáltica convencional extraída de campo (Santos, 2016).....	109
Figura 37 - Curvas de fadiga da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e da mistura de referência de Melo (2014), (T = 20°C).....	112
Figura 38 - Modelo de Huet-Sayegh ajustado para os dados experimentais da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP.....	114
Figura 39 - Modelo de Huet-Sayegh ajustado para os dados experimentais da mistura asfáltica convencional extraída de campo de Santos (2016).....	114
Figura 40 - Esquema da estrutura de pavimento simulado.....	115
Figura 41 - Configuração do carregamento adotado nas simulações.....	116
Figura 42 - Resultado de deformação específica na face inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura com adição de 20% de RAP.	116
Figura 43 - Resultado de deformação específica na face inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura de referência de Melo (2014)....	117
Figura 44 - Resultado de deformação específica na face inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura convencional extraída de campo de Santos (2016).....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição de toneladas anuais (em milhões de toneladas) no exterior, relativa à produção de misturas a quente, à disponibilidade de agregados fresados e sua utilização em novas misturas.....	34
Tabela 2 - Classificação dos processos de reciclagem de pavimentos.....	39
Tabela 3 - Análise comparativa entre os modos de carregamento tensão controlada e deformação controlada.....	56
Tabela 4 - Resumo de resultados das principais pesquisas nacionais e internacionais consultadas.....	67
Tabela 5 - Resultado da caracterização dos agregados.....	70
Tabela 6 - Propriedades físicas e químicas da cal hidratada.....	71
Tabela 7 - Porcentagem passante nas peneiras de controle do agregado virgem.....	71
Tabela 8 - Porcentagem passante nas peneiras de controle – RAP sem ligante.....	72
Tabela 9 - Porcentagem passante nas peneiras de controle – Mistura com adição de 20% de RAP.....	75
Tabela 10 - Certificado de ensaios do CAP utilizado.....	76
Tabela 11 - Fracionamento dos agregados para a composição granulométrica das misturas asfálticas.....	77
Tabela 12 - Temperaturas de usinagem e compactação da mistura asfáltica com adição de RAP (a partir dos parâmetros da certificação do CAP).	78
Tabela 13 - Parâmetros dos corpos de prova moldados.....	92
Tabela 14 - Parâmetros dos CPs - Ensaio Lottman.....	93
Tabela 15 - Caracterização das placas moldadas para ensaio de deformação permanente – Teor 4,0% de ligante.....	94
Tabela 16 - Caracterização das placas moldadas para ensaio de deformação permanente – Teor 4,3% de ligante.....	94
Tabela 17 - Caracterização volumétrica dos corpos de prova prismáticos para ensaios de módulo complexo e fadiga.....	97
Tabela 18 - Afundamento para cada conjunto de ciclos de carregamento pré-definido: Placa direita.....	99
Tabela 19 - Afundamento para cada conjunto de ciclos de carregamento pré-definido: Placa esquerda.....	99
Tabela 20 - Resultados de módulo complexo e ângulo de fase para a mistura com adição de 20% de RAP e 4% de teor de ligante adicionado.....	102
Tabela 21 - Resultados do ensaio resistência à fadiga da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP (T = 20°).	110
Tabela 22 - Resultados do ensaio resistência à fadiga da mistura asfáltica de referência de Melo (2014) (T = 15°).....	111

Tabela 23 - Resultados do ensaio resistência à fadiga da mistura asfáltica convencional extraída de campo de Santos (2016) ($T = 20^{\circ}$).	111
Tabela 24 - Parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh obtidos para as diferentes misturas asfálticas.	113
Tabela 25 - Parâmetros elásticos das camadas de base, sub-base e subleito.	115
Tabela 26 - Resultados das simulações numéricas e previsão da vida útil à fadiga dos revestimentos.	118

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	JUSTIFICATIVA	24
1.2	OBJETIVOS	25
1.2.1	Objetivo Geral	25
1.2.2	Objetivos Específicos	25
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	LIGANTES ASFÁLTICOS	27
2.1.1	Composição química e estrutura interna	27
2.1.2	Envelhecimento das Misturas Asfálticas	30
2.2	FRESAGEM DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	33
2.2.1	Tipos de Fresagem de Pavimentos	34
2.2.1.1	Fresagem superficial	35
2.2.1.2	Fresagem rasa	35
2.2.1.3	Fresagem profunda	35
2.3	RECICLAGEM DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS	35
2.3.1	Tipos de Reciclagem	38
2.4	CONHECIMENTOS PRELIMINARES PARA RECICLAGEM A QUENTE	40
2.5	COMPORTAMENTO MECÂNICO E REOLÓGICO DE MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO	41
2.5.1	Solicitações em Camadas de Concreto Asfáltico	42
2.5.2	Mecanismos de Degradação de Camadas de Concreto Asfáltico	43
2.5.3	Rigidez do Concreto Asfáltico	44
2.5.3.1	Fatores Externos que Influenciam a Rigidez do Concreto Asfáltico	44

2.5.3.2 Fatores Inerentes ao Concreto Asfáltico de petróleo que influenciam a Rigidez.....	45
2.5.3.3 Módulo Complexo do Concreto Asfáltico e Fundamentos de Viscoelasticidade Linear	46
2.5.4 Resistência à deformação permanente de misturas de concreto asfáltico	51
2.5.5 Resistência à fadiga de misturas de concreto asfáltico..	53
2.6 COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE RAP	58
2.7 RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	65
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
3.1 ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MINERAIS E DO RAP	70
3.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO LIGANTE ASFÁLTICO	75
3.3 ETAPA 3 - DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA.....	76
3.3.1 Produção das misturas asfálticas	77
3.3.2 Determinação da DMM	78
3.3.3 Dosagem Marshall.....	78
3.3.4 Dano por umidade induzida	79
3.4 ETAPA 4 - MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CONCRETO ASFÁLTICO	79
3.5 ETAPA 5 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA MISTURA ASFÁLTICA .	80
3.5.1 Desempenho à deformação permanente das misturas asfálticas	80
3.5.2 Comportamento reológico e desempenho à fadiga das misturas asfálticas	82

3.6	ETAPA 6 - SIMULAÇÃO DE ESTRUTURA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO.....	85
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	87
4.1	DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA	87
4.1.1	Determinação da DMM.....	87
4.1.2	Dosagem Marshall	89
4.1.3	Dano por umidade induzida.....	92
4.2	MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CONCRETO ASFÁLTICO	93
4.2.1	Moldagem das placas destinadas ao ensaio de deformação permanente	93
4.2.2	Corpos de prova de concreto asfáltico destinados aos ensaios de módulo complexo e de fadiga.....	95
4.3	ETAPA 5 - AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E DESEMPENHO MECÂNICO	97
4.3.1	Desempenho à deformação permanente da mistura asfáltica	97
4.3.2	Comportamento reológico das misturas asfálticas	101
4.3.3	Resistência à fadiga das misturas asfálticas	110
4.4	SIMULAÇÃO DE ESTRUTURA DE PAVIMENTO URBANO.....	113
4.4.1	Pré-dimensionamento da Estrutura.....	113
4.4.2	Simulação Viscoroute	113
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	119
5.1	CONCLUSÕES.....	119
5.2	RECOMENDAÇÕES.....	121
6	REFERÊNCIAS	123

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo a pesquisa da CNT (2016), conta-se com um total de 1.720.756 km de rodovias, das quais 211.468 km (12,3% do total) constituem-se de rodovias pavimentadas, 78,6% de rodovias não pavimentadas e 9,1% de rodovias planejadas. Das rodovias avaliadas nessa pesquisa observou-se que 48,6% delas apresentaram algum tipo de deficiência, sendo 35,4% dos pavimentos classificados como de qualidade regular, 10,1% como ruins e 3,1% como rodovias em estado péssimo. Ou seja, tem-se uma extensa quilometragem de rodovias que precisam ser recuperadas.

Nos serviços de manutenção e restauração de vias urbanas e rodovias, é gerada uma grande quantidade de resíduos provenientes dos pavimentos asfálticos antigos intervindos. Uma das técnicas comumente adotada para a recuperação e revitalização de vias urbanas é a fresagem do revestimento asfáltico trinado e envelhecido e a substituição por uma camada de mistura asfáltica nova. Esses resíduos oriundos da fresagem dão origem ao RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) que na maioria das cidades não tem uma destinação ambientalmente adequada frente ao seu potencial de reutilização (FREIRE, 2014).

A reciclagem do revestimento asfáltico fresado (RAP) surgiu devido à necessidade de dar um fim proveitoso aos materiais provenientes de revestimentos velhos de modo que eles não fiquem amontoados nos bota-fora. Parte desse princípio é também optar por uma medida que não atente, pelo contrário, proteja o meio ambiente. Outro fator para a implantação desta técnica é a economia de recursos naturais, menor consumo de energia, menos emissão de gases e menos requerimentos de espaços físicos (bota-fora).

As experiências que se tem registradas das misturas asfálticas com adição de RAP é que elas têm apresentado uma boa homogeneidade, qualidade e controle eficaz da construção. Atualmente, a reciclagem dos materiais de pavimentação tem se tornado quase sistemática, mas sua valorização ainda não é notória e considerável. O desenvolvimento da técnica de reciclagem do RAP requer investimentos por parte dos organismos públicos ou empresas do sector privado, para adaptar e complementar o material, desenvolver plataformas de estocagem para os materiais a serem reciclados, organizar os circuitos de coleta, estudar as dosagens e colocar em prática os controles de qualidade adequados. (GÓIS, 2014).

Entretanto, a economia oriunda do aproveitamento do RAP em misturas asfálticas pode amortizar o investimento requerido em um prazo muito curto, dependendo da quantidade de RAP reciclado anualmente.

Considerando-se o contexto apresentado, este trabalho apresenta a avaliação da influência no comportamento mecânico, reológico e desempenho quanto à deformação permanente e à fadiga de uma mistura asfáltica com adição de RAP. Para tanto, irá considerar-se uma mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e 80% de materiais novos, ou virgens, e uma mistura asfáltica convencional com 100% de materiais novos (mistura asfáltica de referência desenvolvida por Melo, 2014), que servirá de referência comparativa nas distintas etapas da pesquisa.

1.1 JUSTIFICATIVA

As atividades de conservação e manutenção das vias urbanas e de rodovias originam resíduos que requerem um tratamento adequado quanto à sua destinação final. Um destes resíduos é o RAP. Quando se fresa um revestimento asfáltico envelhecido, trincado e cheio de buracos, o material resultante contém agregados e ligante asfáltico que ainda podem ser reaproveitados, representando um grande potencial de valorização econômica.

Frente à necessidade da implantação de novos mecanismos que garantam a viabilidade e sustentabilidade na área de engenharia, durante muitos anos os responsáveis pela pavimentação têm procurado por diversos métodos e/ou tecnologias de restauração e conservação rodoviária, a fim de fazer a melhor utilização e distribuição dos recursos (agregados, asfalto e outros) presentes nos trabalhos de pavimentação asfáltica.

Atualmente, um dos métodos mais utilizados para a valorização do RAP é a sua incorporação a misturas asfálticas novas. Estudos têm demonstrado que com seu devido beneficiamento a reciclagem do RAP tem um grande apelo quanto à preservação ambiental (diminuição na exploração de jazidas minerais e do passivo ambiental em bota-foras), pois faz uso total ou parcial dos materiais do revestimento existente (KLIPPEL, 2014).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento mecânico, reológico e o desempenho à deformação permanente e à fadiga de uma mistura asfáltica, dosada com materiais virgens (agregados), ligante asfáltico 50-70 (sem adição de agente rejuvenescedor) e 20% de material fresado proveniente dos serviços de conservação e manutenção de vias urbanas da cidade de Florianópolis - Santa Catarina.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar em laboratório as propriedades mecânicas, reológicas e desempenho à deformação permanente, módulo complexo e à fadiga de uma mistura asfáltica dosada com adição de 20% de RAP.
- Comparar os resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos para uma mistura asfáltica de referência caracterizada por Melo (2014).
- Avaliar a influencia no dimensionamento de uma estrutura de pavimento asfáltico de uma via urbana, considerando a mistura asfáltica com e sem adição de RAP.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para se atingir os objetivos propostos nesta pesquisa, de uma maneira entendível e ordenada, se fez a estruturação do trabalho em 5 capítulos que conformam esta dissertação, facilitando o entendimento da pesquisa como um todo. Uma descrição sucinta dos assuntos abordados nos capítulos é exposta a seguir.

Capítulo 1 – Introdução

O capítulo trata as considerações iniciais sobre um dos métodos mais promissores de aproveitamento do RAP, que consiste em sua adição em misturas asfálticas convencionais novas. Também são apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho, a justificativa para seu desenvolvimento e por último, a estrutura desta dissertação.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica

Neste capítulo apresenta-se uma revisão e fundamentação teórica nacional e internacional a respeito das misturas asfálticas produzidas com uma porcentagem adicionada de material fresado de um revestimento de pavimento asfáltico antigo (RAP). Apresentam-se conhecimentos iniciais e gerais acerca das misturas asfálticas com adição de RAP, abordando sua composição, teor e comportamento mecânico e reológico.

Capítulo 3 – Programa Experimental

Neste capítulo vai se detalhar a exposição do método da pesquisa utilizado para alcançar os objetivos propostos pelo estudo.

Capítulo 4 – Análise e discussão dos Resultados

Este capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos, a reflexão sobre os mesmos, contrapondo-os com resultados de pesquisas relevantes ao tema.

Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões de pesquisas Futuras

Neste capítulo se apresentam as conclusões e sugestões pertinentes ao estudo realizado, denotando se os objetivos propostos no capítulo de introdução foram ou não alcançados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS

Segundo o *Asphalt Institute* (2015), o asfalto é um material aglutinante de coloração escura, composto predominantemente por betume, sua ocorrência pode ser natural, por meio de perdas de frações que compunham depósitos de petróleo, resultando em um “asfalto natural” contendo betume; também pode ser obtido pela exploração de petróleo e posterior processamento em refinarias, onde as frações mais leves do petróleo são separadas do asfalto por vaporização, fracionamento e condensação.

O ligante asfáltico é definido como uma complexa mistura de hidrocarbonetos derivada do petróleo e que apresenta comportamento termoviscoelástico, dependente da temperatura de serviço, do tempo de atuação de carga e da intensidade do carregamento. Embora esse material seja impermeável à água e pouco reativo, essas propriedades não o resguardam de sofrer um processo de envelhecimento por oxidação lenta devido ao contato com o ar e a água (BERNUCCI *et al.*, 2010).

Na literatura diferentes termos são usados para designar o material proveniente do petróleo que é utilizado como ligante para os agregados na pavimentação asfáltica: na literatura norte americana o ligante asfáltico é denominado *asphalt cement*, na literatura europeia é designado como *bitumen*. No Brasil, o ligante asfáltico é conhecido como cimento asfáltico de petróleo (CAP) e existem vários tipos dependendo de suas características.

2.1.1 Composição química e estrutura interna

A composição e a estrutura química de um ligante asfáltico são propriedades que regem fundamentalmente o comportamento reológico desse material (READ e WHITEOAK, 2003).

O cimento asfáltico de petróleo é uma dispersão coloidal de compostos de elevado peso molecular. Tanto o material disperso quanto o solvente possuem, além de uma grande quantidade de hidrocarbonetos, compostos químicos contendo oxigênio, enxofre e nitrogênio. São presentes também traços de vanádio, níquel ferro, magnésio e cálcio (ROMBERG, NESMITH e TRAXLER, 1959).

Em função da exploração de petróleo ser realizada em diversas localidades, esse produto apresenta variações em suas propriedades

físicas e químicas. O ligante asfáltico, sendo um material derivado do petróleo, tem sua composição química dependente, da fonte de exploração do petróleo que o originou e do processo de destilação ao qual foi submetido (READ e WHITEOAK, 2003).

Segundo Leite (1999), os CAPs são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e 5 a 10% de heteroátomos, sendo que o número de átomos de carbono por molécula varia de 20 a 120.

Análises realizadas com ligantes asfálticos provindos de uma variedade de petróleos mostram que a maioria dos ligantes contém (READ E WHITEOAK, 2003):

- Carbono – 82 a 88%;
- Hidrogênio – 8 a 11%;
- Enxofre – 0 a 6%;
- Oxigênio – 0 a 1,5%;
- Nitrogênio – 0 a 1%.

Segundo a norma ASTM D 4124 (2009), é possível realizar a separação do CAP em quatro frações, denominadas: saturados, nafteno-aromáticos, polar-aromáticos (resinas) e asfaltenos. O método consiste inicialmente na precipitação dos asfaltenos, utilizando n-heptano como solvente e posteriormente na separação dos outros constituintes, que juntos correspondem ao grupo dos maltenos, por meio de cromatografia de adsorção.

Na Europa, o fracionamento químico utilizado é denominado SARA (saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos) e é semelhante ao proposto pela norma ASTM D 4124. Após a separação dos asfaltenos, o fracionamento dos maltenos é realizado por cromatografia de camada fina por ionização de chama (LEITE, 1999).

As principais características dos quatro grupos de componentes dos ligantes asfálticos são (LEITE, 1999; READ e WHITEOAK, 2003):

- Asfaltenos: são sólidos amorfos de coloração escura, insolúveis em n-heptano, constituídos de hidrocarbonetos naftênicos condensados e de cadeias saturadas curtas. São altamente polares, possuem peso molecular consideravelmente elevado e suas partículas abrangem tamanhos entre 5 e 30 nm. O teor de asfaltenos influencia significativamente as características reológicas de um ligante asfáltico: seu aumento tende a produzir um ligante que apresente maior viscosidade e ponto de amolecimento, enquanto a medida de penetração é reduzida. Os asfaltenos constituem entre 5 e 25% do ligante asfáltico.
- Resinas: são compostos poliaromáticos sólidos ou semissólidos de coloração marrom escura, fortemente adesivos devido à sua

polaridade. Possuem alto teor de heteroátomos e peso molecular inferior ao dos asfaltenos. São agentes dispersantes para os asfaltenos e, por isso, a proporção entre resinas e asfaltenos é responsável pelo tipo de estrutura interna apresentada pelo ligante asfáltico: Sol ou Gel.

- Aromáticos: são líquidos viscosos de coloração marrom escura, apresentam o menor peso molecular dentre os componentes do ligante e representam a maior parte do meio no qual os asfaltenos estão dispersos. Consistem em cadeias carbônicas apolares que possuem alta capacidade de dissolução para hidrocarbonetos de elevado peso molecular. Os aromáticos constituem entre 40 e 65% do ligante asfáltico.
- Saturados: são óleos viscosos apolares de coloração clara e peso molecular médio similar aos aromáticos. Seus componentes incluem saturados parafínicos e não-parafínicos, que consistem em cadeias lineares ou ramificadas de hidrocarbonetos alifáticos. Representam entre 5 e 20% do ligante asfáltico.

O modelo de Yen propõe que a estrutura interna do CAP pode ser considerada um sistema coloidal de asfaltenos, circundados por resinas que exercem a função de agentes dispersantes, dissolvidos em aromáticos e saturados (maltenos). As propriedades físicas do CAP são influenciadas pela temperatura. Em temperaturas muito baixas, as moléculas não têm condições de se mover umas em relação às outras e a viscosidade fica muito elevada, então o ligante apresenta-se como um sólido. Em elevadas temperaturas as moléculas começam a se mover e o ligante se comporta como um líquido. Um dos critérios mais utilizados na classificação dos ligantes é a avaliação da sua suscetibilidade térmica, medindo consistência ou viscosidade em diferentes temperaturas (YEN, 1991 *apud* LEITE, 1999).

Pesquisas realizadas pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP) conduziram a um modelo da microestrutura do cimento asfáltico mais adequado para explicar o seu comportamento mecânico do que o tradicional modelo de micelas de Yen. Nesse modelo, nomeado *The Dispersed Polar Fluid Model* (DPF), o cimento asfáltico é considerado essencialmente um sistema monofásico, enquanto modelos coloidais o consideram um sistema bifásico, consistindo em uma fase contínua de baixa polaridade e uma fase dispersa (asfaltenos), de alta polaridade. De acordo com o modelo DPF, as propriedades mecânicas do cimento asfáltico não são dependentes da quantidade relativa de fases dispersas

(asfaltenos) e contínuas (maltenos), mas sim da magnitude e dispersão dos pesos moleculares e das forças intermoleculares. A partir desse estudo, pôde-se gerar um modelo matemático que descreve o comportamento viscoelástico linear de ligantes asfálticos em função de parâmetros de sua composição química (CHRISTENSEN e ANDERSON, 1992).

De acordo com Jones (1992), o cimento asfáltico é composto por apenas dois tipos funcionais de moléculas: polares e apolares. As moléculas polares e apolares constituem uma mistura homogênea, que não apresenta estruturas coloidais. As moléculas polares associam-se por meio de pontes de hidrogênio e ligações π - π gerando redes tridimensionais que conferem ao cimento asfáltico suas propriedades elásticas. Já as moléculas apolares formam o corpo do material no qual a rede tridimensional se situa, contribuindo para as propriedades viscosas do cimento asfáltico. Uma vez que as ligações entre as moléculas polares são fracas (ao contrário das ligações covalentes que formam as moléculas), essas ligações são constantemente quebradas devido à submissão do cimento asfáltico a altas temperaturas ou a forças cisalhantes e são posteriormente reformuladas à medida que o material resfria ou que a força atuante cessa. A propriedade de formação e quebra de ligações entre as moléculas do cimento asfáltico é de grande importância para o entendimento das propriedades físicas desse material.

2.1.2 Envelhecimento das Misturas Asfálticas

A durabilidade de uma mistura asfáltica pode ser definida como a capacidade de manter as propriedades reológicas, coesão e a adesão ao longo do tempo de serviço. O envelhecimento de uma mistura asfáltica se processa lentamente ao longo de sua vida útil, até que o mesmo adquira uma rigidez excessiva, que facilita o trincamento por fadiga (TRAXLER, 1999).

O cimento asfáltico está sujeito a um processo de envelhecimento durante a sua estocagem, manuseio, aplicação e serviço. Esse tipo de degradação se deve principalmente pela presença de oxigênio, pela exposição à radiação solar e por variações de temperatura. Ocorrem alterações nas características químicas e reológicas do ligante asfáltico, resultando em aumento de sua consistência e, conseqüentemente, em maior rigidez da mistura asfáltica. Isso torna os revestimentos asfálticos muito mais suscetíveis a fissuras e provoca a redução da vida útil do pavimento (TONIAL, 2001).

No processo de envelhecimento, a alteração da estrutura química do ligante asfáltico ocorre tanto em curto prazo (usinagem, manuseio e aplicação) quanto em longo prazo (serviço). O endurecimento é resultante da oxidação parcial dos aromáticos, que por sua vez se transformam em resinas; as resinas de maior peso molecular se transformam em asfaltenos e o teor de saturados se mantém praticamente inalterado (TONIAL, 2001).

Segundo Read e Whiteoak (2003), quatro mecanismos são os principais responsáveis pelo envelhecimento do cimento asfáltico:

- Oxidação: a oxidação é considerada a principal causa do envelhecimento de ligantes asfálticos. Por ser uma substância orgânica, o cimento asfáltico é lentamente oxidado quando em contato com o oxigênio atmosférico. São formados grupos polares contendo oxigênio e esses tendem a se associar em micelas de elevado peso molecular, aumentando a viscosidade do ligante e tornando-o menos flexível. O grau de oxidação é significativamente dependente da temperatura, do tempo e da espessura da película de ligante. Com o passar do tempo, o asfalto se torna mais duro e quebradiço até chegar a um ponto em que é preciso fazer a recuperação do revestimento. O envelhecimento oxidativo durante o tempo de serviço de um revestimento asfáltico pode ser acelerado devido à influência de uma alta taxa de vazios da mistura, permitindo uma maior circulação de ar, água e luz.
- Perda de voláteis: a evaporação de componentes voláteis depende majoritariamente da temperatura e das condições de exposição. O envelhecimento resultante da perda de voláteis é reduzido, já que os CAPs não são materiais voláteis em sua maior parte.
- Endurecimento físico: esse mecanismo de envelhecimento ocorre quando o ligante asfáltico está à temperatura ambiente e é atribuído à reorientação de suas moléculas e à lenta cristalização de parafinas. O endurecimento físico é reversível – sob aquecimento, o ligante retorna à sua viscosidade original.
- Endurecimento exsudativo: sua ocorrência se deve ao movimento de componentes oleosos do ligante asfáltico para os agregados minerais. São fatores determinantes tanto a tendência de exsudação do ligante asfáltico quanto a porosidade dos agregados.

Existem ensaios normatizados com o intuito de simular em laboratório e quantificar os efeitos causados pela temperatura e pelo ar ao ligante asfáltico, em diferentes estágios ao longo de sua vida útil.

O ensaio de envelhecimento em estufa de filme fino rotativo (RTFOT – *Rolling Thin-Film Oven Test*), cujos procedimentos são descritos na ASTM D 2872 (2012), foi desenvolvido para simular precisamente os efeitos da temperatura e do ar durante a usinagem a quente da mistura asfáltica. A partir desse ensaio, é possível monitorar em que condições o ligante asfáltico se encontra imediatamente antes de ser incorporado no pavimento. Esse teste também permite determinar a variação da massa do filme de ligante utilizado, o que representa uma medida da volatilidade do material.

Simular o envelhecimento do CAP a longo prazo em campo tem-se mostrado uma tarefa dificultosa em virtude do grande número de variáveis que podem influenciar no envelhecimento do ligante. A especificação Superpave utiliza o ensaio em estufa de filme fino rotativo (RTFOT) para simular o envelhecimento do ligante asfáltico a curto prazo e posteriormente utiliza um vaso de pressão de envelhecimento (PAV – *Pressure Aging Vessel*) com o propósito de simular o envelhecimento durante a vida em serviço do pavimento. São preconizados na norma ASTM D 6521 (2013) os procedimentos de ensaio para simular o envelhecimento a longo prazo com o vaso de pressão (READ e WHITEOAK, 2003).

Roberts *et al.* (1996), sugeriu diversos fatores adicionais para o envelhecimento dos asfaltos: efeitos da luz, água, reações químicas com os agregados, deterioração microbiológica e absorção dos componentes pesados do asfalto na superfície dos agregados.

O endurecimento oxidativo é considerado como a principal causa do envelhecimento dos asfaltos, embora o envelhecimento devido à evaporação dos componentes mais voláteis dos betumes possa ser também bastante significativo. Essa oxidação ocorre com maior velocidade nas camadas superficiais, onde existe uma maior exposição à radiação solar e às demais condições climáticas que nos pavimentos asfálticos causa seu envelhecimento, que leva a um enrijecimento da mistura betuminosa. Com o passar do tempo, o asfalto se torna mais duro e quebradiço até chegar a um ponto em que é preciso fazer a recuperação do revestimento. O envelhecimento oxidativo durante o tempo de serviço de um revestimento asfáltico pode ser acelerado devido à influência de uma alta taxa de vazios da mistura, permitindo uma maior circulação de ar, água e luz.

2.2 FRESAGEM DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Regulamentado no Brasil pela norma DNIT 159/2011-ES, a fresagem de pavimentos asfálticos consiste no processo de corte de uma ou mais camadas de um pavimento por intermédio de processo mecânico a frio com a finalidade de remover pavimentos antes da execução de um novo revestimento. Efetuam-se cortes por movimento rotativo contínuo, elevando-se depois o material fresado para o caminhão basculante que irá efetuar o transporte do material para o local de destino onde posteriormente será reciclado, o que, tendo em conta os materiais envolvidos, é altamente benéfico para o ambiente.

A fresagem de pavimento tem como finalidade a remoção de pavimentos previamente à execução de novo revestimento asfáltico. É executada em áreas com ocorrência de remendos em mau estado, áreas adjacentes a panelas, rupturas plásticas e corrugações, áreas com grande concentração de trincas e outros defeitos. A fresagem do pavimento pode ser também a etapa preliminar para a reciclagem de pavimentos asfálticos. Os serviços que envolvem esta atividade abrangem o corte, desbaste, carga, transporte e descarga dos resíduos resultantes da operação de fresagem (DER/SP, 2006).

Na década de 1970, a retirada do revestimento asfáltico era realizada por escarificação e processamento em usinas. Porém esse método era inadequado, pois resultava em blocos muito grandes, que precisavam ser quebrados, ou rebitados para utilização na mistura reciclada. Além disso, como se utilizavam equipamentos tipo ponteiras, a escarificação provocava a extração da camada betuminosa por completo, sendo um empecilho à extração de uma espessura pré-determinada em projeto. A fresagem do revestimento asfáltico, foi facilitada na segunda metade da década de 1970, quando foi desenvolvido o equipamento de fresagem simultaneamente na Europa e na América do Norte. Isto possibilitou a fresagem em diversas espessuras do revestimento, além de resultar num material fresado com granulometria adequada.

Em 1980 teve início a utilização do equipamento no Brasil, com uma fresadora de origem americana (Roto-Mill PR-525 da C.M.I na Via Anchieta, serviço prestado à DERSA - Desenvolvimento Rodoviário S. A. (BONFIM, 2001). Os primeiros serviços de fresagem urbana foram executados na cidade de São Paulo nos anos 1984/1985, e os primeiros testes de reciclagem em usinas do tipo Drum-Mixer em 1984. No ano de 2001, em Fortaleza foram realizadas as primeiras fresagens de vias na área urbana utilizando uma máquina fresadora.

Nos EUA, os materiais mais reciclados são as misturas asfálticas, com mais de 80 milhões de toneladas por ano. Isto representa aproximadamente duas vezes mais que o total dos quatro resíduos notadamente mais reciclados, que são papéis, vidros, plásticos e alumínio (40 milhões de toneladas por ano). Na Europa, a situação é muito variável, como exposto na Tabela 1. Na Alemanha e na Holanda, os princípios de reciclagem são considerados como um modo de vida há pelo menos 20 anos (EAPA, 2010).

Tabela 1 - Distribuição de toneladas anuais (em milhões de toneladas) no exterior, relativa à produção de misturas a quente, à disponibilidade de agregados fresados e sua utilização em novas misturas.

HMA	Alemanha	França	Itália	Holanda	Outros	Total
	55	40	35	10	180	320
RAP disponível	14	7	12	5	12	50
RAP utilizado em HMA	11	3	2	3	2	25
Taxa de RAP utilizado (%)	80	42	17	70	17	50

Fonte: EAPA, 2010.

2.2.1 Tipos de Fresagem de Pavimentos

Na aplicação destes tipos de reciclagem de pavimentos, em função da temperatura podem-se desenvolver de duas formas, um a frio e outro a quente.

- Na fresagem a frio, o processo é executado na temperatura ambiente, ocorrendo a quebra de parte dos agregados, o que proporciona uma possível alteração da curva granulométrica do material existente na pista.
- A fresagem a quente é executada efetuando-se o pré-aquecimento do revestimento, e posterior desbaste da camada, que oferece pouca resistência ao corte, devido ao aquecimento da estrutura. Não há alteração significativa da granulometria do material, pois o método causa apenas desagregação do revestimento betuminoso, o que permite realizar a mistura do material fresado com material novo, sem necessidade de processos adicionais de rebitagem.

2.2.1.1 Fresagem superficial

Denominada também de fresagem de regularização, corrige apenas defeitos superficiais no revestimento. O recapeamento não é obrigatório, pois a textura da pista pós fresagem permite rolamento de forma segura. Essa técnica pode ser empregada para corrigir defeitos tipo exsudação, deformação plástica e falta de aderência pneu-pavimento.

2.2.1.2 Fresagem rasa

Este processo normalmente é realizado com profundidades de corte em torno de 5cm. É aplicado, principalmente em vias urbanas na correção de defeitos funcionais e em remendos superficiais.

2.2.1.3 Fresagem profunda

Neste processo, o corte pode atingir além da camada de revestimento, também camada de base e até de sub-base do pavimento. Utiliza-se quando a via precisa da recomposição da estrutura do pavimento.

Em alguns casos, ela é feita em etapas para melhor se aproveitar o material resultante do processo.

2.3 RECICLAGEM DE REVESTIMENTOS ASFÁLTICOS

Dentro da área da engenharia Civil e no contexto da pavimentação, com o passar do tempo e com o aperfeiçoamento destas atividades, novas técnicas têm surgido com o fim de reduzir os impactos causados tanto pela construção e reabilitação quanto pela operação e/ou manutenção de rodovias. A reciclagem de pavimentos flexíveis tem se destacado entre elas a maneira de utilizar o mínimo de insumos virgens na produção de uma nova mistura asfáltica.

Segundo Bonfim (2014), a reciclagem de pavimentos é uma técnica consideravelmente antiga, e que consiste na transformação de um pavimento asfáltico que já tem cumprido com o seu período de vida útil em uma nova estrutura homogênea (nova mistura asfáltica com ou sem adição de agregados virgens e ligantes) adequadamente dimensionada para receber os diversos esforços de tráfego no novo ciclo de vida útil. A reciclagem de pavimentos, consiste na reutilização total ou parcial dos materiais existentes no revestimento, na base e/ou na sub-base, onde os materiais são novamente misturados (podendo ser estabilizados quimicamente ou não) e compactados. Dentro do processo construtivo está a desagregação de parte do pavimento flexível (antigo ou velho), sua

correção granulométrica, uma posterior adição de um aglomerante (cimento, cal, emulsão etc.), espalhamento e compactação.

Segundo Momm e Domingues (1995) apud Costa (2010), a reciclagem de pavimentos é a reutilização total ou parcial dos materiais existentes no revestimento, base e sub-base, onde os materiais são remisturados no estado em que se encontram, ou tratados por energia térmica e/ou aditivados com ligantes novos ou com agentes rejuvenescedores, com ou sem recomposição de sua granulometria. O princípio básico da reciclagem é fragmentar, triturar e retirar a camada antiga do pavimento e reutilizá-la combinando-a com materiais novos.

Segundo Araújo (2004), a reciclagem de pavimentos é indicada principalmente nos casos em que a avaliação estrutural e funcional apresente um grau de deterioração, representado pelas trincas, causando reflexão de trincas em recuperação convencional como o recapeamento, ou em situações onde há problema geométrico a ser corrigido, como a elevação do greide devido a sucessivos recapeamentos sem a remoção da camada do pavimento antigo. Apesar do consenso entre pesquisadores sobre o desempenho satisfatório de misturas recicladas, eles acreditam que é muito difícil controlar alguns parâmetros de fabricação como a granulometria, teor de betume, grau de oxidação do asfalto, índice de vazios e sua estabilidade quando da fabricação dessas misturas em campo. Várias técnicas têm sido desenvolvidas para restaurar pavimentos, porém as que contemplam a reciclagem das camadas do pavimento apresentam significativo crescimento. Nesta técnica atingem-se vários objetivos almejados no meio rodoviário, tais como: aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Dentro das principais vantagens da reciclagem estão: redução nos custos de construção, preservação de agregados e ligantes, preservação do meio ambiente, conservação de energia, homogeneização estrutural, readequação estrutural e uma rápida liberação da pista. A técnica de reciclagem tem como principal vantagem, um ganho ambiental e econômico substancial devido à recuperação de todos os constituintes da mistura asfáltica, minimizando o uso dos recursos minerais novos.

Segundo Zubaran (2011), uma das técnicas de reciclagem do revestimento consiste em rejuvenescer o ligante através da recomposição da fração maltênica que se transformou em asfaltenos, pela adição de maltenos ou agente rejuvenescedor. A adição, executada de forma adequada, reconduz o ligante asfáltico às características adequadas para a composição de uma mistura asfáltica.

Além dos diversos estudos apontarem a viabilidade técnica da reciclagem de pavimentos, outro aspecto importante é a questão do meio

ambiente, onde as distintas áreas de estudo e tecnologia mundial estão sendo sensibilizadas para a preservação dos recursos naturais. Com o desenvolvimento da técnica de reciclagem de pavimentos vários benefícios podem ser evidenciados, podendo-se citar os seguintes:

- Reutilização e conservação de recursos naturais;
- Preservação do meio ambiente;
- Conservação de energia;
- Redução do congestionamento de tráfego;
- Maior rapidez na execução;
- Economia de custos em relação ao método tradicional.

No contexto nacional, seu emprego começou a partir da década de 1980 e desde então muitas obras já foram executadas utilizando estes processos, mas ainda não se pode afirmar que é uma técnica comum e disseminada no meio da pavimentação brasileira. Na atualidade no Brasil a técnica de reciclagem de pavimentos vem se expandindo embora devagar, devido à insuficiente pesquisa e difusão da técnica e também, pode-se dizer, devido a certo receio pelo peso que tem o termo “Reciclado” já que muitas vezes ela traz consigo um conceito errado rotulado como velho, sem uso, que já não presta ou de má qualidade. Porém, a opção pela reciclagem tem sido feita prioritariamente com base no fator econômico.

Segundo Ramos (2009), na maioria das obras onde é aplicada está técnica não é realizado um estudo prévio capaz de selecionar a modalidade mais apropriada, segundo os critérios técnicos, econômico e ambiental.

Foi constatado depois do início dos anos 2000 o surgimento de um novo interesse relativo à reutilização dos materiais em geral, em particular das misturas asfálticas na reciclagem a quente em usina (BROSSEAUD, 2011).

O desenvolvimento da reciclagem é muito variável de um país para outro, e mesmo de uma região para outra. A reciclagem se desenvolveu mais rápido nas zonas francesas fortemente urbanizadas (PARIS, LYON E SERFASS, 2008).

Desde o ano 2000, as pesquisas realizadas pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) (atual IFSTTAR) têm concluído que a utilização de 10% de reciclados em uma mistura asfáltica com 5 a 7 cm como camada de revestimento não modifica significativamente as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Não existem limitações técnicas para a reutilização de material asfáltico fresado, dentro de limite

de 10%, não havendo a necessidade de se efetuar um novo estudo preliminar (SERFASS, 2008; MONÉRON E BAUDRU, 2000).

O princípio básico é que a mistura asfáltica reciclada com agregados deve satisfazer às mesmas especificações que a mistura nova, sendo preconizada no mesmo local. Os estudos preliminares de formulação, caracterização, dosagem são semelhantes aos das misturas novas. É possível se questionar sobre a capacidade de se reproduzir em laboratório a fase de preparação (tempo de secagem, aquecimento, estocagem) e de fabricação (tempo de mistura, energia) na usina de asfalto, dada a grande variabilidade dos materiais e dos meios de produção. Não há especificações particulares para as misturas asfálticas a quente com agregados e material fresado, qualquer que seja a taxa de reciclagem, o produto final terá o mesmo desempenho daquele de uma mistura nova. De maneira geral, no que diz respeito às recomendações e exigências para qualquer tipo de mistura asfáltica, a reciclagem a quente em usinas produziriam as misturas asfálticas conforme as especificações aplicáveis à mistura asfáltica nova correspondente. Quanto ao seu comportamento com o tempo, pode ser globalmente qualificado como satisfatório (BROSSEAUD, 2011).

As numerosas ações de pesquisa, especialmente na Europa, como também a difusão de conhecimentos, estão atualmente caminhando para melhor compreensão dos mecanismos mobilizados nas técnicas de reciclagem, das possibilidades de reciclagem múltiplas, das interações entre o ligante antigo e novo, a fim de aumentar a reciclagem, reduzindo os riscos de falhas, e aumentando a durabilidade dos pavimentos (DIRECT, PROJET LCPC OPTIMIRR ET CLEAN).

2.3.1 Tipos de Reciclagem

Bonfim (2007) apresenta uma classificação bem definida dos tipos de reciclagem que se mostra na Tabela 2.

A associação de reciclagem asfáltica dos Estados Unidos (*Asphalt Recycling and Reclaiming Association* – ARRA, 2009) define cinco categorias principais para os diferentes métodos de reciclagem: reciclagem a frio (*Cold recycling*); reciclagem a quente (*Hot recycling*); reciclagem a quente in situ (*Hot in-place recycling*); Reciclagem a frio in situ (*Cold in-place recycling*); reciclagem profunda (*Full depth reclamation*).

Tabela 2 - Classificação dos processos de reciclagem de pavimentos.

Critério	Condição	Descrição
Quanto à geometria original	Sem modificação	Quando se mantém as cotas do greide
	Com modificação	Quando não se mantém as cotas do greide
Quanto ao local de processamento	Em usina	Fixa ou móvel, quente ou frio
	In situ	Quente ou frio
	Mista	In situ da reciclagem da base e aplicação de reciclagem a quente processada em usina com material fresado
Quanto à fresagem do material	A frio	Realizada na temperatura ambiente
	A quente	Com pré-aquecimento do pavimento
Quanto à profundidade de corte	Superficial	Somente da camada de revestimento
	Profunda	Camada de revestimento, base e até sub-base
Quanto à mistura reciclada	Mistura a quente	PMF
	Mistura a frio	CBUQ, PMQ
Quanto ao uso da mistura	Como base reciclada	
	Como camada de ligação	
	Como revestimento	
Quanto aos materiais adicionados	Agregados	Correção granulométrica
	Cimento Portland e Cal	Aumento da capacidade estrutural
	Emulsão especial e CAP	Rejuvenescimento
	Misturas asfálticas	Adição de material fresado

Fonte: Adaptado de Bonfim, 2007.

Dentre estes processos de reciclagem de revestimentos asfálticos, pode-se citar dois tipos de reciclagem para material resultante do processo de fresagem: no primeiro, o material recebe uma nova dosagem de asfalto ou agente rejuvenescedor (AR) in loco e é aplicado imediatamente. No segundo, o material entra na composição de misturas asfálticas a quente juntamente com os agregados novos, em uma proporção adequada.

A reciclagem pode ser realizada a frio ou a quente. Na técnica a quente o material fresado é transportado até a usina de asfalto móvel ou estacionária, onde é realizada a reciclagem com adição de novos agregados, material de enchimento, cimento asfáltico de petróleo (CAP) e, caso necessário um agente rejuvenescedor (AR) como um todo de uma nova camada de revestimento.

A técnica de reciclagem a quente também pode ser executada *in situ*, através de recicladoras e equipamentos que aquecem a superfície do revestimento permitindo a sua reciclagem. Esta técnica é realizada pelo aquecimento da camada de rolamento através de aquecedores a base de infravermelho, fresagem a baixa rotação até a profundidade desejada. A reciclagem a quente em usina estacionária, com instalações fixas, ou *in situ*, obedece as especificações de serviço do DNIT, ES 033/2005 (usina estacionária) e ES 034/2005 (reciclagem *in situ*).

Segundo Costa (2010), a técnica de reciclagem a frio *in situ* consiste na fresagem com adição de agente de reciclagem na forma emulsionada, seguida da compactação e liberação ao tráfego. Este processo tem o custo baixo, quando comparado com um recapeamento convencional, além da vantagem de geralmente não utilizar agregado novo e atendendo a questões ambientais. A técnica de reciclagem a frio é bastante utilizada em países europeus, sendo a porcentagem de reaproveitamento do material fresado de cerca de 90%.

De acordo com o DNIT (2006), a experiência mostra que a reciclagem a frio para restauração de pavimentos apresenta-se mais eficiente em rodovias de baixo volume de tráfego (vicinais), em acostamentos defeituosos de rodovias principais e na utilização do material reciclado como base estabilizadora.

Segundo Ramos (2009), por volta do ano 2000 iniciou-se a técnica de reciclagem com espuma de asfalto, que é bastante semelhante à reciclagem a frio com emulsão, mas com a diferença de que o ligante a ser adicionado está na forma de espuma e que pode conter ou não agente de reciclagem.

2.4 CONHECIMENTOS PRELIMINARES PARA RECICLAGEM A QUENTE

Esta técnica consiste em misturar em uma condição a quente os componentes da mistura asfáltica, neste caso em específico o RAP, com os agregados virgens e um ligante asfáltico novo. Pode ser utilizado também um agente regenerador ou rejuvenescedor, conhecendo e dependendo das características do ligante antigo contido no RAP, as vezes, uma junção de aditivos.

Segundo Brosseau (2011), pode-se apresentar duas situações de reciclagem do RAP:

- A reciclagem ligada a grandes operações de fresagem de autopistas, vias expressas, pistas aeronáuticas, permitindo dispor

de uma boa homogeneidade do RAP, conduzindo a taxas de reciclagem em níveis elevados: de 30% a 50%, ou até 65%. Um estudo de laboratório é efetuado para avaliar o estado das misturas antigas, a taxa de reciclagem, o tipo e o teor de ligante a ser adicionado e se o desempenho mecânico da mistura final é adequado e condizente com os de misturas novas da mesma categoria.

- A reciclagem “corrente” no domínio da operação normal em uma usina de asfalto, ou seja utilizando o RAP de diferentes origens e idades (fresados de pequenos trechos ou ruas urbanas). Com a estocagem do RAP de origens diversas, há a necessidade de fazer uma amostragem representativa para estabelecer uma caracterização da granulometria e teor de ligante do RAP.

Brosseaud (2011) de maneira empírica, distingue três taxas de reciclagem:

- Fraca: $\leq 10\%$ (a mais frequente na França, sobre as centrais periféricas).
- Média: 10 a 25% (para os materiais, se fraca humidade em centrais adaptadas).
- Forte: $\geq 25\%$ de reciclados (caso da fresagem massivos).

Todas as taxas consideradas estarão sujeitas às limitações e características básicas do RAP.

A reciclagem a níveis elevados (50 a 70%) são viáveis somente com um estoque de misturas asfálticas recuperadas bem homogêneas e perfeitamente identificadas. A verificação de uma boa homogeneidade do RAP e da caracterização do ligante que contem é essencial e necessita de diversos controles (SERFASS, 2008).

2.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO E REOLÓGICO DE MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO

O concreto asfáltico é utilizado na pavimentação de estradas, constituído de ligante asfáltico, agregados minerais e, eventualmente, aditivos. O ligante asfáltico desempenha a função de aglutinante, estabelecendo ligação entre as partículas minerais, culminando na formação de uma mistura homogênea. Portanto, o comportamento apresentado pela mistura é afetado tanto pelas propriedades de seus componentes individuais, quanto pela relação entre eles.

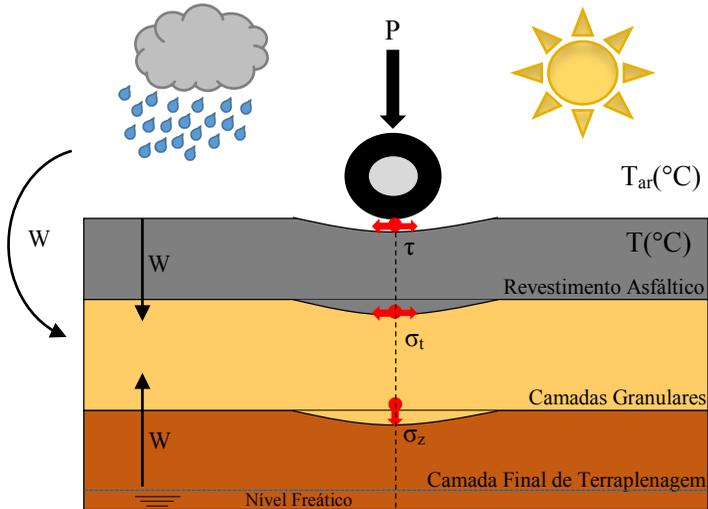
Em virtude da presença do cimento asfáltico em sua constituição, as misturas de concreto asfáltico demonstram comportamento viscoelástico e termosuscetível, sofrendo influencia, portanto, de diversas variáveis.

2.5.1 Solicitações em Camadas de Concreto Asfáltico

O pavimento é constituído por uma estrutura estratificada em múltiplas camadas de espessuras finitas, assentes sobre uma camada semi-infinita de suporte, denominada camada final de terraplenagem. Essa estrutura tem como função resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e dos efeitos do fator climático, proporcionando condições de segurança, conforto e economia aos usuários.

A cada passagem de um veículo, o pavimento é solicitado pela imposição da carga oriunda do mesmo, originando tensões que conduzirão ao desgaste dos seus materiais constituintes e à conseqüente redução de sua qualidade. Assim, um pavimento está sujeito à deterioração cumulativa ao longo do seu período de vida. A representação da Figura 1 expõe a ação climática, as solicitações impostas pelo tráfego e as tensões decorrentes da carga de roda.

Figura 1 - Solicitações do tráfego e ação climática na estrutura de um pavimento flexível.



Fonte: Adaptado de Branco *et al* (2005) *apud* Fontes (2009).

Analisando, nota-se a ação dos agentes atmosféricos, culminando no aumento da temperatura do revestimento asfáltico e na entrada de água nas camadas granulares do pavimento. As solicitações decorrentes do tráfego submetem o revestimento asfáltico à flexão, gerando esforços de tração (σ) em suas fibras inferiores, responsáveis pelo trincamento por fadiga. Além disso, a camada de concreto asfáltico ainda está sujeita a tensões tangenciais (τ) em sua superfície, a contrações e expansões térmicas e a esforços de cisalhamento e compressão, ligados à formação de deformações permanentes por densificação e deformação plástica.

2.5.2 Mecanismos de Degradação de Camadas de Concreto Asfáltico

Considerando-se o comportamento viscoelástico e termossuscetível das misturas de concreto asfáltico, a modelagem analítica de pavimentos flexíveis deve considerar dois principais aspectos em relação às propriedades do material: as características de tensão-deformação e as características de desempenho dos materiais, ligadas aos mecanismos de falha do concreto asfáltico. Os dois principais modos de degradação estrutural dos revestimentos asfálticos, vinculados ao desempenho desse material, são: trincamento por fadiga e deformação permanente (READ E WHITEOAK, 2003).

Segundo Kim (2009), diversos fatores afetam o comportamento tensão-deformação e a performance do concreto asfáltico, como o tempo, a temperatura, o estado de tensão, o modo de carregamento, o envelhecimento e a umidade.

Sendo assim, o entendimento do comportamento das misturas de concreto asfáltico, bem como as alterações desse comportamento com o tempo, tem como diretrizes quatro pontos fundamentais (DI BENEDETTO *et al.*, 2008):

- A rigidez e a evolução da rigidez com o tempo;
- A fadiga e a lei da evolução do dano;
- A deformação permanente cumulativa;
- A iniciação, propagação e crescimento de microfissuras, atribuídas às baixas temperaturas.

Cada uma dessas propriedades ou mecanismos de degradação é evidenciada em um domínio de carregamento distinto e correspondendo a um tipo de comportamento específico das misturas asfálticas (DI BENEDETTO *et al.*, 2008).

2.5.3 Rigidez do Concreto Asfáltico

Segundo Kim (2009), a rigidez do concreto asfáltico é uma propriedade cuja precisa caracterização é considerada imprescindível para a predição de seu comportamento em estruturas de pavimento. Fundamentalmente, a rigidez (ou módulo) corresponde à inclinação da curva tensão-deformação do concreto asfáltico. Assim como qualquer propriedade do material, a rigidez independe do dispositivo de teste utilizado para sua determinação, bem como do tamanho ou da geometria da amostra submetida ao ensaio.

Diversos fatores influenciam na medida da rigidez do concreto asfáltico, em decorrência do complexo comportamento apresentado pelo material. A temperatura e as condições de carregamento (estático ou dinâmico e o nível de tensão aplicado) são fatores externos importantes na determinação da rigidez. Quanto aos principais fatores inerentes à mistura de concreto asfáltico, têm-se: a natureza, o teor e a idade do ligante asfáltico, a distribuição das partículas de agregados e o volume de vazios da mistura (READ E WHITEOAK, 2003; KIM, 2009). Nas seções a seguir, será discutido de que maneira esses fatores afetam a rigidez das misturas de concreto asfáltico.

2.5.3.1 Fatores Externos que Influenciam a Rigidez do Concreto Asfáltico

Segundo Kim (2009), a rigidez do concreto asfáltico é suscetível à temperatura e à taxa de deformação decorrente do carregamento. Para uma temperatura estabelecida, o concreto asfáltico irá deformar-se lentamente e permanentemente se a taxa de deformação for pequena. Para uma taxa de deformação maior, o concreto asfáltico se apresentará muito mais rígido e, conseqüentemente, estará sujeito à fratura. Da mesma forma, para uma taxa de deformação estabelecida, existe uma temperatura acima da qual o concreto asfáltico apresentará relaxamento suficientemente rápido a ponto de não acumular tensões na amostra.

De acordo com Read (1996), a rigidez do concreto asfáltico também é afetada pelo nível de tensão aplicado. Altos níveis de tensão resultam em menores valores de rigidez, enquanto baixos níveis de tensão culminam em maiores valores. Entretanto, a influência do nível de tensão aplicado é menos importante em comparação aos efeitos do tempo de carregamento e da temperatura.

Para carregamentos dinâmicos, a frequência de aplicação dos pulsos de carga é outro fator importante. Quanto maior a frequência de aplicação, menor é o tempo decorrido entre um pulso de carga e o subsequente (BERNUCCI *et al.*, 2010).

2.5.3.2 Fatores Inerentes ao Concreto Asfáltico de petróleo que influenciam a Rigidez

Em virtude da presença de ligante na constituição do concreto asfáltico, esse material herda a capacidade de envelhecimento do CAP. Devido à exposição ao ar, a altas temperaturas e à radiação solar, o concreto asfáltico tem sua rigidez amplificada, bem como sua susceptibilidade de ruptura frágil (KIM, 2009).

A consistência do ligante asfáltico está intimamente ligada à rigidez da mistura: quanto mais consistente, mais rígido será o concreto asfáltico. Tratando-se do teor de ligante, o aumento do mesmo até um teor ótimo proporciona maior compacidade da mistura, e há uma tendência de incremento no valor do módulo. Para teores de ligante acima do valor ótimo, a rigidez do concreto asfáltico tende a diminuir (FONTES, 2009).

No que se refere à influência dos agregados minerais na rigidez do concreto asfáltico, essa propriedade passa a apresentar caráter anisotrópico, em decorrência da orientação preferencial das partículas de agregado, assim como da distribuição não aleatória dos vazios (CHEN, PAN E HUANG, 2011).

Os vazios de ar quando pequenos em volume e dispersos adequadamente, providenciam benefícios à mistura de concreto asfáltico, pois agem como inibidores da propagação de microfissuras e permitem que o asfalto expanda quando submetido a altas temperaturas (KIM, 2009).

Os agregados finos da mistura de concreto asfáltico compõem o mástique, em conjunto com o ligante asfáltico, e correspondem às partículas menores que 0,075mm. A rigidez da mistura é substancialmente afetada pela qualidade da interação entre os finos e o ligante asfáltico, pelo tamanho dessas partículas, pela dispersão das mesmas no mástique e pela compatibilidade de sua energia superficial com o asfalto na presença ou não da água (KIM, 2009).

2.5.3.3 Módulo Complexo do Concreto Asfáltico e Fundamentos de Viscoelasticidade Linear

Segundo Fontes (2009), Melo (2014) e Marcon (2016), as misturas de concreto asfáltico apresentam comportamento tanto elástico quanto viscoso em resposta aos carregamentos impostos. A proporção de cada uma dessas parcelas depende do tempo de carregamento e da temperatura na qual o carregamento é aplicado. Para condições de curtos tempos de carregamento ou de baixas temperaturas, o comportamento relativo à parcela elástica é predominante. Entretanto, para condições de longos tempos de carregamento ou de altas temperaturas, o comportamento viscoso torna-se mais pronunciado. Tendo em vista todas as variáveis que podem influenciar a resposta do concreto asfáltico a um carregamento, o módulo complexo é um parâmetro de rigidez que permite contabilizar os efeitos causados pela temperatura e pela frequência do carregamento aplicado, bem como considerar o comportamento viscoelástico do material por meio da análise de suas componentes elástica e viscosa.

No entanto, a avaliação do módulo complexo requer que o procedimento de ensaio seja realizado sob o domínio das pequenas deformações, no qual se valida a hipótese do comportamento viscoelástico linear do concreto asfáltico. Por conseguinte, a relação tensão-deformação demonstrada pelo material torna-se linear. Para níveis de deformação elevados, o concreto asfáltico pode apresentar comportamento não linear, invalidando a proporcionalidade entre tensão e deformação e descaracterizando o conceito de módulo complexo (BAHIA *et al.*, 1999).

O módulo complexo E^* é um número complexo definido como a relação entre a amplitude complexa da tensão sinusoidal, aplicada no material com uma pulsação (ou velocidade angular) ω , e a amplitude complexa da deformação sinusoidal, resultante do carregamento. Devido ao comportamento viscoelástico do material, a deformação (resposta do material) sofre uma defasagem em relação à tensão aplicada. Essa defasagem, por sua vez, é representada pelo ângulo de fase (δ), cujo valor fornece informações quanto à predominância elástica ou viscosa do concreto asfáltico. Dada essa definição, o módulo complexo não é diretamente dependente do tempo, mas sim da pulsação ω , correspondente à frequência de carregamento (f), para uma determinada temperatura. Por meio da matemática complexa, pode-se expressar a tensão aplicada, a deformação resultante e o módulo complexo conforme

as equações 1, 2, 3 e 4 respectivamente. A velocidade angular é relacionada à frequência (DI BENEDETTO *et al.*, 2001).

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (1)$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)} \quad (2)$$

$$\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = E^*(i\omega) = \left(\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*}\right) e^{i\delta} = E_1 + iE_2 \quad (3)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

onde:

σ_0 = amplitude da tensão aplicada;

ε_0 = amplitude da deformação;

ω = velocidade angular;

i = número imaginário;

δ = ângulo de fase;

f = frequência.

No plano complexo, a parcela real do módulo complexo $E^*(i\omega)$ é denominada módulo de armazenamento ou módulo elástico (E_1), enquanto que a parcela imaginária é chamada de módulo de perda ou módulo viscoso (E_2). Para um material puramente elástico, o ângulo de fase δ tem valor igual a 0° e para um material puramente viscoso, o ângulo de fase δ tem valor igual a 90° . A relação entre as amplitudes de tensão e deformação definem o valor absoluto do módulo complexo, nomeado de módulo dinâmico $|E^*|$, da maneira apresentada na seguinte Equação 5.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (5)$$

Assim, o módulo de armazenamento E_1 e o módulo de perda E_2 podem ser expressos em função do ângulo de fase δ , de acordo com as seguintes equações 6 e 7. Na Figura 2, o comportamento viscoelástico é representado sob a atuação de um carregamento cíclico, envolvendo as variáveis analisadas no ensaio de módulo complexo.

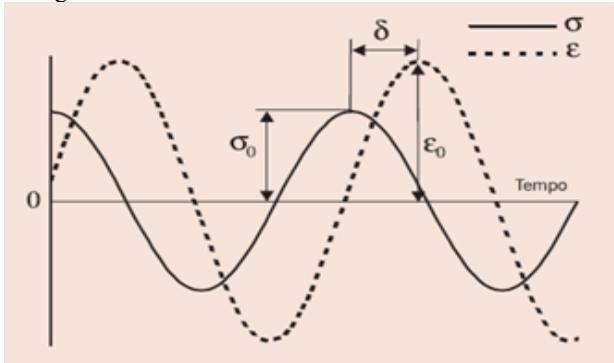
$$E_1 = \frac{\sigma_0 \cos \delta}{\varepsilon_0} \quad (6)$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0 \sin \delta}{\varepsilon_0} \quad (7)$$

O plano complexo, também conhecido como plano Cole-Cole, pode ser utilizado para avaliar as componentes do módulo complexo. No

plano complexo, o módulo de armazenamento (E1) é plotado no eixo das abcissas (eixo real), enquanto que o módulo de perda (E2) é plotado no eixo das ordenadas (eixo imaginário). Os valores de módulo complexo plotados em um plano complexo devem formar uma curva única, independente da frequência e da temperatura (KIM, 2009).

Figura 2 - Desenho esquemático do comportamento viscoelástico sob carregamento harmônico.



Fonte: Bernucci *et al.* (2010).

No espaço de Black, os valores de módulo dinâmico são plotados em escala logarítmica, enquanto que os valores de ângulo de fase são plotados em escala aritmética. Da mesma forma que o plano complexo, o espaço de Black mostra a relação entre o módulo complexo e o ângulo de fase, independente da frequência e da temperatura. A construção desse diagrama permite também a estimativa da componente puramente elástica do módulo complexo, para temperaturas baixas (KIM, 2009).

Sendo o comportamento viscoelástico e termossuscetível apresentado pelo concreto asfáltico dependente da frequência de aplicação do carregamento e da temperatura, para se obter uma caracterização completa do material, ensaios de rigidez devem ser realizados em um amplo espectro de frequências e temperaturas. Contudo, limitações dos equipamentos, aliadas aos longos períodos de ensaio podem inviabilizar essa tarefa. Nesse âmbito, o princípio da superposição tempo-temperatura propicia grande contribuição, reduzindo consideravelmente os tempos de ensaio (HOU, 2009).

Conforme o princípio da superposição, valores semelhantes de rigidez podem ser obtidos a partir de ensaios a baixas temperaturas e altas frequências ou a partir de altas temperaturas e baixas frequências. Em síntese, os efeitos do tempo e da temperatura podem ser combinados em

um único parâmetro. Esse processo permite que valores de módulo a diferentes temperaturas sejam deslocados horizontalmente para uma temperatura de referência, resultando na construção de uma curva mestra (master curve) (HOU, 2009; WOLDEKIDAN, 2011).

No domínio das frequências, a frequência deslocada é denominada frequência reduzida (fred), podendo ser calculada pela multiplicação da frequência original por um fator de translação. Matematicamente, o princípio da superposição tempo-temperatura é fundamentado conforme as Equações 8 e 9.

$$E(f, T) = E(f_{red}, T_{ref}) \quad (8)$$

$$f_{red} = f \times a_T \quad (9)$$

onde:

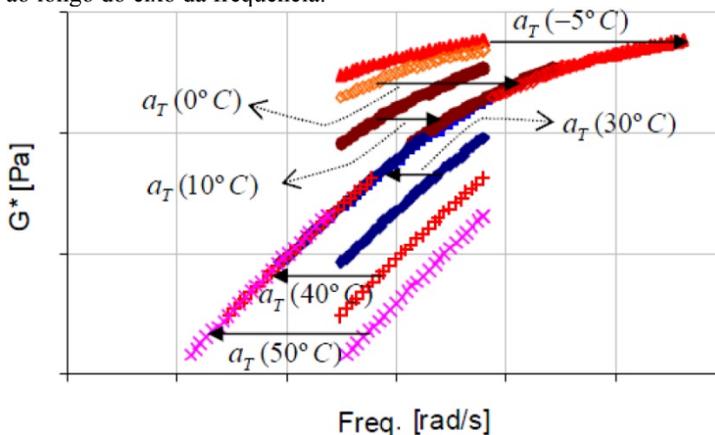
f_{red} = Frequência reduzida;

T_{ref} = Temperatura de referência;

a_T = Fator de translação horizontal para a temperatura T.

A Figura 3 ilustra, graficamente, o princípio da superposição tempo-temperatura, aplicado no domínio das frequências.

Figura 3 - Exemplo de valores de módulo dinâmico de cisalhamento, deslocados ao longo do eixo da frequência.



Fonte: Woldekidan (2009) *apud* Melo (2014).

Um material cujo comportamento viscoelástico é descrito por uma curva mestra que obedece ao princípio da superposição tempo-

temperatura é considerado um material termorreologicamente simples. No entanto, além da translação horizontal, alguns materiais necessitam de uma translação vertical. Esses materiais são definidos como termorreologicamente complexos. Para níveis de carregamento reduzidos, o concreto asfáltico é geralmente considerado um material termorreologicamente simples. Todavia, para elevados níveis de carregamento, os materiais asfálticos podem apresentar comportamento termorreologicamente complexo (MEDANI, 2006).

O fator de translação utilizado no princípio da superposição tempo-temperatura é uma propriedade básica do material. Isso implica que o mesmo fator continua a ser aplicável para todas as diversas propriedades viscoelásticas do material, como o módulo de cisalhamento. Na literatura, são propostos diversos modelos para a obtenção do fator de translação. Os modelos mais conhecidos são: o modelo de Arrhenius e o modelo de Williams-Landel-Ferry, apresentados, respectivamente, pelas Equações 10 e 11 (WOLDEKIDAN, 2011).

$$\text{Log } a_T = \frac{-E_a}{2,303R} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right] \quad (10)$$

onde:

a_T = Fator de translação para uma dada temperatura T;

E_a = Energia de Ativação [J/mol];

R = Constante Universal dos Gases Perfeitos [J/mol/K];

T_{ref} = Temperatura de referência [K].

$$\text{Log } a_T = \frac{C_1(T-T_{ref})}{C_2+T-T_{ref}} \quad (11)$$

onde:

a_T = Fator de translação para uma dada temperatura T;

C_1, C_2 = Parâmetros do modelo;

T_{ref} = Temperatura de referência [K].

Para materiais termorreologicamente complexos, a mudança na temperatura não pode mais ser modelada por meio de um fator de translação horizontal. Por isso, Ferry introduziu um fator de translação vertical (bT), aplicado a um módulo reduzido (EP), previamente corrigido pelo fator de translação horizontal (aT). A formulação geral desse princípio é demonstrada na Equação 12 (WOLDEKIDAN, 2011).

$$E(f, T) = b_T E_P(f \times a_T, T_{ref}) \quad (12)$$

onde:

b_T = Fator de translação vertical para uma dada temperatura T;

a_T = Fator de translação para uma dada temperatura T;

E_P = Módulo reduzido, corrigido pelo fator de translação horizontal;

T_{ref} = Temperatura de referência [K].

2.5.4 Resistência à deformação permanente de misturas de concreto asfáltico

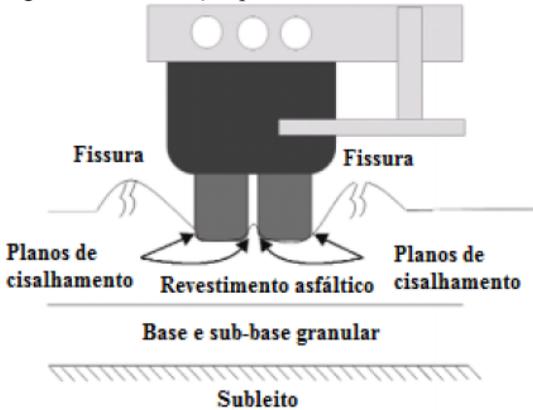
A composição A deformação permanente excessiva é um defeito comum na pavimentação asfáltica, principalmente para pavimentos de concreto asfáltico submetidos à tráfego pesado. A deformação permanente progride com o crescente número de solicitações e se manifesta sob a forma de depressões longitudinais nas trilhas de roda. Os afundamentos causados pela deformação permanente em uma rodovia afetam negativamente a segurança dos usuários, pois, além de dificultar o controle dos veículos, podem levar à ocorrência de hidroplanagem (SOUSA *et al.*, 1994).

A deformação permanente pode ser atribuída ao revestimento asfáltico, às camadas subjacentes ou pode ser uma combinação de efeitos. Tratando especificamente da deformação permanente das misturas asfálticas, esse mecanismo de degradação é causado por uma combinação de densificação e de deformação por cisalhamento, proveniente da aplicação repetitiva de carregamentos decorrentes do tráfego. Essa situação é agravada em regiões mais quentes, onde a temperatura do revestimento atinge níveis elevados. Para pavimentos construídos adequadamente, as deformações por cisalhamento, resultantes de altos níveis de tensão de cisalhamento nas regiões superficiais das camadas de revestimento, são consideradas dominantes (SOUSA *et al.*, 1994). Na Figura 4 é ilustrada, esquematicamente, a ocorrência de deformação permanente em um revestimento asfáltico.

De acordo com Long (2001), sendo o concreto asfáltico uma composição de ligante, agregados e vazios, o comportamento frente à deformação permanente é diretamente influenciado pelo ligante asfáltico e pelos agregados minerais, bem como pela proporção relativa entre mesmos na mistura. Em relação ao ligante asfáltico, quanto maior a sua rigidez e quanto menor a sua susceptibilidade térmica, melhor será o seu desempenho frente à deformação permanente a altas temperaturas. Quanto ao agregado mineral, quanto mais irregular for a sua textura

superficial e quanto mais angular for a forma de sua partícula, maior será a resistência à deformação permanente da mistura.

Figura 4 - Deformação permanente no revestimento asfáltico.



Fonte: *Federation of Canadian Municipalities and Canadian National Research Council* (2003).

De acordo com Long (2001), sendo o concreto asfáltico uma composição de ligante, agregados e vazios, o comportamento frente à deformação permanente é diretamente influenciado pelo ligante asfáltico e pelos agregados minerais, bem como pela proporção relativa entre mesmos na mistura. Em relação ao ligante asfáltico, quanto maior a sua rigidez e quanto menor a sua susceptibilidade térmica, melhor será o seu desempenho frente à deformação permanente a altas temperaturas. Quanto ao agregado mineral, quanto mais irregular for a sua textura superficial e quanto mais angular for a forma de sua partícula, maior será a resistência à deformação permanente da mistura.

As formulações das misturas asfálticas também são determinantes para o comportamento frente à deformação permanente. À medida que se aumenta o teor de ligante, a mistura asfáltica se torna mais suscetível à deformação permanente. Entretanto, teores insuficientes de ligante comprometem a trabalhabilidade das misturas, dificultando a compactação e resultando em um alto volume de vazios. Em síntese, uma mistura asfáltica resistente à deformação permanente deve conter um teor de ligante reduzido, a ponto de ainda garantir a trabalhabilidade da mistura, a durabilidade e a resistência à fadiga. A mistura deve conter, também, um baixo volume de vazios, mas não abaixo de 3%.

Segundo Read e Whiteoak (2003), para determinar as características relacionadas à deformação permanente das misturas asfálticas, devem ser analisadas situações em que o concreto asfáltico apresente baixa rigidez, como sob condições de altas temperaturas ou longos períodos de carregamento. Quando a rigidez do ligante asfáltico for menor que 0,5 MPa, o comportamento da mistura é muito mais complexo do que na região de elasticidade. Tendo em vista essas condições, a rigidez do concreto asfáltico não depende somente da rigidez do ligante asfáltico e da volumetria da mistura, mas sim de diversos fatores, como a distribuição granulométrica, a morfologia e a textura do agregado, o grau de intertravamento entre as partículas de agregados e o grau de compactação da mistura.

2.5.5 Resistência à fadiga de misturas de concreto asfáltico

A resistência à fadiga de uma mistura asfáltica é a habilidade de suportar à flexão repetidamente, sem que o material sofra ruptura. A fadiga consiste em um mecanismo de degradação comum de pavimentos de concreto asfáltico, manifestando-se na forma de trincamento devido ao carregamento repetitivo proveniente do tráfego. Em decorrência do tráfego, a camada de concreto asfáltico é repetidamente submetida à flexão, resultando assim deformações de tração em sua face inferior.

Segundo Tayebali (1994), a medida das características inerentes à fadiga para misturas asfálticas específicas, englobando uma gama de condições ambientais e de tráfego, é imprescindível para que considerações quanto a esse mecanismo de degradação possam ser incorporadas no processo de dimensionamento de pavimentos de concreto asfáltico. As características de fadiga das misturas asfálticas são geralmente expressas como relações entre o valor inicial de tensão ou deformação e o número de repetições de carregamento até a falha do material. As relações assumem formas conforme a equação 13 (TAYEBALI *et al.*, 1994).

$$N_f = a \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \right)^b \left(\frac{1}{E_0} \right)^c \quad (13)$$

onde:

N_f = Vida de fadiga;

ε_0 = Deformação específica de tração;

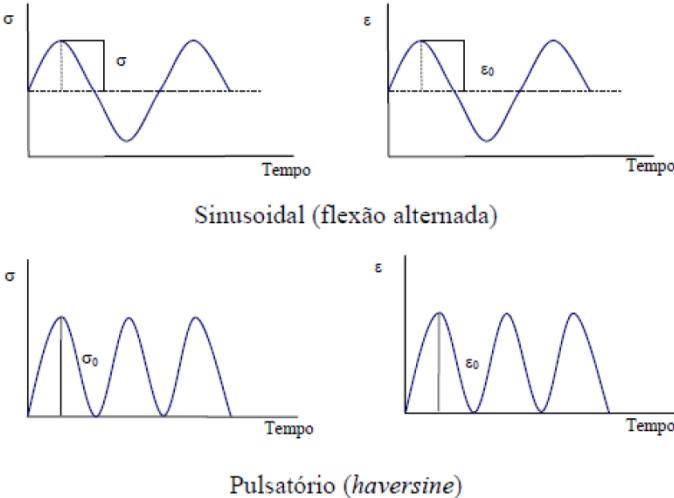
E_0 = Rigidez inicial do concreto asfáltico;

a, b, c = Coeficientes determinados experimentalmente.

Monismith (1963), Tangella *et al.* (1990) e Tayebali (1994), fundamentados em ensaios laboratoriais, estabeleceram diversos modelos para prever a vida de fadiga dos pavimentos. No desenvolvimento desses modelos, resultados de laboratório foram calibrados, utilizando fatores campo-laboratório, baseados em observações no campo. Essas análises fornecem estimativas razoáveis do ciclo de vida em serviço dos pavimentos, em função da limitação da severidade de trincamento proveniente do carregamento repetitivo. No entanto, diversas variáveis influenciam no comportamento à fadiga das misturas asfálticas, restringindo o uso de modelos consolidados na literatura. Os principais fatores que afetam o comportamento à fadiga do concreto asfáltico são descritos a seguir:

- Os ensaios de fadiga podem ser realizados a partir de diversos padrões de pulso de carga. Esse fator influencia no período de descanso e consequente relaxamento de tensões das misturas asfálticas. Os tipos de pulso de carga mais utilizados na caracterização do comportamento à fadiga de misturas asfálticas correspondem ao sinusoidal e o haversine, ilustrados Figura 5.

Figura 5 - Formas de pulsos de carregamento utilizados em ensaios de fadiga.



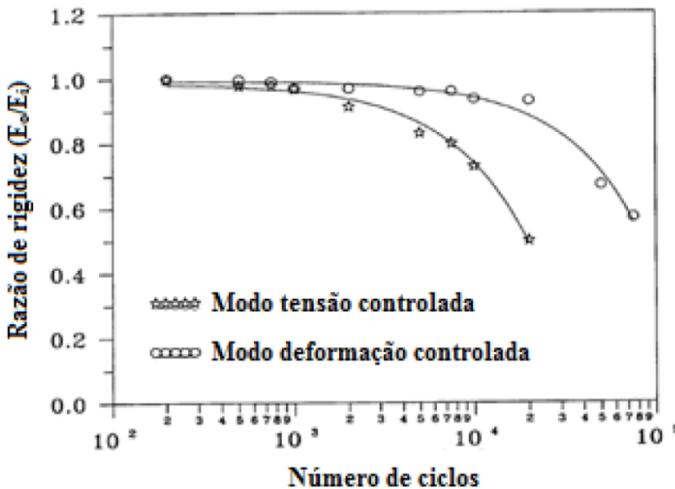
Fonte: Adaptado de Said (1988 apud FONTES, 2009).

- O período de descanso do pulso de carga de forma sinusoidal permite a relaxação de tensões, semelhante às condições de

carregamento em decorrência do tráfego em revestimentos asfálticos em serviço.

- O modo de carregamento é um fator crítico no que diz respeito ao comportamento à fadiga das misturas asfálticas. Isso porque os efeitos relacionados à mistura são diferentes entre os modos de carregamento à tensão controlada e à deformação controlada. O efeito do modo de carregamento está mais atrelado às diferenças nas taxas de propagação de trincas do que às diferenças no tempo para a iniciação das trincas. Nesse sentido, a vida de fadiga é dependente da condição de modo de carregamento. Para o modo de tensão controlada, a falha é definida, tendo em vista que as amostras atingem evidentemente a ruptura, devido ao aparecimento de notáveis fissuras no material. Para o modo deformação controlada, a falha não é aparente. Nesse modo, considera-se que a amostra atingiu a falha a partir do critério de redução de sua rigidez inicial em 50%. Para condições iniciais de ensaio semelhantes, a vida de fadiga é tipicamente maior quando sob deformação controlada, em relação ao modo tensão controlada, visualizado na Figura 6.

Figura 6 - Relação entre rigidez inicial e rigidez no ciclo "i" (E_0/E_i) x número de ciclos, para os dois modos distintos de carregamento.



Fonte: Tayebali *et al.* (1994).

- Em geral, a vida de fadiga sob deformação controlada é, aproximadamente, 2,4 vezes maior. Além disso, misturas asfálticas de maior rigidez tendem a apresentar melhor desempenho no modo tensão controlada, ao contrário do que é observado no modo deformação controlada. O modo deformação controlada é mais propício para avaliar o desempenho de concretos asfálticos relativos a camadas finas de revestimento, assentes em rígidas camadas subjacentes. O modo tensão controlada é mais apropriado para a avaliação de camadas mais espessas e rígidas de revestimento asfáltico.

A Tabela 3 apresenta uma comparação entre o modo deformação controlada e tensão controlada.

Tabela 3 - Análise comparativa entre os modos de carregamento tensão controlada e deformação controlada.

Variáveis	Tensão Controlada	Deformação Controlada
Espessura comparativa da camada de concreto asfáltico	Camadas espessas	Camadas finas < 3"
Definição da falha	Bem definida, o corpo de prova sofre fratura	Arbitrária, o ensaio é encerrado quando o carregamento é reduzido à uma proporção em relação ao valor inicial
Dispersão dos resultados	Menos disperso	Mais disperso
Número de corpos de prova necessários	Menor	Maior
Simulação da influência do envelhecimento	Envelhecimento leva a maior rigidez e maior vida de fadiga	Envelhecimento leva a maior rigidez e menor vida de fadiga
Magnitude da vida de fadiga	Geralmente menor magnitude	Geralmente maior magnitude
Efeito das variáveis das misturas	Mais sensível	Menos sensível
Taxa de dissipação de energia	Maior	Menor
Taxa de propagação de fissuras	Maior do que ocorre em campo	Mais representativa das condições de campo
Efeito benéfico de períodos de repouso	Efeito benéfico maior	Efeito benéfico menor

Fonte: Tayebali *et al.* (1994).

- O volume de vazios e a natureza do ligante asfáltico influenciam significativamente a vida de fadiga das misturas asfálticas. Para um dado tipo de ligante asfáltico, a redução da rigidez proveniente do aumento do volume de vazios conduzirá à redução da vida de fadiga. No entanto, para um volume de vazios constante, a redução da rigidez em virtude da mudança do tipo de ligante asfáltico irá resultar em um aumento da vida de fadiga.
- A temperatura e o nível aplicado de tensão ou deformação também afetam a vida de fadiga do concreto asfáltico. Para o modo tensão controlada, a diminuição da temperatura conduz a um valor maior de vida de fadiga, em função do aumento da rigidez do material. Contudo, para o modo deformação controlada, a vida de fadiga sofre redução com a diminuição da temperatura. Quanto ao nível de tensão ou deformação aplicado, a vida de fadiga decresce com o aumento desse parâmetro.

Segundo Shen e Carpenter (2007), como alternativa ao critério de ruptura vinculado à redução de 50% no valor do módulo de rigidez inicial, para ensaios de vida de fadiga à deformação controlada, diversos pesquisadores utilizaram a abordagem da energia dissipada. Quando um material é submetido a um carregamento externo, a área sob a curva tensão-deformação representa a energia envolvida no processo de deformação. Para materiais viscoelásticos, os processos de carregamento e descarregamento estão associados à energia dissipada, visto que há uma defasagem entre a aplicação da tensão e a deformação resultante. Esse fenômeno é denominado histerese, e a área dentro do ciclo de histerese para o processo de carregamento e descarregamento indica a quantidade de energia dissipada para um ciclo de carregamento. Essa abordagem pode ser utilizada para prever o comportamento à fadiga do concreto asfáltico. Contudo, depende consideravelmente dos materiais empregados e deve ser específica para cada mistura, a fim de ser aplicada. A relação entre a energia dissipada acumulada e o número de ciclos até a falha por fadiga do material é caracterizada na forma da equação 14.

$$W_N = A(N_f)^z \quad (14)$$

onde:

W_N = Energia dissipada acumulada até a falha por fadiga;

N_f = Número de ciclos de carregamento até a falha por fadiga;

A, z = Coeficientes determinados experimentalmente.

Segundo Tayebali *et al.* (1994), em um ensaio de fadiga realizado no modo de deformação controlada, a energia dissipada por ciclo decresce à medida que o número de repetições de carregamento aumenta. Já para o ensaio realizado no modo tensão controlada, a energia dissipada por ciclo aumenta com o número de repetições de carga. A energia dissipada acumulada até a falha à fadiga do material corresponde à área sob a curva entre a energia dissipada e o número de ciclos de repetição de carga.

Segundo Wu, Tsai e Harvey (2009), um dos ensaios mais utilizados para avaliar o comportamento à fadiga é o realizado por meio da flexão alternada de uma viga de concreto asfáltico a quatro pontos. Esse ensaio permite a medição da vida de fadiga, ou das características de deterioração da rigidez de misturas específicas de concreto asfáltico, em diversas condições ambientais e de carregamento. Uma das vantagens de utilizar o 4PBB (*Four-Point Bending Beam test*), é que o terço médio da viga é teoricamente submetido a um momento fletor puro, sem qualquer deformação proveniente de esforços cisalhantes e, por isso, a fratura do corpo de prova se dá exclusivamente pelo momento fletor, sem influência dos esforços cortantes.

2.6 COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM ADIÇÃO DE RAP

Vasconcelos e Soares (2003) estudaram a dosagem de uma mistura asfáltica do tipo concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), e de duas Misturas Asfálticas Recicladas à Quente (MARQ's) com 10% e 50% de material fresado, sendo todas com a mesma distribuição granulométrica. As misturas recicladas foram dosadas pela metodologia do Asphalt Institute, que é semelhante à metodologia Marshall, com adição da análise do material fresado. Os resultados dos ensaios mecânicos apontam que a utilização de material fresado em misturas asfálticas não compromete o comportamento mecânico das mesmas.

Lima (2003), no estudo sobre caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente, utilizando teores de 0%, 10%, 30% e 50% de RAP, descreve que o aumento do teor de fresado resulta em aumento da rigidez nas misturas. No que tange à resistência a tração por compressão diametral, os valores de RT com fresado são superiores aos valores de mistura convencional. Maiores teores de fresado dentro da mistura apresentaram maiores vida de fadiga. O autor também menciona que, trabalhos mostram que as misturas asfálticas com materiais reciclados têm apresentado um desempenho similar e, em alguns casos,

superior ao das misturas asfálticas convencionais, quando se comparam as suas propriedades mecânicas, além disso, permitem uma significativa diminuição no tempo de execução das obras de restauração de vias.

Soares e Vasconcelos (2004) estudando a Influência do percentual de fresado e do envelhecimento de curto prazo na dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente, concluem que a deformação das misturas com adição de RAP são equivalentes as misturas convencionais. As misturas estudadas apresentaram aumento do teor de ligante de projeto com o aumento do tempo de envelhecimento de curto prazo.

Balbo e Bodi (2004) obtiveram menores valores de módulo de resiliência (MR) para misturas com CAP modificado e valores mais elevados para misturas com fresado. A resistência à tração por compressão mostra valores muito superiores aqueles normalmente encontrados para misturas asfálticas convencionais.

Santana (2009) estudou misturas asfálticas (CBUQ) incorporando 10%, 30%, 50%, 75% e 100% de material fresado, de acordo com seus estudos as misturas recicladas que apresentaram propriedades físicas e mecânicas compatíveis com as especificações do DNIT e AASHTO, foram 10% e 30%, e estas continham 3% de filer (cal). Vale ressaltar, no entanto, que todas as misturas apresentaram valores de Resistência à Tração acima do mínimo exigido pelo DNIT, que é de 0,65 MPa. As misturas asfálticas com material reciclado têm mostrado um desempenho similar, e em alguns casos superiores as misturas asfálticas convencionais, quando se comparam as suas principais propriedades mecânicas (módulo de resiliência, resistência à tração e vida de fadiga).

SU *et al.* (2009), utilizando concreto asfáltico com 40% de RAP, numa mistura que estudaram, não apresentou performances melhores que misturas sem RAP e em misturas contendo 70% de RAP, estas exibiram resistência à tração significativamente maiores que a mistura controle. Entretanto, apresentaram alta rigidez indicando que a fadiga pode ser um problema em misturas com alta porcentagem de RAP e, por isso, não devem ser usadas em áreas de tráfego pesado.

Broseaud (2011) menciona que existem limitações técnicas e econômicas no uso de taxas elevadas de RAP em misturas asfálticas. Para o autor, a reciclagem a níveis elevados (50 a 70%) são viáveis somente com um estoque de misturas asfálticas recuperadas bem homogêneas e perfeitamente identificadas. A ausência de tecnologia de ponta faz com que o uso destas misturas com altos níveis de fresado seja destinado a permanecer excepcional, exceto em relação a autopistas e estradas de mesmas características.

Miró *et al.* (2011), utilizando taxas de 0%, 15%, 30%, 50% de RAP na pesquisa *Evaluation of high modulus mixture behaviour with high reclaimed asphalt pavement (RAP) percentages for sustainable road construction*, obtiveram os seguintes resultados:

- Níveis de deformação permanente de todas as misturas com RAP foram muito similares e menores que os de misturas sem RAP.
- Comportamento da resistência a fadiga muito parecido para todas as misturas, especialmente para teores de RAP até 30%, com valores de módulo dinâmico aumentando com o aumento do teor de RAP, enquanto o módulo de rigidez e a densidade tendem a diminuir.
- As misturas recicladas apresentaram boa resistência aos danos causados pela umidade, com valores mais altos do que os estabelecidos pelas especificações espanholas, embora diminua com o aumento do teor de RAP.
- Concluem que que não pré-aquecer o RAP pode impedir uma boa mistura entre o betume envelhecido e o novo, apesar da mistura atingir a temperatura de mistura esperada, é por isso que um máximo de 30% de RAP pode ser usado em usinas não adaptadas.

Valdés *et al.* (2011), na pesquisa *Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement RAP*, afirmam que o módulo de rigidez e a resistência à fadiga aumentam com o aumento do teor de RAP. O comportamento obtido foi parecido com o de mistura asfáltica de módulo elevado e valores acima dos de mistura convencional com ligante 60/70. A resistência a tração aumenta com o aumento do teor de RAP.

Nakamura (2011) menciona que a reciclagem do material fresado é uma alternativa que associa inovação e alta tecnologia para racionalizar gastos e evitar danos ao meio ambiente, adequando a recomposição do revestimento asfáltico ao conceito de sustentabilidade.

Colbert (2012), no estudo *The determination of mechanical performance of laboratory produced hot mix asphalt mixtures using controlled RAP and virgin aggregate size fractions* relata que misturas com alto teor (15% - 50%) de RAP são mais resistentes à deformação permanente. Os módulos dinâmicos e de resiliência diminuem com o aumento do teor de RAP.

Colbert (2012), em outro estudo *The properties of asphalt binder blended with variable quantities of recycled asphalt using short term and long term aging simulations*, utilizou nas suas misturas estudadas os teores de 30%, 70%, 50% e 100% de RAP. Encontrou que a rigidez do

ligante aumenta com o envelhecimento, Misturas com altos teores de RAP apresentam maior rigidez sob uma condição específica de envelhecimento. Altos teores de ligante do RAP aumentam significativamente a viscosidade dos ligantes resultantes, o que significa que as temperaturas de mistura e compactação aumentam com o teor de ligante do RAP.

Silva *et al.* (2012), na pesquisa *Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?*, mostram que:

- A resistência à deformação permanente da mistura estudada com adição de RAP apresentou resultados melhores que os de mistura a quente convencional.
- Os resultados para resistência a trincas e fadiga são melhores que os da mistura a quente convencional. No que tange a susceptibilidade à umidade, apresentou resultados melhores que os de mistura a quente convencional.
- O módulo de rigidez apresentou resultados melhores que os de mistura a quente convencional.
- Descobriram também que o rejuvenescedor reduz a temperatura de mistura (menor consumo energético).

Reyes e Berardinelli (2012), na pesquisa *Avaliação de misturas de asfalto a quente com substituição de agregados por material de pavimentação de asfalto recuperado*, chegam as seguintes conclusões:

- Os maiores valores de módulo resiliente em condições secas e úmidas foram obtidos para amostras de laboratório fabricadas com substituição de material granular por RAP, independentemente do tipo de asfalto usado na mistura. Os resultados mostram o efeito potencial do asfalto envelhecido (aglutinante de asfalto mais rígido em comparação com o utilizado para fabricar as novas misturas) contidos no RAP sobre a resposta mecânica das misturas recicladas.
- A substituição por RAP do material granulado na fração que passa a peneira # 10 e retida na peneira # 40 exibiu as condições mais desfavoráveis, independentemente da condição de teste (isto é, seca ou molhada), tipo de asfalto e testes realizados. Portanto, a substituição por RAP da fração de agregado mencionada foi identificada como crítica para a resposta mecânica das misturas avaliadas. Este aspecto pode estar relacionado à falta de atrito entre os agregados do RAP e / ou a existência de aglutinante de asfalto livre na mistura devido à falta de vazios de ar na fração do RAP.

- Para todas as misturas testadas com várias porcentagens de substituição de material granular por RAP, foi relatada uma baixa susceptibilidade ao dano de umidade conforme avaliado em termos dos valores RTS. Todos os valores de RTS relatados foram superiores a 80%. Maiores valores de Resistência à tração indireta (em condições secas e úmidas) foram relatados para misturas fabricadas com asfalto 60/70 em comparação com as determinadas para as misturas fabricadas com asfalto 80/100. No entanto, para o RTS, os valores mais altos foram associados ao asfalto 80/100.

Nguyen (2013), depois de estudar os efeitos dos procedimentos de mistura e tamanhos de misturas asfálticas com adição de RAP, concluiu:

- Os métodos de mistura afetam consideravelmente a reação entre o RAP e o ligante virgem, pois os mecanismos de mistura determinam a forma como o RAP e o ligante virgem são misturados. A condição de pré-aquecimento longo a uma temperatura consideravelmente maior do que o ponto de amolecimento do ligante do RAP neutraliza, de forma coincidente, a ligação de betume entre as partículas agregadas do RAP. Sob ação da mistura mecânica, os pedaços de RAP são separados, aumentando assim as áreas de contato entre o RAP e agregados virgens. Os valores de rigidez expressam indiretamente a heterogeneidade da mistura com adição de RAP, a variação nos valores de rigidez medidas será substancial para uma mistura heterogênea e menor no caso em que a mistura reciclada é homogênea.
- O aumento da durabilidade da mistura melhora significativamente, a nível de homogeneidade da mistura, com adição de RAP. O nível de homogeneidade também é substancialmente afetado pelos tamanhos do material RAP. As misturas recicladas, compostas de RAP de tamanho pequeno, geralmente são mais homogêneas e melhor será a interação entre RAP e os componentes virgens do que aqueles feitos com RAP de tamanho grande. Quanto mais homogênea for a mistura reciclada, maior será a interação entre RAP e a mistura virgem. Como o ligante do RAP não é completamente misturado com o ligante virgem, os valores de rigidez das misturas asfálticas com adição de RAP são inferiores às da mistura com componentes totalmente novos.

Zhao *et al.* (2013), trabalhando com teores de RAP de 15%, 20%, 30% e 40% em misturas asfálticas, concluíram que:

- Misturas mornas apresentaram menor resistência à deformação permanente do que as misturas quentes correspondentes. Com adição de RAP, a resistência à deformação permanente aumentou para misturas mornas e quentes. Misturas mornas de revestimento com alto teor de RAP apresentaram resistência à deformação permanente menor que misturas quentes com baixo teor de RAP, indicando que ainda há preocupações em relação à deformação permanente de misturas mornas com alto teor de RAP.
- A resistência à fadiga das misturas com adição de RAP, aumentaram para misturas mornas e diminuíram para quentes. Entretanto, o efeito do RAP pode ser comprometido para teores acima de 30%; misturas mornas de revestimento com alto teor de RAP apresentaram resistência à fadiga maior que misturas quentes com baixo teor de RAP, indicando que não há grandes preocupações em relação à trincas e fadiga de misturas mornas com alto teor de RAP.
- A susceptibilidade à umidade de misturas mornas de revestimento com alto teor de RAP se mostraram insuscetíveis à umidade. Adicionar porcentagens de RAP pode ser uma alternativa para reduzir a susceptibilidade à umidade de misturas mornas. Entretanto, o teor de RAP não deve ser maior que 30%.

Reis (2013), realizando o estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas em usina protótipo de escala reduzida, obteve resultados onde se evidencia o aumento da rigidez das misturas quando se usou material asfáltico envelhecido na composição de misturas novas. Observou também valores elevados de RT, os quais podem ser justificados pelo uso de filler (cal hidratada) na preparação das misturas analisadas.

Pradyumna, Mittal e Jain (2013), com base no trabalho de teste laboratorial da Academy of Scientific and Innovativ Research, realizado em misturas virgens e misturas com adição de 20% e utilizando o ligante asfáltico 50-70. Determinaram que a adição de RAP melhora todas as propriedades das misturas betuminosas. Isso indica que misturas com 20% RAP apresentariam melhor desempenho do que as misturas virgens sob condições similares. Concluíram que é possível conceber misturas asfálticas betuminosas de qualidade aceitáveis com RAP. Misturas com adição de RAP atendem as propriedades volumétricas, mecânicas e os critérios de desempenho desejados. Dentro das principais conclusões dessa pesquisa estão as seguintes:

- Quanto à susceptibilidade à umidade, os valores obtidos para misturas com 20% de RAP são maiores em comparação com as misturas convencionais virgens. A viscosidade superior do aglutinante rejuvenescido garante maior afinidade do aglutinante novo com os agregados e torna-se menos propenso à degradação. Os resultados confirmaram ainda mais o aumento da resistência das misturas com RAP contra danos causados pela umidade.
- No ensaio de deformação permanente, a deformação acumulada no final de 10000 ciclos foi inferior em comparação com as misturas virgens nas temperaturas de 35° C e 45° C, isto indica que mistura com 20% de RAP tem mais potencial para resistir à deformação permanente em comparação com a mistura virgem convencional. Esse comportamento é atribuído ao betume endurecido no RAP que possui maior viscosidade do betume.
- Comprova-se que a adição de RAP melhora a resistência à corrosão da mistura asfáltica. As misturas contendo RAP tornam-se mais rígidas em comparação com a mistura sem RAP e, portanto, apresentam melhor resistência à deformação permanente.
- A melhoria da vida de fadiga da mistura com a adição de RAP foi observada em comparação com a mistura virgem. O aumento percentual médio na vida de fadiga das misturas contendo RAP foi de 67,2% em comparação com a mistura virgem, Portanto o aumento da vida de fadiga implica que a mistura preparada com adição de RAP é mais durável do que a mistura sem RAP.
- Houve aumento nos valores de módulo resiliente da mistura betuminosa ao usar RAP. Este aumento nos valores de rigidez pode ser atribuído ao rejuvenescimento entre o ligante virgem e o RAP. Como a rigidez do aglutinante RAP é consideravelmente maior do que a do ligante virgem, as misturas asfálticas com adição de RAP possuem valores de rigidez maiores.

Guo *et al.* (2014), relatam na pesquisa *Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures*, que o RAP apresentou efeito positivo na resistência à deformação permanente em misturas mornas. Com respeito à resistência a trincas e fadiga, a introdução de RAP levou a uma redução da resistência. A susceptibilidade a umidade diminuiu com a adição de RAP.

Poulrika Kos *et al.* (2014), no estudo *Influence of short and long term aging on chemical, microstructural and macromechanical properties of recycled asphalt mixtures*, mostram que para uma mistura

asfáltica com adição de RAP em um teor 40%, a resistência a fadiga para a mistura convencional, melhorou com a adição de RAP e para mistura asfáltica de módulo elevado, teve melhor resultado sem adição de RAP. O módulo de rigidez aumentou com a adição de RAP para altas temperaturas e não foi significativamente afetado à baixas temperaturas.

2.7 RESUMO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A partir da revisão bibliográfica (Tabela 4) realizada acerca da influência da adição de RAP dentro de misturas asfálticas, destacam-se as principais orientações para o desenvolvimento do presente estudo:

- As pesquisas desenvolvidas têm avaliado a incorporação do RAP dentro de misturas asfálticas entre teores de 0% e 100%, considerando-se os resultados das experiências, satisfatórias.
- Misturas com adição de RAP atendem as propriedades volumétricas, mecânicas desejadas e os critérios de desempenho exigidos para uma mistura asfáltica convencional.
- Em relação à susceptibilidade à umidade, os valores obtidos para misturas com adição de RAP são maiores em comparação com as misturas convencionais virgens. Os resultados confirmaram ainda mais o aumento da resistência das misturas com RAP contra danos causados pela umidade.
- A viscosidade superior do aglutinante rejuvenescido garante maior afinidade do aglutinante novo com os agregados e torna-se menos propenso à degradação.
- Misturas asfálticas com adição de RAP tem mais potencial para resistir à deformação permanente em comparação com a mistura asfálticas convencionais. Esse comportamento é atribuído ao betume endurecido no RAP que possui maior viscosidade do betume. Comprova-se que a adição de RAP melhora a resistência à corrosão da mistura asfáltica. As misturas contendo RAP tornam-se mais rígidas em comparação com a mistura sem RAP.
- Nas características de Fadiga, a melhoria da vida de fadiga da mistura com a adição de RAP foi observada, é mais durável em comparação com a mistura asfáltica comum sem RAP.
- O Teste de módulo resiliente, indica o aumento nos valores de módulo resiliente da mistura betuminosa ao usar RAP, este aumento nos valores de rigidez pode ser atribuído ao rejuvenescimento entre o ligante virgem e o RAP. Como a rigidez do aglutinante RAP é consideravelmente maior do que a do ligante

virgem, as misturas asfálticas com adição de RAP possuem valores de rigidez maiores.

- Existem limitações técnicas e econômicas no uso de taxas elevadas de RAP (superior a 40% de RAP dentro da mistura), são viáveis somente com um estoque de misturas asfálticas recuperadas bem homogêneas e perfeitamente identificadas.
- Os mecanismos de mistura afetam consideravelmente a reação entre o RAP e o ligante virgem, pois os mecanismos de mistura determinam a forma como o RAP e o ligante virgem são misturados. O nível de homogeneidade também é substancialmente afetado pelos tamanhos do material RAP.
- Não pré-aquecer o RAP pode impedir uma boa mistura entre o betume envelhecido e o novo, apesar da mistura atingir a temperatura de mistura esperada. É por isso que um máximo de 30% de RAP pode ser usado em usinas não adaptadas.
- Pode-se ou não utilizar agente rejuvenescedor, dependendo esse quesito da porcentagem de RAP que será adicionado na mistura asfáltica. Descobriu-se também que o rejuvenescedor reduz a temperatura de mistura (menor consumo energético).
- Na tração por compressão diametral, os valores de RT em misturas com adição de RAP são superiores aos valores de uma mistura convencional.
- A reciclagem de revestimento asfáltico é uma alternativa que associa inovação e alta tecnologia para racionalizar gastos e evitar danos ao meio-ambiente, adequando a recomposição do revestimento asfáltico ao conceito de sustentabilidade.
- A grande maioria das pesquisas desenvolvidas, tem adotado teores entre 15% e 30% de adição de RAP dentro das misturas asfálticas.

Conforme se pode observar, de acordo com os estudos realizados na área, verifica-se o potencial da adição do RAP dentro de misturas asfálticas. Neste sentido, as pesquisas relacionadas convergem para a ideia de que a adição do RAP proporciona propriedades benéficas às misturas asfálticas. Para misturas asfálticas com adição de 20% de RAP não há necessidade da utilização de agente rejuvenescedor, devido a que esse teor de RAP não constitui um fator de mudança considerável nas propriedades da mistura.

Além disso, não é necessário do aquecimento do agregado virgem a temperaturas muito maiores que no caso de usinagem de uma mistura nova.

Tabela 4 - Resumo de resultados das principais pesquisas nacionais e internacionais consultadas.

Referencia	% RAP	Resultado
Guo <i>et al.</i> (2014)	30%	Efeito positivo na resistência à deformação permanente, a susceptibilidade a umidade diminui.
Poulika Kos <i>et al.</i> (2014)	40%	Resistência a fadiga, módulo de rigidez aumentaram.
Pradyumna, Mittal e Jain (2013)	20%	Maior potencial para resistir à deformação permanente, melhor resistência à corrosão, melhoria da vida de fadiga e aumento nos valores de módulo resiliente.
Nguyen (2013)	20%	Aumento da durabilidade.
Zhao <i>et al.</i> (2013)	15%, 20%, 30% e 40%	Resistência à deformação permanente e a resistência à fadiga aumentaram, reduziu a susceptibilidade à umidade.
Reis (2013)	20% - 40%	Aumento da rigidez, valores elevados de RT.
Colbert (2012)	15% - 50%	Maior resistência à deformação permanente.
Silva <i>et al.</i> (2012)	40%	Resistência à deformação permanente, fadiga e módulo de rigidez com resultados melhores.
Reyes e Berardinelli (2012)	20% - 40%	Maiores valores de módulo resiliente, uma baixa susceptibilidade ao dano de umidade.
Broseaud (2011)	50% - 70%	Limitações técnicas e econômicas no uso de taxas elevadas.
Miró <i>et al.</i> (2011)	0%, 15%, 30%, 50%	Deformação permanente menores, resistência a fadiga muito parecido para todas as misturas.
Valdés <i>et al.</i> (2011)	30%	Módulo de rigidez, resistência à fadiga aumentam, resistência a tração aumenta.
Santana (2009)	10%, 30%, 50%, 75%	Valores de Resistência à Tração acima do mínimo exigido pelo DNIT.
SU <i>et al.</i> (2009)	40%	Resistência à tração significativamente maiores, alta rigidez.
Soares e Vasconcelos (2004)	15% - 30%	A deformação das misturas com adição de RAP são equivalentes as misturas convencionais.
Balbo e Bodi (2004)	40%	A resistência à tração por compressão mostra valores muito superiores.
Vasconcelos e Soares (2003)	10% e 50%	A adição de RAP não compromete o comportamento mecânico.
Lima (2003)	0%, 10%, 30% e 50%	Aumento da rigidez, valores de RT superiores, maior vida de fadiga.

Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A fim de alcançar os objetivos estabelecidos, o programa experimental foi desenvolvido em seis etapas, descritas a seguir:

Etapa 1 - Caracterização dos agregados minerais e do RAP: apresenta-se a caracterização dos agregados realizada por Melo (2014), conforme a metodologia Superpave. Além disso, é apresentada a curva granulométrica utilizada para a preparação das misturas de concreto asfáltico e a curva granulométrica do RAP.

Etapa 2 - Caracterização das propriedades do ligante asfáltico: nessa fase, as propriedades empíricas dos ligantes asfálticos foram avaliadas conforme as especificações brasileiras.

Etapa 3 - Dosagem das misturas asfálticas: essa etapa corresponde ao procedimento de dosagem das misturas de concreto asfáltico denso, conforme a metodologia Marshall.

Etapa 4 - Moldagem e caracterização das placas de concreto asfáltico: essa fase teve como finalidade a produção de placas e corpos de prova prismáticos de concreto asfáltico, cujas características foram representativas das misturas formuladas na etapa de dosagem.

Etapa 5 - Avaliação do comportamento reológico e desempenho mecânico: nesta etapa, foram avaliadas as propriedades mecânicas e reológicas das misturas de concreto asfáltico, por meio de ensaios de deformação permanente e de resistência à fadiga.

Etapa 6 - Simulação de estrutura de pavimento urbano: o objetivo foi simular estruturas de pavimento com a camada de revestimento asfáltico constituída pela mistura de concreto asfáltico estudada nesta pesquisa. A partir dessa simulação, foram analisados os efeitos causados pela incorporação do RAP na estimativa de vida útil do pavimento, estabelecendo como critério de ruptura o mecanismo de fadiga.

3.1 ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS MINERAIS E DO RAP

De modo a viabilizar a comparação entre os resultados obtidos nesta pesquisa e nas pesquisas de Melo (2014), foram empregados neste trabalho a mesma curva granulométrica utilizada pelo referido autor que se refere a composição granulométrica, os mesmos agregados minerais de origem basáltica e o mesmo tipo de CAP (50-70). Procura-se garantir que as diferenças verificadas entre o comportamento e o desempenho das misturas asfálticas distintas ocorressem exclusivamente devido à influência da adição do material fresado (RAP).

A Tabela 5 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados, assim como as normas de ensaio que foram utilizadas.

Tabela 5 - Resultado da caracterização dos agregados.

Propriedades dos agregados	Norma	Resultado	Critério Superpave
Propriedades de consenso			
Angularidade do agregado graúdo	ASTM D 5821	100%/100%	100%/100% mín.
Angularidade do agregado miúdo	ASTM C 1252	49,18%	45% mín.
Partículas planas e alongadas	NBR 6954	9,59%	10% mín.
Teor de argila	AASHTO T 176	61,20%	50% mín.
Propriedades de origem			
Resistência à abrasão	ASTM C 131	11,58%	35-45% máx.
Sanidade	ASTM C 88	2,14%	10-20% máx.
Materiais deletérios	AASHTO T 112	0%	0,2-10% máx.
Propriedades complementares			
Massa específica real do agregado graúdo	ASTM C 127	2,953 g/cm ³	n/d
Massa específica aparente do agregado graúdo	ASTM C 127	2,880 g/cm ³	n/d
Absorção do agregado graúdo	ASTM C 127	0,85%	n/d
Massa específica real do agregado miúdo	DNER-ME 084	2,974 g/cm ³	n/d
Massa específica real do material pulverulento	DNER-ME 084	2,804 g/cm ³	n/d

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

A cal hidratada (CH-1) utilizada na pesquisa é a de origem dolomítica (fabricada pela Pinocal Indústria e Comércio de Cal Ltda). As caracterizações física e química do material se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades físicas e químicas da cal hidratada.

Propriedades da cal hidratada	Valor
Perda ao fogo (%)	18,6
Resíduo insolúvel (%)	1,9
Anidrido Carbônico (CO ₂) (%)	2,5
Óxido de cálcio (CaO) (%)	45,1
Óxido de magnésio (MgO) (%)	33,5
Óxidos totais não voláteis (CaO+MgO) (%)	96,5
Óxidos totais não hidratados (%)	27,6
Óxidos de CaO não hidratados (%)	0,0
Cálcio (Ca) (%)	32,2
Magnésio (Mg) (%)	202,2
Densidade	3,0

Fonte: Melo (2014).

A distribuição granulométrica da mistura avaliada nesta pesquisa, é idêntica à utilizada na pesquisa de Melo (2014), visto que o intuito dessa pesquisa é avaliar os efeitos provenientes exclusivamente da adição do RAP numa mistura convencional de concreto asfáltico. Essa curva foi estabelecida pela composição dos agregados (brita 3/4", pedrisco e pó de pedra) e do filer (cal hidratada) conforme os critérios da especificação Superpave, para um tamanho nominal máximo de 19mm. A curva granulométrica se apresenta também dentro dos limites estabelecidos para a Faixa B do DNIT (ES-031-2006). A composição granulométrica é: 43% de brita 3/4", 15,5% de pedrisco, 40% de pó de pedra e 1,5% de cal hidratada

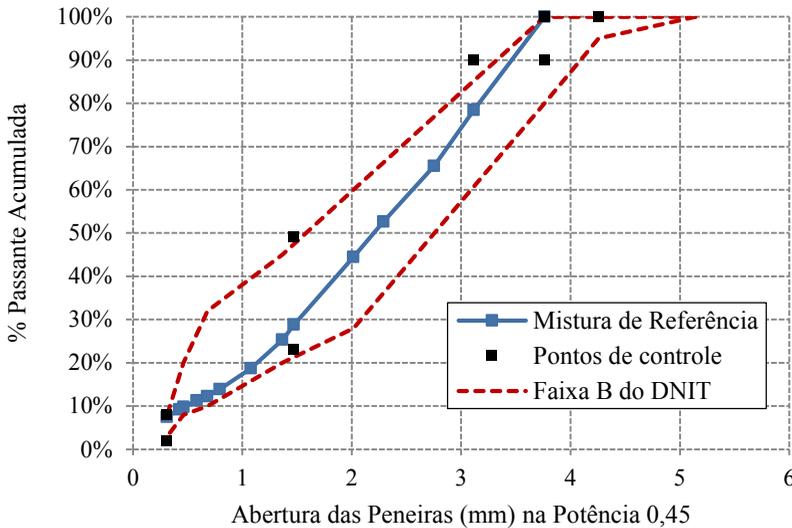
A Tabela 7 mostra a porcentagem passante de agregado nas peneiras de controle e a curva granulométrica pode ser visualizada Figura 7 assim como os critérios da especificação Superpave e a os limites da Faixa B do DNIT (ES-031-2006).

Tabela 7 - Porcentagem passante nas peneiras de controle do agregado virgem.

Peneiras - Série ASTM	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 16	Nº 30	Nº 50	Nº 100	Nº 200
Material passante (%)	100	77,5	61,3	43,3	24,3	17,4	12,6	9,8	7,6	5,4

Fonte: Melo (2014).

Figura 7 - Curva granulométrica da composição de agregados do agregado virgem.



Fonte: Adaptado de Melo (2014).

O RAP utilizado nesta pesquisa, foi coletado no depósito da Companhia de Melhoramento da Capital (COMCAP), localizado no bairro do Itacorubi, em Florianópolis – SC.

Em laboratório o RAP foi levemente aquecido em estufa a uma temperatura ao redor de 60°C, para se conseguir desfazer os torrões e pedaços de mistura asfáltica. Após isso, se procedeu a um peneiramento onde se descartou as pedras maiores a 19,1mm. Por último se separou três amostras do RAP, para a extração do ligante asfáltico e análise granulométrica.

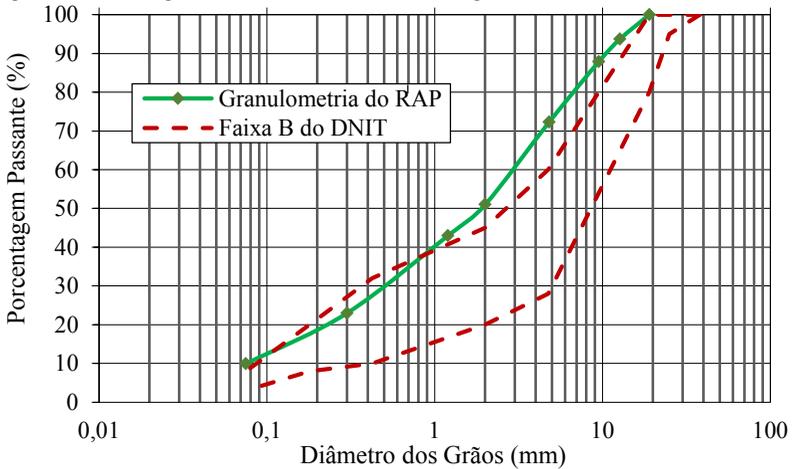
A Tabela 8 mostra a porcentagem passante de agregado nas peneiras de controle, em que a curva granulométrica do RAP apresentada na Figura 8, não se encaixou dentro dos limites estabelecidos para a Faixa B do DNIT (ES-031-2006).

Tabela 8 - Porcentagem passante nas peneiras de controle – RAP sem ligante.

Peneira	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 16	Nº 50	Nº 200
mm	19,1	12,7	9,5	4,8	2	1,2	0,3	0,075
% Passante Fresando	100	93,7	87,9	72,2	51	43	23	9,9

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

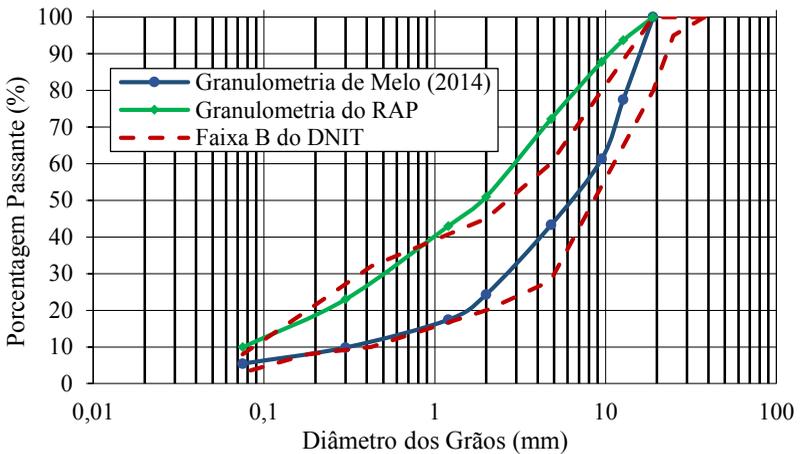
Figura 8 - Curva granulométrica do RAP sem ligante.



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

A Figura 9 mostra a curva granulométrica da composição de agregados e a curva granulométrica do RAP sem ligante e os limites estabelecidos para a Faixa B do DNIT (ES-031-2006).

Figura 9 - Curvas granulométricas: Composição de agregados e do RAP.

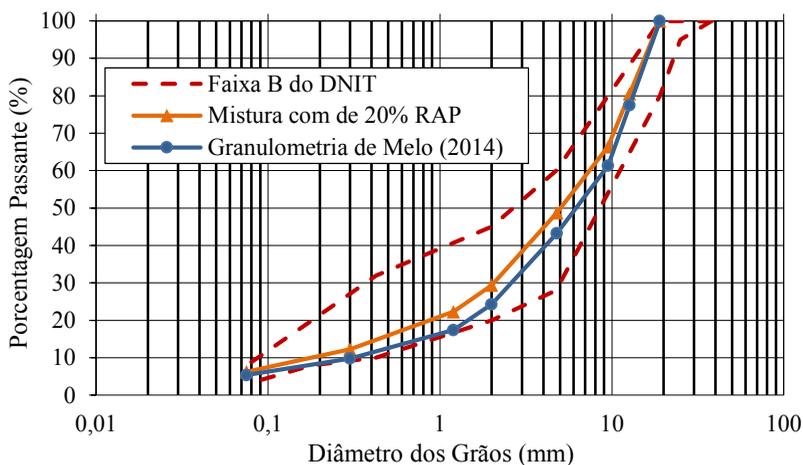


Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Tendo a granulometria do material fresado e dos agregados minerais virgens, fez-se, por tentativas a composição da curva granulométrica da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP (ver a Figura 10). Para se atingir este alvo, considerou-se, ao final, uma mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e 80% de agregados virgens. O fato de se utilizar 20% de RAP vem da consideração feita tendo-se em conta que a adição de pequenas porcentagens de RAP não deve afetar o desempenho da mistura asfáltica e também que o volume do material fresado das ruas de Florianópolis é de pouca quantidade, não se necessitando incorporar maiores quantidades¹.

A curva granulométrica da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP, se encaixa dentro dos limites estabelecidos para a Faixa B do DNIT Especificação de Serviço ES - 031/2006, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Curva granulométrica da mistura com adição de 20% de RAP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

¹ Dentro do desenvolvimento desta pesquisa, o autor realizou uma viagem à cidade de Rio de Janeiro para conhecer a experiência da empresa Ville Romi, que foi encarregada de fazer a manutenção das vias urbanas do município de Rio de Janeiro para os Jogos Olímpicos 2016. A execução desses trabalhos foram feitos utilizando a técnica de reciclagem do RAP a quente. Desde então, a empresa mencionada continua realizando esse tipo de serviços, utilizando a técnica reciclagem de pavimentos a quente e utilizando um teor de 20% de RAP dentro da mistura asfáltica, tendo resultados bons no que tange ao desempenho da nova mistura.

A Tabela 9 mostra as porcentagens desta mistura com adição de RAP, para as peneiras de controle. A mistura asfáltica com adição de 20% de RAP contém 1,15% em peso de cal (incluso dentro da porcentagem passante da peneira N° 200).

Tabela 9 - Porcentagem passante nas peneiras de controle – Mistura com adição de 20% de RAP.

Peneira	3/4"	1/2"	3/8"	N° 4	N° 10	N° 16	N° 50	N° 200
mm	19,1	12,7	9,5	4,8	2	1,2	0,3	0,075
% Passante Mistura com RAP	100	80,6	66,4	48,8	29,4	22,3	12,3	6,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

3.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO LIGANTE ASFÁLTICO

Nessa etapa foi realizada a caracterização das propriedades empíricas do ligante asfáltico, constantes nas especificações brasileiras.

O ligante asfáltico utilizado foi do mesmo tipo ao empregado na mistura asfáltica convencional desenvolvida por Mello (2014) (CAP 50-70, mas de diferente refinaria. Para esta pesquisa o ligante asfáltico foi proveniente da cidade de Canoas, Estado de Rio Grande do Sul). Não se incorporou nenhum aditivo ou agente rejuvenescedor para a produção da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP. A Tabela 10 apresenta a certificação da amostra do ligante asfáltico que foi encaminhada à UFSC pelo fornecedor.

Além dos dados fornecidos no certificado de ensaios do CAP utilizado, em laboratório determinou-se a recuperação elástica do ligante asfáltico a 25°C, obtendo-se como resultado deste ensaio, 9,5%.

Para a extração do ligante asfáltico do RAP, foram separadas três amostras que foram encaminhadas à empreiteira Fortunato LTDA, onde foi feito esse serviço. A extração do ligante asfáltico das três amostras de RAP foi realizada através do equipamento Rotarex. Os valores obtidos variaram entre 5,0% e 5,6% com valor médio de 5,3% de teor de betume contido nas amostras de RAP.

Tabela 10 - Certificado de ensaios do CAP utilizado.

Produto: CIMENTO ASFÁLTICO 50/70		Código: 71K		
Local de Amostragem:	TQ 24596D	Laboratório: REFAP/OP/OP		
Data/hora Amostragem:	31/08/2016 - 06:30	Endereço: Canoas - RS		
Data/hora Recebimento:	31/08/2016 - 08:24			
Característica	Métodos	Especificações	Resultado	Unidade
Penetração	D 5	50 a 70	56	0,1 mm
Ponto de amolecimento	D 36	46 min	52,6	grau °C
Viscosidade Brookfield 135GC-SP21	0 4402	274 min	346	Cp
Viscosidade Brookfield 150 GC-SP21	0 4402	112 min	176	Cp
Viscosidade Brookfield 177GC-SP21	0 4402	57 a 205	66	Cp
RTFOT - Penetração Retida	D 5	55 min	64	%
RTFOT - Aumento do ponto de amolecimento	D 36	8 min	2,2	grau °C
RTFOT - Ductilidade a 25GC	D 113	20 min	> 147	cm
RTFOT variação em % massa	0 2872	0,50 a -0,50	0,037	%
Ductilidade a 25 °C	D113	60 min	>147	cm
Solubilidade no Tricloroetileo	D 2042	99,5 min	100,0	% massa
Ponto de Fulgor	D 92	235 min	>216	grau °C
Índice de Suscetibilidade Térmica	X 018	0,7 a -1,5	-0,3	N/A
Densidade Relativa a 20/4 Graus Celsius	D 70	Anotar (1)	XXX	N/A
Aquecimento a 177 °C	X 215	NESP (2)	NESP	N/A

Notas: (1) Ensaio não faz parte da especificação para fins faturamento;

(2) NESP = não espuma.

Visc SSF 135 °C = 179, 8s Visc SSF 150 °C = 92,8s Visc SSF 177°C = 35,5s

Fonte: Petrobras (2016).

3.3 ETAPA 3 - DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA

Tendo-se em consideração que a presente pesquisa foi desenvolvida com a orientação de que está técnica possa ser implementado nas obras das vias das prefeituras municipais do Brasil, optou-se por se escolher a Metodologia Marshall para o projeto da mistura, regulamentado no Brasil pela normativa DNIT 031/2004-ES.

Isto porque os equipamentos dos que se vale a metodologia Marshall podem ser facilmente encontrados nas prefeituras, o que facilitaria sua aplicação na dosagem de misturas convencionais com adição de material fresado (RAP).

3.3.1 Produção das misturas asfálticas

O procedimento de dosagem da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP foi realizado conforme a metodologia Marshall. A distribuição granulométrica dos agregados empregada foi determinada na etapa anterior e corresponde à mesma utilizada na mistura da pesquisa de Melo (2014). Para o preparo das misturas, os agregados foram fracionados em oito peneiras de controle, conforme a metodologia de Melo (2014), de forma a compor precisamente a curva granulométrica estabelecida. O fracionamento dos agregados utilizado é apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Fracionamento dos agregados para a composição granulométrica das misturas asfálticas.

Fração passante	3/4"	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 16	Nº 50	Nº 200
Fração retida	1/2"	3/8"	Nº 4	Nº 10	Nº 16	Nº 50	Nº 200	Fundo

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Em relação ao ligante asfáltico, este foi condicionado em estufa à temperatura de usinagem, determinada a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante escolhido gerada a partir da Tabela 10. A temperatura do ligante na hora de ser misturado ao agregado deve ser tal que a sua viscosidade esteja situada entre 75 e 150SSF (segundos Saybolt-Furol), de preferência entre 75 e 95SSF ou $0,17 \pm 0,02 \text{ Pa.s}$ se medida com o viscosímetro rotacional. A temperatura do ligante não deve ser inferior a 107°C nem superior a 177°C . A temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15°C acima da temperatura definida para o ligante, sem ultrapassar os 177°C . A temperatura de compactação deve ser tal que o ligante apresente viscosidades na faixa de 125 a 155SSF ou $0,28 \pm 0,03 \text{ Pa.s}$.

Com o auxílio de um misturador mecânico, as misturas asfálticas foram produzidas e posteriormente levadas à estufa durante um período de duas horas, na temperatura de compactação, com o intuito de simular o envelhecimento do ligante a curto prazo. Após o período de duas horas, as misturas foram compactadas, por meio do compactador mecânico por impacto Marshall.

A Tabela 12 apresenta as temperaturas de usinagem e compactação selecionadas, para a produção das misturas asfálticas, bem como a temperatura à qual os agregados foram condicionados.

Tabela 12 - Temperaturas de usinagem e compactação da mistura asfáltica com adição de RAP (a partir dos parâmetros da certificação do CAP).

Temperatura de Usinagem (°C)	Temperatura dos Agregados (°C)	Temperatura de Compactação (°C)
150	160	140

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

3.3.2 Determinação da DMM

De modo a proceder à verificação dos critérios de projeto a serem obedecidos pela mistura, foram realizados ensaios de massa específica máxima medida (*Gmm*, procedimento Rice) e de massa específica aparente (*Gmb*). As misturas produzidas com esta finalidade, assim como as demais misturas preparadas durante o desenvolvimento desta pesquisa, foram produzidas obedecendo-se às recomendações da norma AASHTO R 30.

Quanto à *Gmm*, esta foi determinada para os teores de ligante 3%, 3,5%, 4% e 5% por meio de ensaios realizados conforme o procedimento Rice, preconizado pela norma ABNT NBR 15619.

A determinação da massa específica aparente (*Gmb*) das misturas de concreto asfáltico, por sua vez, foi realizada a partir da aplicação da norma ABNT NBR 15573. Para tanto, foram previamente moldados corpos de prova, com diâmetro de 102mm e uma altura de, aproximadamente 63,5mm.

3.3.3 Dosagem Marshall

Para a determinação do teor de CAP na mistura, contendo 20 % de material fresado, foram moldados corpos de prova com teores de CAP diferentes, (3,0%, 3,5%, 4,0%, 4,5% e 5,0%), sendo que para cada teor de CAP foram moldados três corpos de prova, aplicando-se a energia de compactação de 75 golpes por face.

Na sequência, os corpos de prova foram pesados e determinado os volumes. Conhecida a DMM da mistura, calculou-se os parâmetros físicos dos corpos de prova e plotou-se os gráficos $Vv\% \times \text{Teor de Ligante}$ e $RBV\% \times \text{Teor de ligante}$, a partir dos quais se determinou o teor de projeto do CAP para a mistura reciclada.

3.3.4 Dano por umidade induzida

Esta etapa da dosagem consistiu em avaliar a sensibilidade à umidade da mistura asfáltica. Para isso, foi empregado o ensaio de Lottman modificado, constante na norma ABNT NBR 15617/2015.

Esse ensaio foi realizado para a mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e 1,15% de cal, com os teores de ligante de projeto definidos nos estudos de dosagem. Para cada mistura, foram moldados seis corpos de prova com diâmetro de 102mm, altura de 63,5mm e porcentagem de vazios entre 6 e 8%. Os corpos de prova foram subdivididos em dois conjuntos e levados à ruptura para determinação da resistência à tração por compressão diametral, sendo que um dos conjuntos de três corpos de prova foi submetido a um condicionamento prévio. Tal condicionamento consistiu na saturação com água dos corpos de prova entre 55 e 80%, resfriamento à temperatura de -18°C durante 16 horas e banho de água a 60°C, por um período de 24 horas.

A sensibilidade à água da mistura asfáltica é definida como a razão de resistência à tração retida (RRT), que corresponde à relação entre a resistência à tração média do conjunto de corpos de prova que sofreu condicionamento (RT2) e a resistência à tração média do conjunto não-condicionado (RT1). Para que a mistura asfáltica seja aprovada no critério de sensibilidade à água, o valor de resistência à tração retida deve ser superior a 70% (ABNT NBR 15617/2015).

Uma vez estabelecida a formulação da mistura asfáltica, passa-se à próxima etapa, correspondente à produção de corpos de prova para os ensaios de desempenho.

3.4 ETAPA 4 - MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CONCRETO ASFÁLTICO

Após a formulação das misturas asfálticas, foram moldadas placas de concreto asfáltico para a realização dos ensaios de deformação permanente, módulo complexo e vida de fadiga.

Para avaliar a resistência à deformação permanente, foram moldadas duas placas de 50×18×5 cm. Para a avaliação do módulo complexo e da vida de fadiga, foram moldadas três placas de 60×40×9cm.

A moldagem das placas destinadas aos ensaios de desempenho foi realizada na mesa compactadora LCPC (atual IFSTTAR), com o intuito de simular a compactação de misturas asfálticas em campo, para uma condição de tráfego pesado (75 golpes/face). A moldagem das placas seguiu os procedimentos descritos na norma francesa AFNOR NF P 98-

250-2, a qual especifica, para tráfego pesado, o nível de compactação forte “tipo 2 bis” para as placas em que foram serrados os corpos de prova para os ensaios de módulo complexo e fadiga, e o nível de compactação forte “tipo 2” para as placas de deformação permanente. Embora em vias urbanas possa não ter tráfego pesado, este protocolo foi usado para ser compatível com a mistura de referência caracterizada por Melo (2014).

Após a compactação das placas de módulo complexo e fadiga, foram serrados cinco corpos de prova prismáticos por placa, com dimensões aproximadas de 400,0×50,8×63,5mm. Os corpos de prova prismáticos foram serrados na mesma direção que foi realizada a compactação da placa. Posteriormente, os corpos de prova prismáticos e as placas de deformação permanente foram caracterizados em termos de geometria e porcentagem de volume de vazios. Cabe salientar que, após a obtenção das placas para deformação permanente e dos corpos de prova prismáticos, os mesmos tiveram um período de descanso de 20 dias, anterior à realização dos ensaios de desempenho.

3.5 ETAPA 5 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO E DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO DA MISTURA ASFÁLTICA

3.5.1 Desempenho à deformação permanente das misturas asfálticas

O desempenho das misturas de concreto asfáltico frente à deformação permanente foi avaliado com a utilização do simulador de tráfego Orniéreur, apresentado na Figura 11, conforme os procedimentos da norma francesa AFNOR NF P 98-253-1.

Nesse ensaio, o pneu fica permanentemente em contato com a placa e aplica carregamento em ciclos longitudinais com frequência de 1 Hz, sendo que um ciclo é referente a duas passagens do eixo na trilha de roda (ida e volta). O carregamento aplicado é padronizado em 5 kN, com a pressão de insuflagem dos pneus de 0,6 MPa. O equipamento permite a realização do ensaio em duas placas simultaneamente, sendo que em uma das placas se instala um controlador de temperatura. Previamente ao início do ensaio, as placas foram submetidas a dois condicionamentos: o primeiro condicionamento correspondeu à aplicação de 1000 ciclos de carregamento a uma temperatura entre 15 e 25°C, com a finalidade de acomodar adequadamente as placas nos moldes de ensaio segundo condicionamento, as placas foram submetidas à temperatura de 60°C por

um período de 8 a 12 horas, para garantir a uniformidade de temperatura em todas as regiões das placas.

Figura 11 - Simulador de tráfego Orniéreur, desenvolvido pelo LCPC utilizado nesta pesquisa.

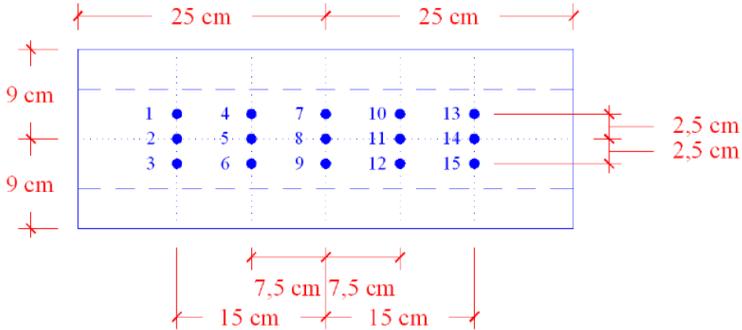


Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Após os condicionamentos, foram realizadas as primeiras leituras das distâncias da superfície das placas em relação a um gabarito referencial, para que fosse quantificada a evolução da medida de deformação permanente ao longo do ensaio. Foram também realizadas leituras nos ciclos 100, 300, 1000, 3000, 10000 e 30000, em 15 pontos distintos de cada placa, sendo que, após cada leitura, o simulador de tráfego permaneceu inoperante até que as placas atingissem novamente a temperatura de ensaio de 60°C. A Figura 12 identifica os pontos de leitura das deformações permanentes nas placas de concreto asfáltico.

A profundidade da deformação permanente em cada número de ciclos de controle foi calculada pela diferença entre a média das profundidades medidas nos 15 pontos de leitura e a média das leituras referenciais, realizadas no ciclo zero.

Figura 12 - Pontos de leitura das deformações permanentes na placa de concreto asfáltico.



Fonte: Adaptado de AFNOR NF P 98-253-1 (1993 apud Melo, 2014).

No entanto, a deformação permanente é mais comumente analisada em termos percentuais, sendo calculada conforme a equação 15.

$$A_i = 100 \times (m_{ij} - m_{0j}) / (15 \times e) \quad (15)$$

onde:

A_i = Afundamento médio na superfície da placa no ciclo i [%];

m_{ij} = Leitura da profundidade no ciclo i no ponto j ;

m_{0j} = Leitura da profundidade no ciclo zero no ponto j ;

e = Espessura da placa de concreto asfáltico.

Após a obtenção dos resultados de afundamento médio para cada número de ciclos de controle, confeccionou-se a curva de evolução da deformação permanente em função do número de ciclos, em escala logarítmica.

Os resultados foram julgados conforme o critério francês para deformação permanente, o qual limita o afundamento na trilha de roda em 10%, para camadas de concreto asfáltico utilizadas como revestimento. Há critérios mais rigorosos, como o estabelecido pelo grupo europeu COST 333, limitando o afundamento na trilha de roda em 5% para misturas asfálticas densas.

3.5.2 Comportamento reológico e desempenho à fadiga das misturas asfálticas

Tanto para a caracterização do comportamento reológico quanto para o ensaio de vida de fadiga da mistura asfáltica com adição de 20%

de RAP, foi utilizado o aparato 4 pontos, fabricado pela empresa australiana IPC Global, que pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 - Equipamento de teste Quatro Pontos.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Esse equipamento é capaz de aplicar pulsos de carga senoidais consecutivos nos terços médios de corpos de prova prismáticos, resultando em esforços de flexão alternada (tração e compressão), medindo além da força máxima aplicada, o deslocamento máximo no meio do vão do corpo de prova prismático. Para que a temperatura durante os ensaios seja constante, o aparato 4 pontos permanece em uma câmara adiabática controlada. Os testes realizados foram conduzidos com o auxílio de um software disponibilizado pela IPC Global, denominado UTS 018. A partir do software, é possível obter os valores do ângulo de fase, módulo complexo, amplitude da deformação, amplitude da tensão, energia dissipada e temperatura a cada ciclo de carregamento.

O comportamento reológico das misturas de concreto asfáltico foi avaliado por meio do ensaio de módulo complexo, a diversas frequências de carregamento e temperaturas, conforme prescreve a norma europeia EN 12697-26. Foram testados dois corpos de prova por mistura asfáltica estudada. Para que o ensaio fosse representativo, a seleção dos corpos de prova procedeu da seguinte forma: em posse dos resultados dos parâmetros volumétricos, foram selecionados para o ensaio de módulo complexo os corpos de prova com valores de porcentagem de vazios mais

próximos do valor médio calculado desse parâmetro para os quinze corpos de prova. O Módulo Complexo dos corpos de prova foi determinado nas seguintes frequências e temperaturas: 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1,0 Hz, 2,0 Hz, 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz - 0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30°C. Foram aplicados 100 ciclos de carregamento por frequência de estudo, a uma reduzida amplitude de deformação controlada de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$, de modo a não danificar o corpo de prova e garantir o comportamento viscoelástico linear do concreto asfáltico. O resultado do módulo complexo de uma mistura asfáltica, decorrente da aplicação de ciclos de carregamento à determinada frequência e temperatura, corresponde à média dos valores obtidos no centésimo ciclo dos dois corpos de prova testados.

Em posse dos resultados dos ensaios de módulo complexo, foram realizadas análises do comportamento reológico da mistura asfáltica com adição de RAP, gerando curvas mestras e contemplando as propriedades viscoelásticas do material.

O ensaio de fadiga, também realizado com a utilização da viga de 4 pontos, foi executado pela aplicação de carregamento senoidal sob deformação controlada, seguindo os procedimentos descritos na norma europeia EN 12697-24. A temperatura de ensaio seria determinada com base no comportamento reológico das diferentes misturas, por meio da análise do plano complexo (Cole-Cole) de cada mistura asfáltica. Entretanto, tendo em vista o intento de comparar os resultados de vida de fadiga da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP com os resultados obtidos no estudo da uma mistura de referência de Melo (2014), ensaio de fadiga realizado na temperatura de 15°C. A frequência de carregamento foi definida em 10 Hz, valor equivalente à velocidade de tráfego de 72 km/h aproximadamente.

A partir desta etapa, considerou-se também como referência comparativa a mesma mistura asfáltica convencional porém a que foi extraída de campo, a qual encontra-se contemplada dentro da pesquisa de Santos (2016), cujos ensaios de vida de fadiga foram realizados na temperatura de 20°C. Os ensaios de resistência à fadiga dessa pesquisa também foram realizados nessa temperatura.

O critério de seleção de corpos de prova para o ensaio de fadiga correspondeu à porcentagem de vazios. Para que o conjunto de corpos de prova fosse homogêneo, foram selecionados dez de um total de quinze corpos de prova confeccionados, sendo que os escolhidos apresentavam valores de porcentagens de vazios mais próximos do valor médio desse parâmetro.

Estabelecidos os parâmetros de carregamento, o ensaio de vida de fadiga se dá por finalizado quando o corpo de prova prismático apresentar uma redução de 50% em relação ao valor do módulo complexo inicial, determinado no centésimo ciclo de carregamento. Após os ensaios de vida de fadiga, foi obtivo o modelo característico desse comportamento, relacionando os níveis de deformação e o número de solicitações de carga, para a mistura asfáltica estudada. O modelo é apresentada na equação 16.

$$N=a \times \varepsilon^b \quad (16)$$

onde:

N = Número de solicitações de carga para atingir o critério de finalização do ensaio (50% da rigidez inicial);

ε = Deformação específica de tração;

a, b = Constantes determinadas experimentalmente.

3.6 ETAPA 6 - SIMULAÇÃO DE ESTRUTURA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO

Com o objetivo de evidenciar os efeitos proporcionados pela incorporação do material fresado RAP na mistura asfáltica, foram simuladas estruturas de pavimento com o auxílio do software ViscoRoute (desenvolvido pela IFSTTAR/França). O software considera o comportamento viscoelástico do revestimento asfáltico, ponderando a influência da velocidade de tráfego e da temperatura do revestimento asfáltico, por meio dos parâmetros viscoelásticos do modelo de Huet-Sayegh. A estrutura de pavimento dimensionada foi um pavimento urbano para um tráfego de 1×10^6 . Os módulos de elasticidade das camadas de base, sub-base e camada final de terraplenagem foram tomados dos estimados por Melo (2014) utilizando o software BAKFAA, que realiza retroanálises de bacias deflectométricas, adquiridas a partir de levantamentos feitos com o FWD (Falling Weight Deflectometer) em campo.

A respeito da temperatura do revestimento asfáltico e da velocidade de tráfego, esses foram determinados de acordo com os parâmetros estabelecidos nos ensaios de fadiga – temperatura de 20°C e velocidade de tráfego de 72 km/h (equivalente à frequência de 10 Hz). Quanto à configuração do carregamento para as simulações, foi definido o semieixo do eixo padrão de 8,2 toneladas, sendo que o mesmo é composto por rodas duplas. A distância entre rodas é de 32 cm e a carga

por roda é de 2050 kgf, sendo que a área de contato pneu-pavimento foi considerada como circular, de raio 10,8 cm. A pressão de contato pneu-pavimento foi estabelecida em 5,6 kgf/cm².

Para cada simulação, foi obtido o valor da deformação específica de tração na face inferior da camada de revestimento asfáltico. A partir das curvas de fadiga, obtidas na etapa anterior, foi estimado o número de solicitações do eixo padrão de 8,2 toneladas que causará a ruptura por fadiga do revestimento asfáltico, considerando, nesse momento, o fator campo-laboratório igual a 1.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Por meio da realização dos ensaios apresentados no programa experimental desse estudo, foram obtidos resultados que serão discutidos nas seções seguintes. Estas estão organizadas de acordo com a sequência de etapas disposta no programa experimental. Uma vez que a Etapa 1 trata da caracterização dos agregados minerais e do RAP, e a Etapa 2 que trata da caracterização das propriedades empíricas do ligante asfáltico, já foram apresentadas no capítulo anterior, a discussão dos resultados se dá a partir da Etapa 3.

4.1 DOSAGEM DA MISTURA ASFÁLTICA

Nessa etapa, serão apresentados os resultados obtidos da Determinação da DMM, dano por umidade induzida e da dosagem Marshall realizado com o ligante asfáltico CAP 50-70, que não foram apresentados na etapa anterior.

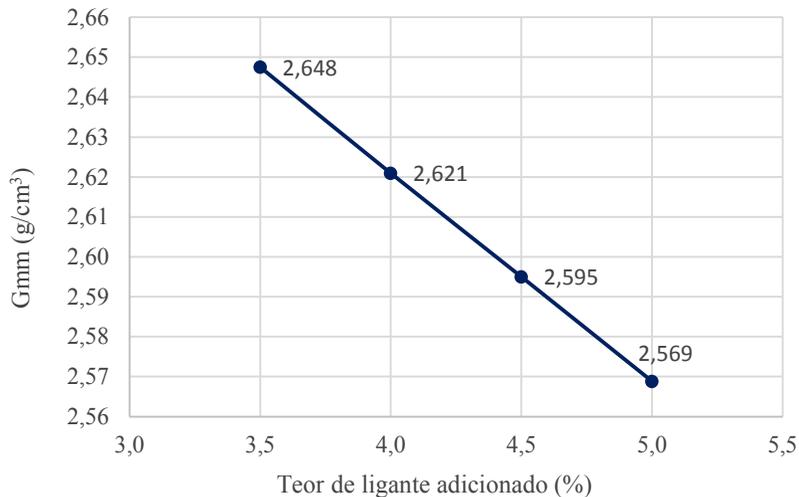
4.1.1 Determinação da DMM

De acordo com o método estabelecido para esta pesquisa, a dosagem da mistura asfáltica com adição de 20% foi conduzida para os teores de ligante de 3,5%, 4%, 4,5% e 5%. Relembra-se que estas porcentagens foram previamente definidas com base nos resultados obtidos por Melo (2014), que empregou os mesmos agregados e composição granulométrica e obteve o teor de projeto entre 4,35%.

Na Figura 14 são apresentados os valores de máxima específica máxima medida (G_{mm}) da mistura asfáltica não compactada, em função dos diferentes teores de ligante. Conforme definido no método da pesquisa, a G_{mm} correspondente ao teor de 4,3% foi obtida a partir da média de 4 determinações sucessivas conduzidas por meio do método Rice. Na sequência, na Figura 15, é apresentado, os dados referentes à massa específica aparente (G_{mb}) em função dos diferentes teores de ligante avaliados.

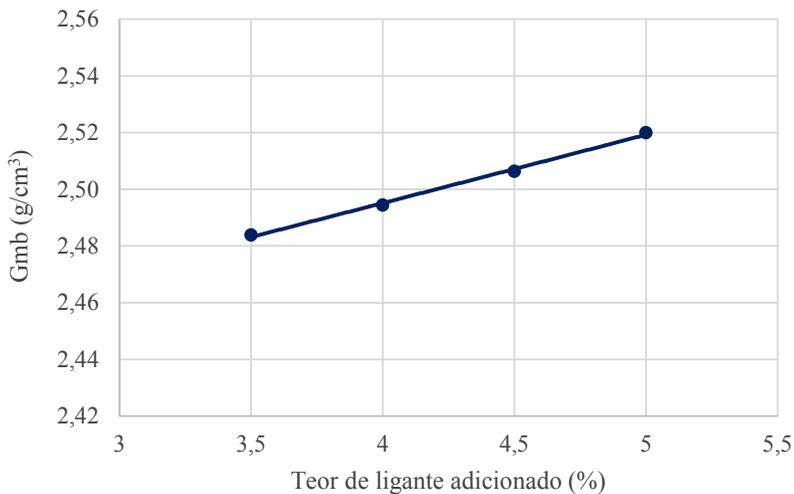
Com base nos resultados de massa específica máxima medida (G_{mm}) e massa específica aparente (G_{mb}), estabeleceu-se a relação entre a porcentagem do volume de vazios e os teores de ligante avaliados neste estudo de dosagem. Esta relação é apresentada na Figura 16.

Figura 14 - Massa específica máxima medida (G_{mm}) da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP em função do teor de ligante.



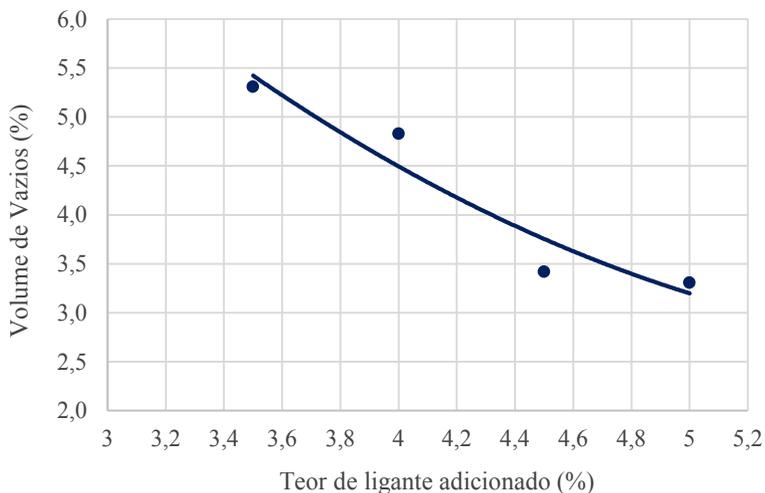
Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Figura 15 - Massa específica aparente (G_{mb}) da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP função do teor de ligante.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Figura 16 - Porcentagem do volume de vazios (V_v) em função do teor de ligante.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

4.1.2 Dosagem Marshall

A escolha do teor de ligante acrescentado (ligante novo) é fundamental para a futura durabilidade da mistura. As diferenças entre o ligante novo e o velho irão se reduzir. Além disso todos os procedimentos são considerando-se que a mistura entre o ligante do fresado e o ligante novo é homogêneo.

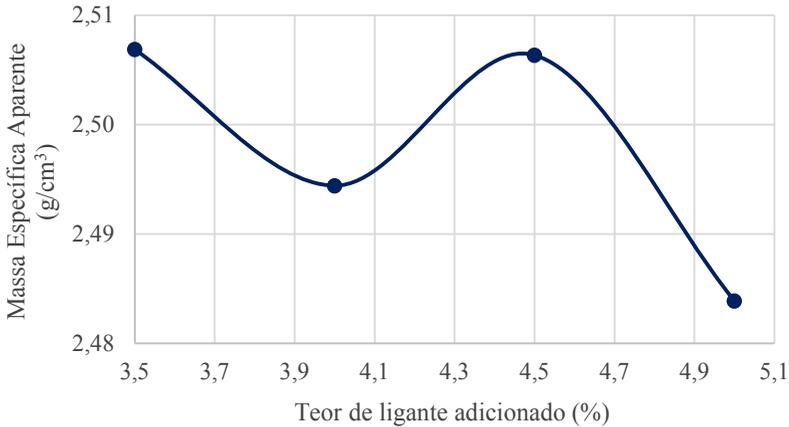
Para determinação do teor de CAP, na mistura contendo 20% de RAP, foram moldados corpos de prova em tréplica, com teores de CAP novo de 3,5%, 4,0%, 4,5% e 5,0%. A dosagem com os distintos teores de ligante asfáltico novo se desenvolveu procurando, sempre que após a aplicação da energia de compactação de 75 golpes/face possa se atingir um volume de vazios de 4%.

Adicionando 20% de RAP à mistura asfáltica estudada, estaria sendo incorporado cerca de 1% de ligante envelhecido. Não foram realizados ensaios para avaliar as propriedades reológicas deste ligante, para avaliar o quanto envelhecido ele estaria e se teria dificuldade determinar quanto este ligante poderia representar em termos de ligante virgem na mistura.

Considerando as observações feitas durante a moldagem das placas, supõe-se que, de forma aproximada, este ligante envelhecido estaria aportando com cerca de 0,3% de ligante novo que será poupado.

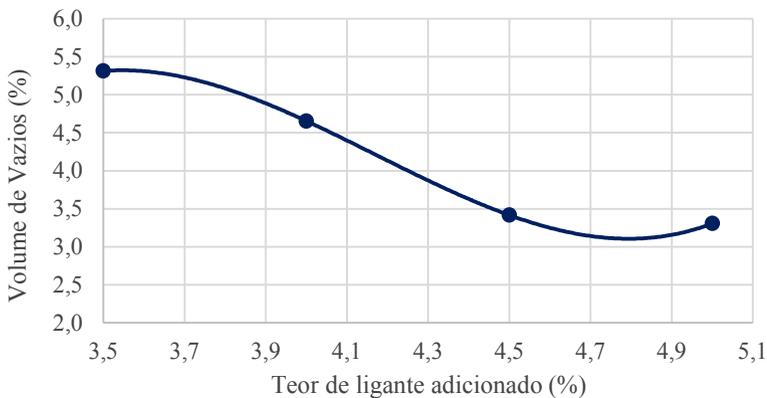
Na Figura 17, Figura 18, Figura 19 e Figura 20 seguem os respectivos gráficos gerados na dosagem pela metodologia Marshall adotada desta pesquisa. A Tabela 13 apresenta os parâmetros dos corpos de prova moldados com os diferentes teores de CAP testados.

Figura 17 - Massa Específica Aparente vs Teor de Asfalto.



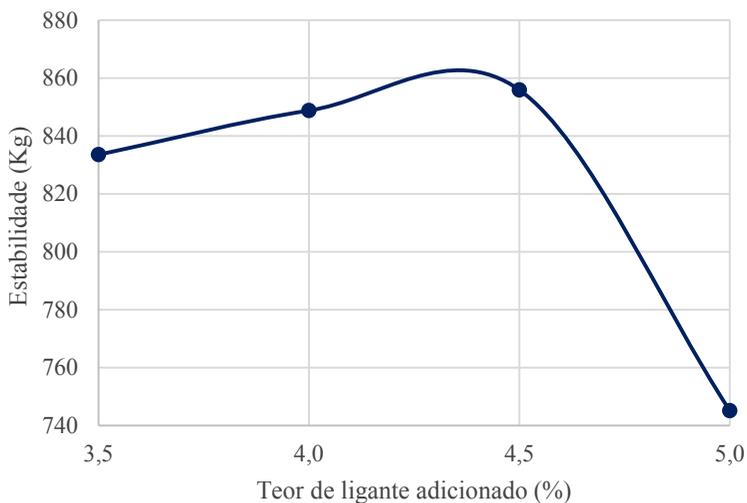
Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Figura 18 - Volume de Vazios vs Teor de Asfalto.



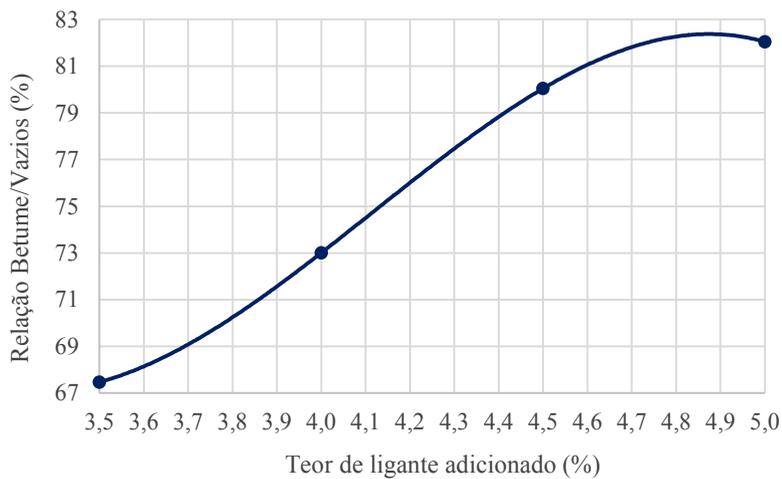
Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Figura 19 - Estabilidade vs Teor de Asfalto.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Figura 20 - Relação Betume/Vazios vs Teor de Asfalto.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Tabela 13 - Parâmetros dos corpos de prova moldados

Teor de asfalto %	Gmm (g/cm ³)	Gmb (g/cm ³)	Vv (%)	RBV (%)	Fluência	Estabilidade (kgf)
3,5	2,648	2,507	5,3	67,5	4,46	833,5
4	2,621	2,506	4,7	73	5,16	848,8
4,5	2,595	2,494	3,4	80	5,26	855,9
5	2,569	2,484	3,3	82	5,26	745,1

Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Inicialmente determinou-se um teor de projeto de 4,3% de ligante novo na mistura, teor que atingia 4% de volume de vazios, seguindo os procedimentos de dosagem Marshall. Entretanto, quando se começou a produção das placas, notou-se que a quantidade de ligante asfáltico na mistura era excessiva, já que ela apresentava uma consistência muito fluida no manuseio, dificultando a compactação. Apresentava também um brilho excessivo, indicando que o teor do ligante estava acima do necessário, correndo-se o risco de apresentar um desempenho deficiente enquanto ao ensaio de deformação permanente.

Tendo-se em consideração as razões expostas, resolveu-se baixar o teor de ligante asfáltico de projeto de 4,3% para 4,0%.

4.1.3 Dano por umidade induzida

A avaliação do dano por umidade induzida foi realizada empregando-se o ensaio de Lottman modificado, constante na norma ABNT NBR 15617:2015.

As misturas asfálticas foram produzidas com o respectivo teor de ligante virgem, definido nos procedimentos de dosagem, neste caso 4,0%. A moldagem dos corpos de prova foi realizada no compactador por impacto utilizado na metodologia de dosagem Marshall. Partindo de uma massa específica aparente determinada para atingir 7% de volume de vazios estabelecido como critério para o fim da compactação, foram moldados seis corpos de prova por mistura, sendo que três de cada conjunto foram submetidos ao condicionamento previsto em norma.

Neste ensaio, o resultado de RRT indica que a mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e 4,0% de teor de ligante, apresenta desempenho satisfatório, tendo-se em vista que o valor obtido é superior ao limite estabelecido de 70% segundo a norma ABNT NBR 15617/2015.

Pode-se atribuir esse comportamento satisfatório observado às propriedades químicas do agregado basáltico utilizado na pesquisa, somado a isso, a incorporação de cal hidratada na mistura asfáltica influencia positivamente na adesão do ligante asfáltico ao agregado. Esse

desempenho favorável também foi apontado na pesquisa de Melo (2014), para a mistura de referência com o CAP 50-70, onde essa mistura asfáltica obteve um RRT = 90%.

Ao comparar o RRT = 90% resultante da mistura de referência de Melo (2014), com o RRT = 87,4% que se obteve nesta pesquisa para a mistura com adição de 20% de RAP, pode-se inferir que a adição do RAP dentro da mistura asfáltica, produz pouca ou nula variação do comportamento da mistura frente ao ensaio de dano por umidade induzida.

Na Tabela 14 são apresentados os parâmetros dos corpos de prova moldados para o ensaio de Lottman.

Tabela 14 - Parâmetros dos CPs - Ensaio Lottman.

CP	Condicionado			Não condicionado		
	1	2	3	4	5	6
Altura (cm)	6,5	6,4	6,5	6,5	6,6	6,8
Diâmetro (cm)	10,1	10,2	10,2	10,1	10,2	10,1
Vv (%)	6,7	6,5	6,6	6,6	6,9	6,5
RT (kgf/cm ²)	12,5	10,4	11,5	14,5	12,6	12,3
RT1 (kgf/cm ²)				13,12		
RT2 (kgf/cm ²)				11,47		
RRT (%)				87,4		

Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

4.2 MOLDAGEM E CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE CONCRETO ASFÁLTICO

Essa etapa é referente à moldagem e à caracterização das placas e dos corpos de prova destinados aos ensaios de módulo complexo e de desempenho. Conhecido o volume das placas, a moldagem foi realizada almejando-se que a massa específica aparente correspondesse ao porcentagem de vazios de 4,7%, parâmetro obtido nos procedimentos de dosagem, considerando-se porcentagem de ligante de 4,0%.

4.2.1 Moldagem das placas destinadas ao ensaio de deformação permanente

A moldagem das placas para o ensaio de deformação permanente (50×18×5 cm) foi executada na mesa compactadora LCPC (atual IFSTTAR), utilizando um molde com as dimensões específicas para esse tipo de placa. Na Figura 21 podem ser visualizadas as duas das placas de concreto asfáltico moldadas para o ensaio.

Nesta etapa também foram moldadas duas placas para o ensaio de deformação permanente, da mistura com adição de 20% de RAP e 4,3% de teor de ligante, para confirmar a motivação empírica pelo qual resolveu-se baixar o teor de ligante de 4,3% para 4,0%, como explicado na etapa anterior desta pesquisa.

Figura 21 - Moldagem das placas para ensaio de deformação permanente.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Os parâmetros das placas moldadas de mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e 4,0% de teor de ligante, são apresentadas na Tabela 15. A Tabela 16 apresenta os mesmos parâmetros das placas moldadas de mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e 4,3% de teor de ligante.

Tabela 15 - Caracterização das placas moldadas para ensaio de deformação permanente – Teor 4,0% de ligante.

Identificação	Gmb (g/cm³)	Gmm (g/cm³)	Vv (%)	Espessura média (mm)
DP1	2,49	2,62	4,87	51,61
DP2	2,48	2,62	4,92	51,83

Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Tabela 16 - Caracterização das placas moldadas para ensaio de deformação permanente – Teor 4,3% de ligante.

Identificação	Gmb (g/cm³)	Gmm (g/cm³)	Vv (%)	Espessura média (mm)
DP1	2,50	2,61	4,52	51,80
DP2	2,51	2,61	4,46	51,67

Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Conforme mostra a Tabela 15 e Tabela 16, embora não tenha sido possível atingir as porcentagens de vazios esperadas, as quatro placas moldadas apresentam graus de compactação compatíveis com os limites estabelecidos pela norma brasileira que define a sistemática de execução de camadas de pavimentos flexíveis, DNIT-ES 031/2006.

Constatou-se, durante a moldagem, que o controle das espessuras das placas é uma tarefa de difícil precisão, o que também foi relatado por Melo (2014).

4.2.2 Corpos de prova de concreto asfáltico destinados aos ensaios de módulo complexo e de fadiga.

Inicialmente, foi realizada a moldagem das placas de concreto asfáltico de medidas $60 \times 40 \times 9$ cm, com o auxílio da mesa compactadora LCPC (atual IFSTTAR), segundo o procedimento da norma francesa AFNOR NF P 98-253-1. A compactação forte foi utilizada com o intuito de alcançar a mesma densificação obtida na dosagem Marshall da misturas, na qual se empregou a energia de 75 golpes/face.

A Figura 22 mostra uma das três placas de concreto asfáltico moldadas para o ensaio.

Figura 22 - Compactação de uma placa de concreto asfáltico ($60 \times 40 \times 9$ cm).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Posterior à compactação das placas de concreto asfáltico, foi realizada a serragem de corpos de prova prismáticos.

Na Figura 23 pode-se observar um conjunto com cinco corpos de prova serrados de uma das placas de concreto asfáltico.

Figura 23 - Corpos de prova prismáticos (400,0×50,8×63,5mm) serrados de uma das placas (60×40×9 cm).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Em seguida, determinou-se as dimensões dos corpos de prova e a porcentagem de vazios dos mesmos. Para a determinação dos vazios, foi necessária a obtenção dos parâmetros volumétricos para o cálculo da massa específica aparente dos corpos de prova (G_{mb}), utilizou-se uma balança hidrostática.

Na Tabela 17 são apresentados os resultados referentes à caracterização volumétrica dos corpos de prova prismáticos da mistura com adição de 20% de RAP e 4,0% de teor de ligante, com a respectiva seleção para a realização dos ensaios de Módulo complexo e de fadiga.

Tabela 17 - Caracterização volumétrica dos corpos de prova prismáticos para ensaios de módulo complexo e fadiga.

Identificação	V_v (%)	Ensaio
FRE-CP 1	4,19	Fadiga
FRE-CP 2	4,27	Fadiga
FRE-CP 3	2,99	Rejeitado por %V _v
FRE-CP 4	4,04	Módulo complexo + Fadiga
FRE-CP 5	4,51	Fadiga
FRE-CP 6	4,22	Fadiga
FRE-CP 7	4,16	Fadiga
FRE-CP 8	3,82	Fadiga
FRE-CP 9	3,65	Fadiga
FRE-CP 10	3,26	Rejeitado por %V _v
FRE-CP 11	3,68	Rejeitado por Geometria
FRE-CP 12	4,08	Módulo complexo + Fadiga
FRE-CP 13	3,89	Fadiga
FRE-CP 14	3,69	Rejeitado por Geometria
FRE-CP 15	4,50	Fadiga

Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

4.3 ETAPA 5 - AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO REOLÓGICO E DESEMPENHO MECÂNICO

Nas seções seguintes serão apresentados e discutidos os resultados referentes ao ensaio de desempenho mecânico – deformação permanente e aos ensaios de comportamento reológico - módulo complexo e fadiga, empregados para caracterizar o desempenho da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e 4% de teor de ligante.

4.3.1 Desempenho à deformação permanente da mistura asfáltica

Para a avaliação da resistência das misturas asfálticas à deformação permanente, as placas de concreto asfáltico foram submetidas ao ensaio de simulação de tráfego, executado com o auxílio do equipamento francês *Orniéreur*.

Na Figura 24 pode ser visualizada uma placa de concreto asfáltico durante o ensaio de deformação permanente e na Figura 25 são expostas as duas placas ensaiadas após aplicação de 30000 ciclos.

Figura 24 - Placa de concreto asfáltico desta pesquisa durante ensaio de deformação permanente no simulador de tráfego francês *Orniéreur*



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Figura 25 - Placas de mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e 4,0% de teor de ligante, após ensaio no simulador de tráfego.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

O desempenho das misturas de concreto asfáltico frente à deformação permanente foi quantificado em termos do afundamento na trilha de roda, verificado em ciclos pré-estabelecidos de passagem do eixo de roda simples, sendo que a mistura asfáltica foi representada por duas placas. A Tabela 18 e Tabela 19 apresentam os resultados do afundamento em cada placa, para os conjuntos pré-definidos de ciclos de carregamento, em relação, à espessura das placas de concreto asfáltico com adição de 20% de RAP e 4,0% de teor de ligante.

Tabela 18 - Afundamento para cada conjunto de ciclos de carregamento pré-definido: Placa direita.

Placa Direita						
Altura Placa 0 Ciclos (mm)	Altura Placa 100 Ciclos (mm)	Altura Placa 300 Ciclos (mm)	Altura Placa 1000 Ciclos (mm)	Altura Placa 3000 Ciclos (mm)	Altura Placa 10000 Ciclos (mm)	Altura Placa 30000 Ciclos (mm)
51,32	50,33	49,84	49,32	48,64	48,06	47,33
Afundamento Máximo Permissível			Afundamento Máximo Alcançado na Trilha de Roda			
5,13 mm			3,98 mm			
10,00%			7,76%			

Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

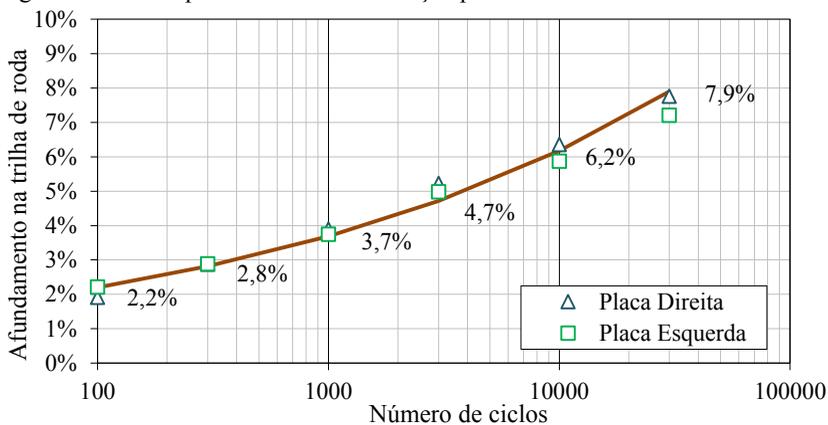
Tabela 19 - Afundamento para cada conjunto de ciclos de carregamento pré-definido: Placa esquerda.

Placa Esquerda						
Altura Placa 0 Ciclos (mm)	Altura Placa 100 Ciclos (mm)	Altura Placa 300 Ciclos (mm)	Altura Placa 1000 Ciclos (mm)	Altura Placa 3000 Ciclos (mm)	Altura Placa 10000 Ciclos (mm)	Altura Placa 30000 Ciclos (mm)
50,92	49,79	49,45	49,01	48,38	47,93	47,25
Afundamento Máximo Permissível			Afundamento Máximo Alcançado na Trilha de Roda			
5,09 mm			3,67 mm			
10,00%			7,20%			

Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Os valores de afundamento na trilha de roda são expostos na Figura 26, correspondem às retas de regressão das duas placas da mistura asfáltica desta pesquisa.

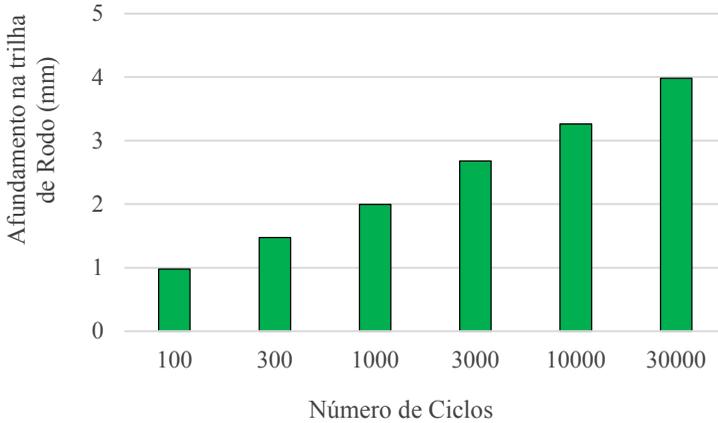
Figura 26 - Desempenho frente à deformação permanente das misturas asfálticas.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

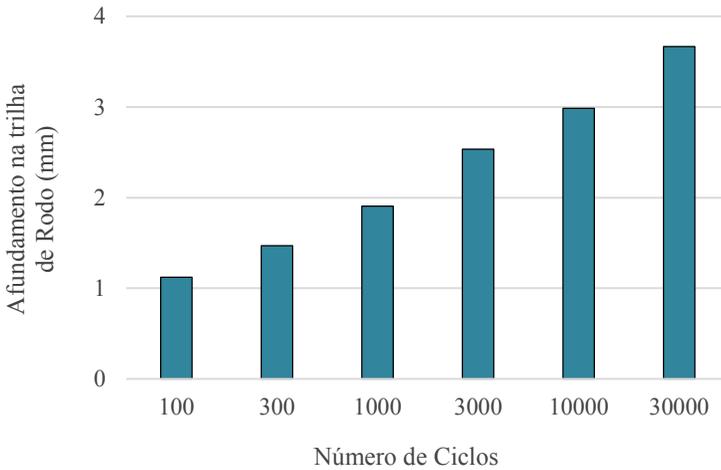
A Figura 27 e Figura 28 apresentam a evolução dos afundamentos de trilha de roda nas placas ensaiadas, respectivamente placa direita e placa esquerda.

Figura 27 - Evolução do afundamento: Placa direita.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Figura 28 - Evolução do afundamento: Placa esquerda.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2016).

Como se mencionou na etapa anterior desta pesquisa, além das placas moldadas da mistura com adição de 20% de RAP e 4,0% de teor de ligante adicionado, também foram moldadas duas placas da mistura com adição de 20% de RAP e 4,3% de teor de ligante, para serem ensaiadas à deformação permanente, para confirmar a motivação empírica (risco de apresentar um desempenho deficiente enquanto ao ensaio de deformação permanente), pelo qual resolveu-se baixar o teor de ligante de 4,3% a 4,0%.

Os afundamentos médios em relação à altura da placa foram os seguintes.

- Mistura com 20% de RAP e teor de ligante 4,0% → **7,48%**.
- Mistura com 20% de RAP e teor de ligante 4,3% → **8,99%**.
- Mistura de Melo (2014), e teor de ligante 4,35% → **9,50%**.

Analisando-se os resultados obtidos, destaca-se a diferença entre os afundamentos das duas misturas asfálticas, no caso a mistura asfáltica de referência desenvolvida por Melo (2014), que deu como resultado 9,5% de afundamento e a mistura com adição de 20% de RAP e 4,0% de teor de ligante, estudada nesta pesquisa, que deu como resultado 7,48% de afundamento, ou seja, mesmo com adição do RAP a mistura demonstrou melhor desempenho à deformação permanente.

Em referência às especificações, as misturas asfálticas atenderam ao critério estabelecido pela especificação francesa, a qual limita a deformação permanente em 10% para rodovias de tráfego pesado.

Quanto à mistura com adição de 20% de RAP e 4,0% de teor de ligante e a mistura com adição de 20% de RAP e 4,3% de teor de ligante, embora ambas misturas tenham mostrado resultados dentro do limite permitido para a deformação permanente, a redução do teor de ligante da mistura de 4,3% para 4,0%, foi justificada, considerando que a mistura com 4% de teor de ligante apresentou melhor desempenho à deformação permanente que a mistura com 4,3% de teor de ligante, que deu como resultado um valor próximo ao limite permitido no ensaio.

4.3.2 Comportamento reológico das misturas asfálticas

O comportamento reológico da mistura asfáltica foi caracterizado por meio do ensaio de módulo complexo, realizado no aparato 4 pontos. Foram ensaiados dois corpos de prova prismáticos, sendo os resultados os expostos correspondentes à média dos valores obtidos do conjunto. Os corpos de prova prismáticos ensaiados a módulo complexo foram os seguintes:

- Mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e 4,0% de teor de ligante adicionado: FRE-CP 4 ($V_v = 4,04\%$);
- Mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e 4,0% de teor de ligante adicionado: FRE-CP 12 ($V_v = 4,08\%$).

A Tabela 20 apresenta os valores de módulo complexo e ângulo de fase resultantes do ensaio.

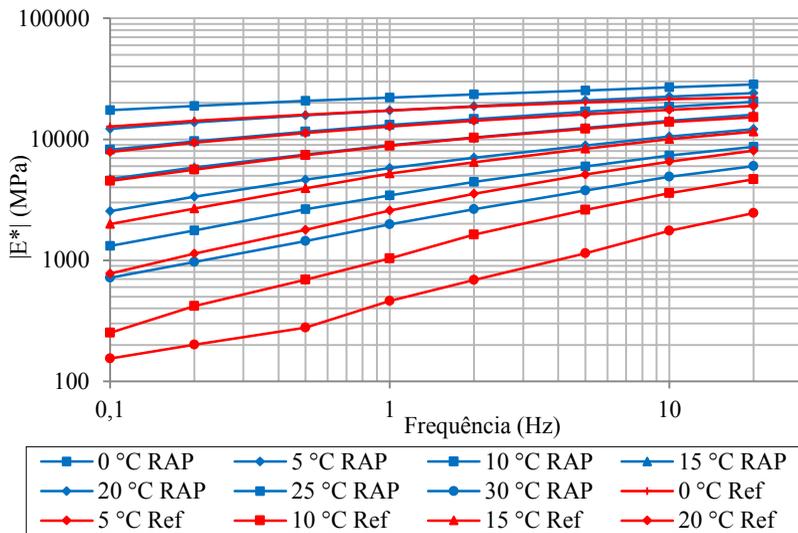
Tabela 20 - Resultados de módulo complexo e ângulo de fase para a mistura com adição de 20% de RAP e 4% de teor de ligante adicionado.

Módulo Complexo E* (MPa)							
f (Hz)	T= 0°C	T= 5°C	T=10°C	T= 15°C	T= 20°C	T= 25°C	T= 30°C
0,1	17437,5	12239,5	8184,5	4692,5	2539	1311	715,5
0,2	18844	13816,5	9597,5	5865	3355	1768	966,5
0,5	20810	15822	11556	7478	4631,5	2643,5	1445
1	22145	17261	13106,5	8919,5	5795,5	3434,5	1983,5
2	23453	18766	14681,5	10365	7031	4439	2647,5
5	25287	20890,5	16878,5	12434	8902	5948	3775,5
10	26865	22500	18564	14244,5	10562,5	7354	4887,5
20	28433,5	24107,5	20373	15986	12137,5	8666,5	5988,5
Ângulo de fase δ (°)							
f (Hz)	T= 0°C	T= 5°C	T=10°C	T= 15°C	T= 20°C	T= 25°C	T= 30°C
0,1	9,8	14,45	20,35	27,9	34,8	40,65	42,1
0,2	8,45	12,7	18,1	25,25	32,45	39,15	42,45
0,5	6,85	10,65	15,5	22,2	28,95	36,05	41,25
1	6,25	9,5	13,75	19,65	26,15	33,35	39,65
2	5,55	8,55	12,35	17,6	23,6	30,5	37,15
5	4,7	7,35	10,65	15,15	20,55	26,75	33,7
10	3,9	6,5	9,3	13,35	18,1	24,05	31
20	2,65	5,5	8,35	12	16,25	21,2	28,7

Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

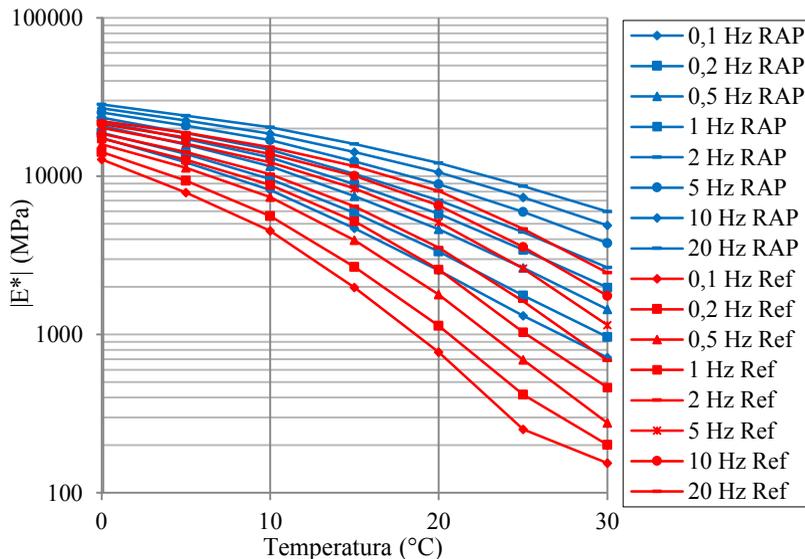
A partir dos resultados obtidos com o ensaio de módulo complexo, foram elaborados gráficos que explicitam as características reológicas da mistura por meio de isotermas e isócronas, as que são comparadas com os resultados da mistura de referência de Melo (2014), expostas na Figura 29 e na Figura 30.

Figura 29 - Isotermas da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e da mistura de referência de Melo (2014).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Figura 30 - Isócronas da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e da mistura de referência de Melo (2014).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Sabendo-se que o ligante asfáltico é um material termossuscetível e que a sua consistência se reduz com o aumento da temperatura, a isoterma da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP deveria apresentar maiores defasagens com o aumento da temperatura.

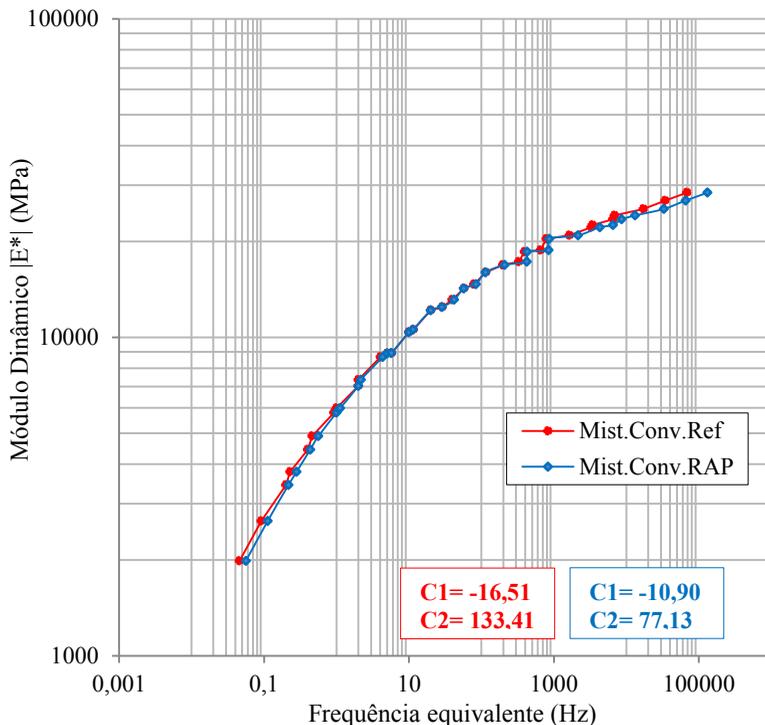
Salienta-se também que, à medida que se aumenta a temperatura, o módulo complexo da mistura torna-se mais suscetível à variação da frequência de carregamento. Em termos numéricos, enquanto o módulo complexo da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP aumentou 63,1% – entre a frequência de 0,1 e 20 Hz na temperatura de 0°C – a mesma mistura demonstrou um ganho de 737% no valor do módulo complexo na temperatura de 30°C. Como as inclinações das curvas isotermas da mistura asfáltica são aparentemente similares, pode-se dizer que o tempo de carregamento produz os mesmos efeitos no comportamento reológico do material.

Observando-se as curvas isócronas da figura 30, nota-se a redução do módulo complexo com o aumento da temperatura de ensaio. Evidencia-se, também, a redução da suscetibilidade térmica à medida que se aumenta a frequência de carregamento. Para a mistura asfáltica com adição de 20% de RAP, a redução de módulo complexo entre as temperaturas de 0 e 30°C foi de 78,94%, para a frequência de 20 Hz, enquanto que para a frequência de 0,1 Hz a redução foi de 95,9%.

Com o intuito de caracterizar o comportamento reológico das misturas asfálticas em um espectro de frequências bastante amplo, o princípio da superposição tempo-temperatura foi empregado para combinar os efeitos desses importantes parâmetros. Foi elaborada a curva mestra no domínio das frequências, após a obtenção das constantes C1 e C2 da equação de Williams-Landel-Ferry (Equação 11), necessárias para o cálculo do fator de translação horizontal correspondente à temperatura de referência (TR).

Na Figura 31 são apresentadas as curvas mestras da mistura asfálticas de referência de Melo (2014) e a mistura com adição de 20% de RAP na temperatura de referência de 20°C, assim como os valores das constantes C1 e C2.

Figura 31 - Curvas mestras da mistura de referência de Melo (2014) e a mistura com adição de 20% de RAP.

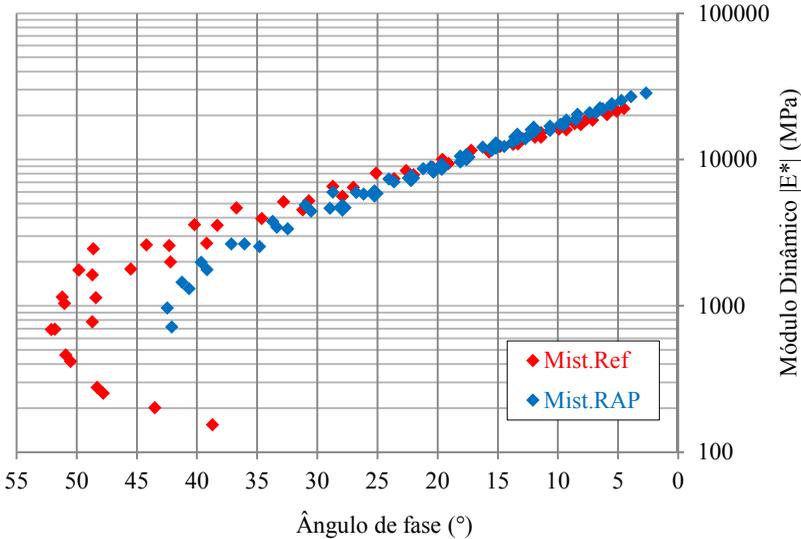


Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Observando-se a Figura 31, nota-se quase uma completa semelhança entre ambas curvas mestras da mistura asfáltica de referência de Melo (2014), no que tange aos valores de rigidez, principalmente para valores intermediários de frequência de carregamento. Para valores de frequência extremamente altos e baixos, os valores de módulo complexo das misturas comparadas são também praticamente os mesmos.

Na Figura 32 é apresentado o espaço de Black para a mistura de referência de Melo (2014) e a mistura com adição de 20% de RAP. O espaço de Black relaciona todos os ângulos de fase com os respectivos valores de módulo complexo, obtidos no espectro de frequência e temperatura empregado na análise do comportamento reológico dos materiais.

Figura 32 - Espaço de Black da mistura asfáltica de referência de Melo (2014) e a mistura com adição de 20% de RAP.



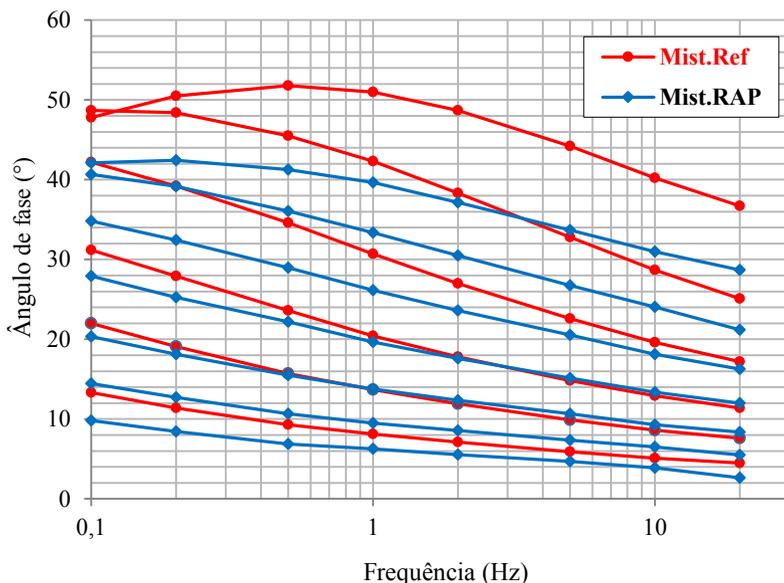
Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

A partir da Figura 32, pode-se notar o encurtamento do espaço de Black da mistura com adição de 20% de RAP em relação à mistura de referência de Melo (2014), para valores reduzidos de módulo complexo. No entanto, constata-se quase um número igual de observações de valores baixos de ângulo de fase para as misturas comparadas.

Com o intuito de analisar o fenômeno citado com mais clareza, foram elaboradas curvas isotermas que relacionam o ângulo de fase com a frequência de carregamento, expostas na Figura 33, onde pode-se observar que os valores de ângulo de fase obtidos para a mistura com adição de 20% de RAP são menores que os valores da mistura de referência de Melo (2014). Em razão disso, evidencia-se o encurtamento do espaço de Black da mistura com adição de 20% de RAP, tendo em vista que o valor do módulo complexo é reduzido em temperaturas elevadas. Essa característica reflete na resposta do material aos carregamentos impostos, sendo que quanto menor o ângulo de fase, mais predominante é a componente elástica do módulo complexo.

A partir de certa temperatura, o comportamento reológico das misturas asfálticas é alterado, de modo que o aumento da frequência de carregamento induz a ângulos de fase maiores, até certo ponto.

Figura 33 - Isotermas do ângulo de fase em função da frequência de carregamento da mistura asfáltica de referência de Melo (2014) e a mistura com adição de 20% de RAP.



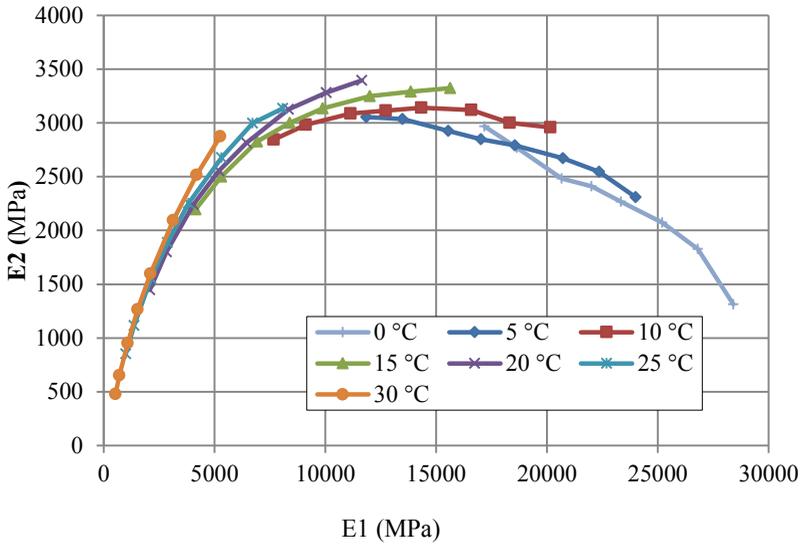
Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Para avaliar as componentes do módulo complexo, foram elaborados planos complexos (planos Cole-Cole) e gráficos que apresentam a evolução das componentes real e imaginária, com a variação da temperatura.

A análise do plano complexo permite verificar a situação na qual ocorre máxima dissipação de energia, que corresponde à maior componente viscosa ($E_2 = |E^*| \text{sen } \delta$) observada.

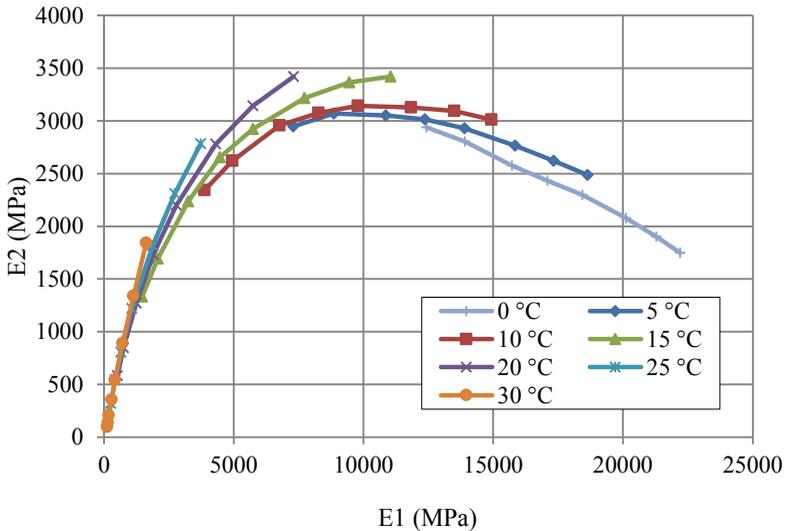
Na Figura 34, Figura 35 e na Figura 36 são apresentados os planos complexos da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP, da mistura asfáltica de referência de Melo (2014) e mistura asfáltica convencional extraída de campo de Santos (2016), respectivamente.

Figura 34 - Plano complexo da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP.



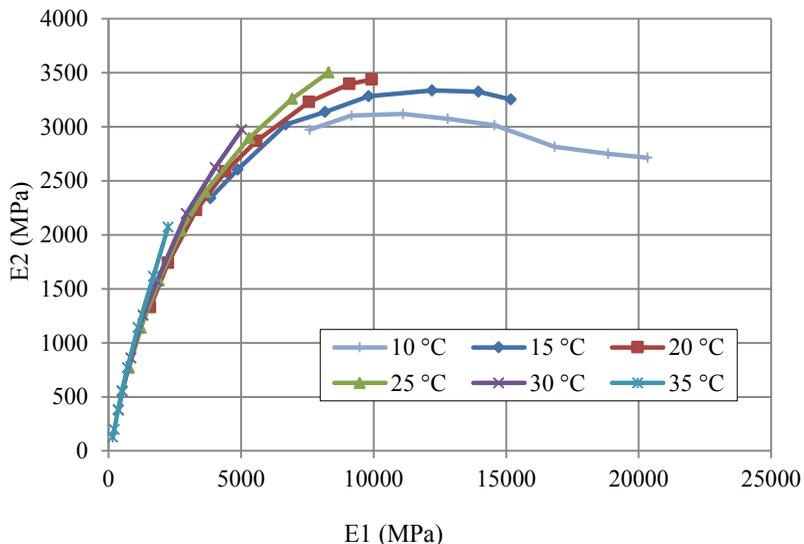
Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Figura 35 - Plano complexo da mistura asfáltica de referência (Melo, 2014).



Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Figura 36 - Plano complexo da mistura asfáltica da mistura asfáltica convencional extraída de campo (Santos, 2016).



Fonte: Adaptado de Santos (2016).

Com base nos planos complexos evidenciados na Figura 34, Figura 35 e na Figura 36, pode-se afirmar que, a temperatura onde se ocasiona a maior dissipação de energia por ciclo de carregamento em decorrência da observação da componente viscosa, para a mistura asfáltica com adição de 20 % de RAP é 20°C, para a mistura de referência de Melo (2014) é 15°C e para a mistura asfáltica convencional extraída de campo de Santos (2016) é 20°C.

Para a mistura asfáltica de referência de Melo (2014), verifica-se que a maior dissipação de energia por ciclo de carregamento ocorre na temperatura entre 15°C e 20°C.

Os pontos destacados contrastam os valores da componente viscosa da temperatura a qual ocorre a maior dissipação de energia e da temperatura em que foi realizado o ensaio de resistência à fadiga (20°C). Assim sendo, caso a temperatura dos ensaios de resistência à fadiga fosse estabelecida em 15°C, o número de ciclos até a falha seria maior, e conseqüentemente, os ensaios durariam mais tempo do que na temperatura de 20°C.

4.3.3 Resistência à fadiga das misturas asfálticas

O desempenho à fadiga das três misturas asfálticas foi avaliado com a utilização do aparato 4 pontos.

A temperatura de ensaio desta pesquisa foi estabelecida em 20°C e a frequência de carregamento foi definida em 10 Hz, valor correspondente à velocidade de tráfego de 72 km/h.

Os ensaios foram conduzidos sob pulsos de carga sinusoidais e modo de carregamento de deformação controlada, sendo que o critério de ruptura adotado foi a redução do módulo complexo inicial em 50%. Este, por sua vez, foi determinado no centésimo ciclo de carregamento.

A Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23 apresentam a deformação imposta e os resultados obtidos a partir do ensaio de resistência à fadiga da mistura asfálticas com adição de 20% de RAP, da mistura asfáltica de referência de Melo (2014) e da mesma mistura convencional porém extraída de campo de Santos (2016), respectivamente.

Tabela 21 - Resultados do ensaio resistência à fadiga da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP (T = 20°).

Identificação	Deformação específica de tração inicial	N Ciclos
RAP 05	252	27719
RAP 03	234	31901
RAP 13	203	106003
RAP 02	152	282205
RAP 11	305	11412
RAP 15	183	140341
RAP 12	133	439404
RAP 01	102	1196308
RAP 07	123	1196604
RAP 10	213	121893
RAP 08	140	700000

Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Tabela 22 - Resultados do ensaio resistência à fadiga da mistura asfáltica de referência de Melo (2014) (T = 15°).

Identificação	Deformação específica de tração inicial	N Ciclos
Convencional 1.1	80	1373179
Convencional 2.1	100	493593
Convencional 1.3	100	556334
Convencional 3.3	100	332601
Convencional 3.1	100	399217
Convencional 1.4	100	423524
Convencional 3.5	150	62265
Convencional 2.5	150	62532
Convencional 2.4	150	46236
Convencional 2.3	200	19788
Convencional 1.5	200	15921
Convencional 1.2	300	4734
Convencional 2.2	300	4461
Convencional 3.2	300	4870
Convencional 3.4	300	3653

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Tabela 23 - Resultados do ensaio resistência à fadiga da mistura asfáltica convencional extraída de campo de Santos (2016) (T = 20°).

Identificação	Deformação específica de tração inicial	N Ciclos
Convencional Campo 1	235	9801
Convencional Campo 2	151	69560
Convencional Campo 3	259	4688
Convencional Campo 4	225	10155
Convencional Campo 5	203	15880
Convencional Campo 6	152	59097
Convencional Campo 7	173	16101
Convencional Campo 8	102	206510
Convencional Campo 9	92	949810
Convencional Campo 10	103	166234
Convencional Campo 11	82	470481
Convencional Campo 12	152	59097
Convencional Campo 13	203	19495
Convencional Campo 14	236	10732

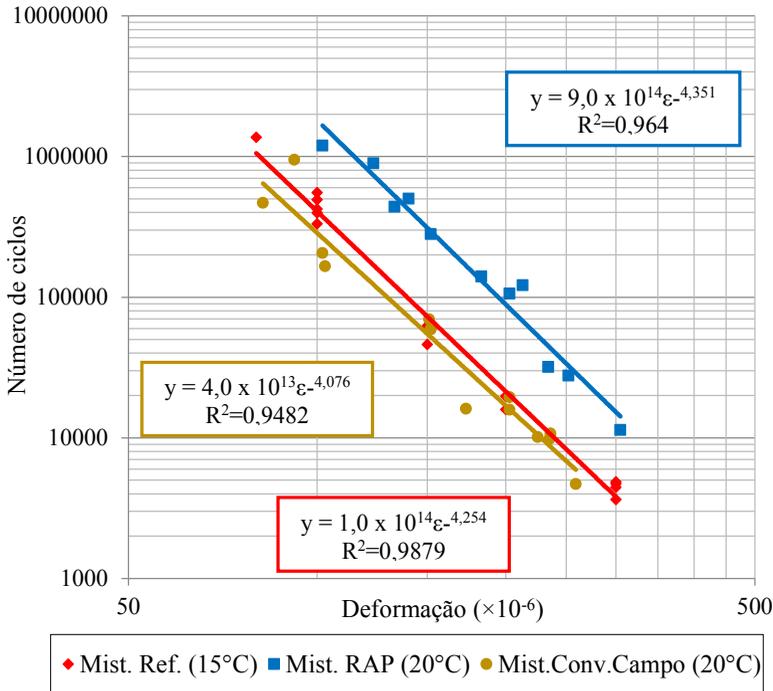
Fonte: Adaptado de Santos (2016).

Na Figura 37, são apresentadas as curvas de fadiga das misturas, assim como os respectivos coeficientes de correlação (R^2). Conforme a Figura 37, observa-se uma maior resistência à fadiga da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP, em relação à mistura asfáltica de referência de Melo (2014) e à mesma mistura asfáltica convencional porém extraída de campo de Santos (2016). Essa superioridade é notável e mantida em

decorrência da inclinação das curvas de fadiga, desde valores de deformação baixos até os maiores às que foram submetidos os corpos de prova prismáticos das misturas comparadas.

O melhor desempenho à fadiga demonstrado pela mistura asfáltica com adição de 20% de RAP, o que de certa forma foi uma surpresa, se deve à predominância da componente elástica do módulo complexo durante o ensaio de vida de fadiga e, portanto, à menor dissipação de energia por ciclo de carregamento. Quanto menor for o ângulo de fase observado para um corpo de prova de concreto asfáltico, maior será a dominância da componente elástica sobre a componente viscosa, e isto aumenta a vida de fadiga.

Figura 37 - Curvas de fadiga da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e da mistura de referência de Melo (2014), (T = 20°C).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

4.4 SIMULAÇÃO DE ESTRUTURA DE PAVIMENTO URBANO

4.4.1 Pré-dimensionamento da Estrutura

Para o pré-dimensionamento da estrutura para uma via urbana da cidade de Florianópolis, empregou-se o método do DNER/81. Foi considerado $N_{8,2t}$ (USACE) igual a 1×10^6 e um CBR de projeto de 9%.

4.4.2 Simulação Viscoroute

As simulações numéricas conduzidas neste trabalho foram realizadas com o *software* ViscoRoute 2.0. Com o intuito de considerar o comportamento viscoelástico do concreto asfáltico nas simulações numéricas, foi necessária a determinação dos parâmetros viscoelásticos do modelo de Huet-Sayegh. Os parâmetros foram calculados por meio de iterações, utilizando o *software* Viscanalyse, desenvolvido pelo LCPC, a partir do estudo do comportamento reológico da mistura. O ajuste dos respectivos dados experimentais é ilustrado na Figura 38 e Figura 39.

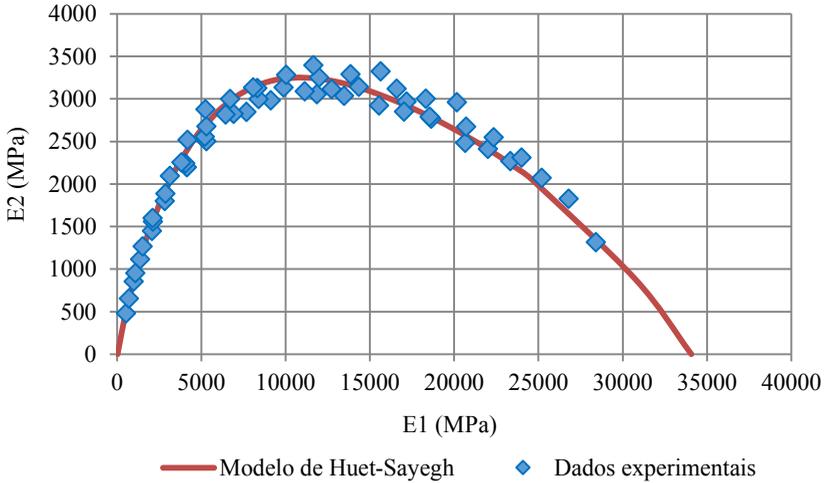
Os parâmetros obtidos para a mistura asfáltica com adição de 20% de RAP, para a mistura asfáltica de referência de Melo (2014) e para a mistura convencional extraída de campo de Santos (2016), são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Parâmetros reológicos do modelo de Huet-Sayegh obtidos para as diferentes misturas asfálticas.

Parâmetros	Mist. de referência	Mist. 20% RAP	Mist.Conv.Campo
E_0 (MPa)	56,253	29,8427	76,5434
E_∞ (MPa)	28499,2	34073,3	29238,2
ν	0,3	0,3	0,3
δ	2,24483	1,97055	2,7081
k	0,22896	0,18278	0,24856
h	0,68772	0,55686	0,6854
A0	3,61263	4,07445	5,89107
A1	-0,474064	-0,441499	-0,4364
A2	0,0030196	0,0025642	0,00204

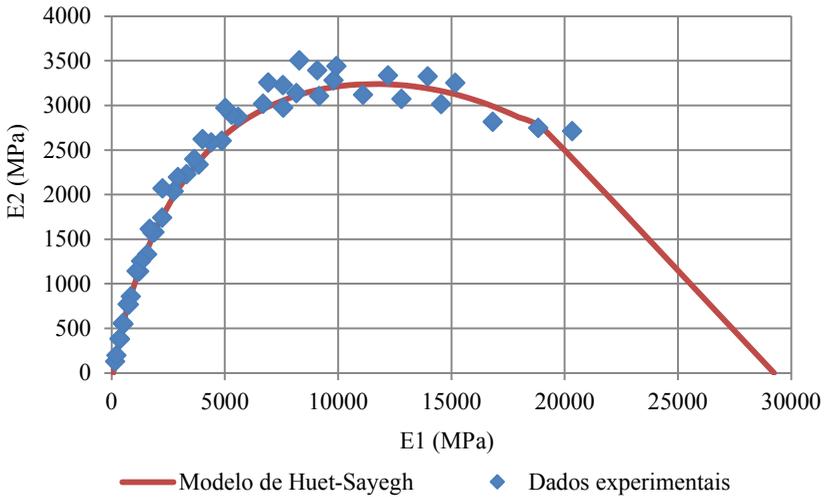
Fonte: Elaborado pelo Autor (2017), com dados de Melo (2014) e Santos (2016).

Figura 38 - Modelo de Huet-Sayegh ajustado para os dados experimentais da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Figura 39 - Modelo de Huet-Sayegh ajustado para os dados experimentais da mistura asfáltica convencional extraída de campo de Santos (2016).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

A partir dos parâmetros viscoelásticos de Huet-Sayegh, foram realizadas simulações de estruturas de pavimento com a mistura asfáltica

estudada. Para isso, foram considerados os efeitos do tempo de carregamento ($v = 72 \text{ km/h}$) e da temperatura da camada de revestimento asfáltico ($T = 20^\circ\text{C}$).

Os parâmetros elásticos das camadas de base, sub-base e subleito foram considerados iguais àqueles obtidos por Melo (2014), e são apresentados na Tabela 25.

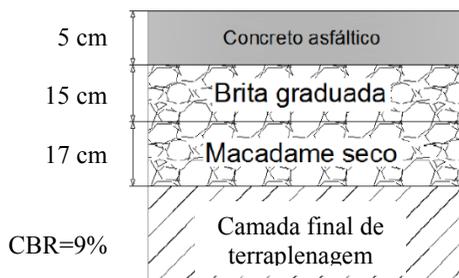
A primeira estrutura de pavimento simulada corresponde a uma rua urbana comum, está é apresentada na Figura 40. As simulações tiveram como objetivo comparar as deformações específicas de tração na fibra inferior das camadas de revestimento, contemplando as diferentes misturas asfálticas.

Tabela 25 - Parâmetros elásticos das camadas de base, sub-base e subleito.

Camada	Módulo (MPa)	Coefficiente de Poisson
Base - Brita graduada	260	0,35
Sub-base - Macadame seco	210	0,35
Subleito	180	0,35

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Figura 40 - Esquema da estrutura de pavimento simulado

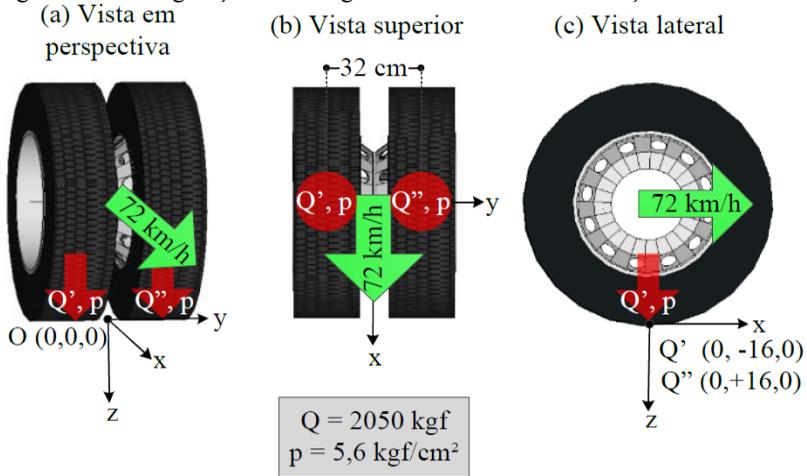


Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

O carregamento aplicado foi do semieixo do eixo padrão de 8,2tf, com aplicação de 2050 kgf por roda, pressão de enchimento dos pneus de 5,6 kgf/cm². A configuração deste carregamento é ilustrada na Figura 41.

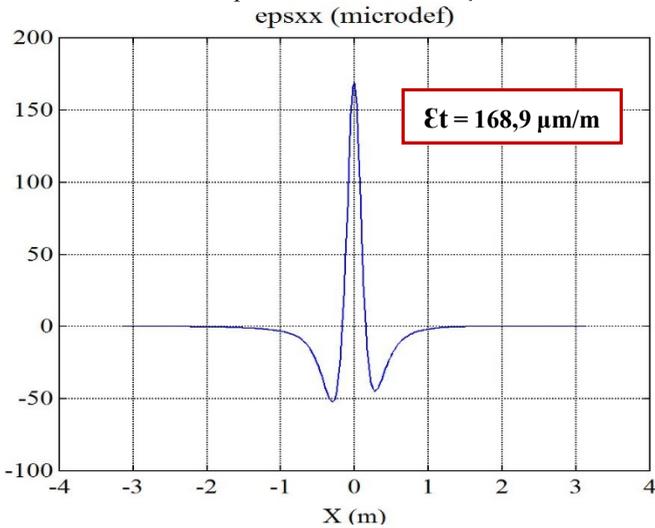
Na Figura 42, Figura 43 e na Figura 44, podem ser observados os resultados das simulações numéricas no ponto médio entre as rodas com a movimentação do carregamento, no que tange à deformação específica na face inferior da camada de revestimento asfáltico.

Figura 41 - Configuração do carregamento adotado nas simulações.



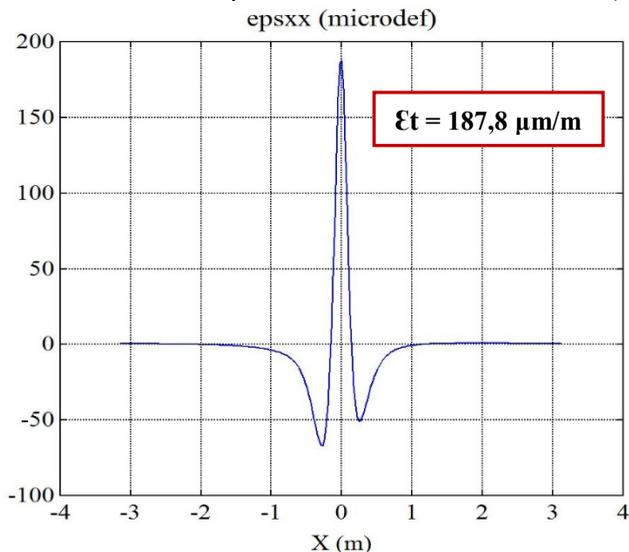
Fonte: Carlesso (2017).

Figura 42 - Resultado de deformação específica na face inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura com adição de 20% de RAP.



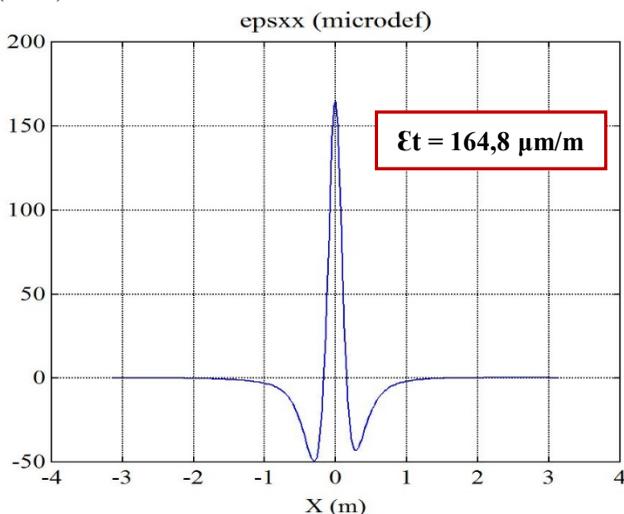
Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Figura 43 - Resultado de deformação específica na face inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura de referência de Melo (2014).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Figura 44 - Resultado de deformação específica na face inferior da camada de revestimento asfáltico para a mistura convencional extraída de campo de Santos (2016).



Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Como pode ser visto nas figuras em que o carregamento se aproxima do ponto $X=0$, originam-se tensões de compressão. Quando o carregamento chega ao ponto $(0,0)$, ocorre o valor máximo de deformação específica de tração.

Os resultados das simulações numéricas mostram que a mistura asfáltica com adição de 20% de RAP apresenta menor deformação específica de tração na face inferior da camada de revestimento asfáltico com respeito a mistura de referência de Melo (2014). Essa constatação pode estar atrelada a elevados valores do módulo dinâmico demonstrados pela mistura em relação à mistura de referência de Melo (2014).

Na estimativa da vida útil da camada de revestimento asfáltico quanto ao critério de ruptura por fadiga, foram considerados os modelos de fadiga apresentados na seção anterior desta pesquisa, para a temperatura de 20°C. Na Tabela 26, podem ser visualizados os modelos de fadiga, estimativas de vida útil, as deformações específicas de tração e a estimativa de vida útil do revestimento para cada mistura asfáltica, em termos de solicitações do eixo padrão de 8,2 toneladas, calculada a partir das equações de fadiga.

Tabela 26 - Resultados das simulações numéricas e previsão da vida útil à fadiga dos revestimentos.

Revestimento	Prof. (cm)	Microdeformação específica de tração ($\mu\epsilon$)	Modelo de fadiga	Número de ciclos ($N_{8,2t}$)
Mist. com 20% de RAP	5,0	168,9	Pérez (2017)	$1,81 \times 10^5$
Mist. de referência	5,0	187,8	Melo (2014)	$2,87 \times 10^4$
Mist. Conv. de campo	5,0	164,8	Santos (2016)	$3,67 \times 10^4$

Fonte: Elaborado pelo Autor (2017).

Analisando os resultados apresentados na Tabela 26, nota-se que a mistura asfáltica com adição de 20% de RAP foi a que apresentou a maior estimativa de vida útil para o revestimento asfáltico, superior à mistura asfáltica de referência de Melo (2014) e à mistura convencional extraída de campo de Santos (2016). Relativamente a mistura asfáltica com adição de 20% de RAP apresenta vida útil do revestimento 5,3 vezes maior que a mistura asfáltica de referência de Melo (2014) e em comparação com a mistura convencional Extraída de campo de Santos (2016) é 3,9 vezes maior. Entretanto, ainda assim não atenderia ao tráfego de projeto, necessitando que fosse aumentada a espessura do revestimento asfáltico.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

Essa pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento mecânico e reológico de uma mistura asfáltica, dosada com a incorporação de 20% de material RAP, proveniente da fresagem de revestimentos asfálticos nos trabalhos de manutenção de vias urbanas da cidade de Florianópolis, indicando o seu potencial para ser reutilizado na construção de uma nova mistura asfáltica.

A partir da realização do programa experimental deste trabalho, pôde-se analisar, principalmente, o dano por umidade induzida, desempenho à deformação permanente, comportamento reológico, resistência à fadiga da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP desta pesquisa e da mistura asfáltica de referência desenvolvida por Melo (2014).

Durante a etapa de dosagem, determinou-se o teor de 4,3% de ligante asfáltico na mistura, teor que atingia 4% de volume de vazios seguindo os procedimentos de dosagem Marshall. Posteriormente, este teor obtido foi diminuído a 4% devido a que no momento em que se começou a moldagem de placas, notou-se que a quantidade de ligante asfáltico dentro da mistura era excessiva, já que a mistura apresentava uma textura fluida e brilhante no manuseio e compactação. Foram moldadas duas placas da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP e teor de ligante de 4,3%, os resultados do ensaio de deformação permanente destas placas apresentaram deformação muito próxima ao limite permitido por norma.

Em relação ao ensaio de dano por umidade induzida, ao se comparar o RRT = 90% obtido da mistura asfáltica referência de Melo (2014), com o RRT = 87,4% da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP obtida nesta pesquisa, pode-se inferir que a adição de 20% de RAP dentro da mistura asfáltica produz pouca ou variação quase nula na resistência da mistura de frente à ação da água. Cabe salientar que a mistura asfáltica com adição de RAP apresentou uma resistência à tração consideravelmente superior ao exigido por norma.

Em relação ao comportamento reológico da mistura asfáltica com adição RAP, a adição de 20% de RAP aumentou o $|E^*|$ e diminuiu o ângulo de fase. Isto fez com que os valores máximos de E2 (parcela viscosa) ficasse muito parecido com os obtidos por Melo (2014), porém com um aumento da parcela elástica E1. Isto evidencia que se poderia

esperar que a mistura asfáltica com adição de 20% de RAP, apresentasse uma menor deformação permanente e maior resistência à fadiga, como de fato ocorreu.

No que tange à resistência à deformação permanente, destaca-se a diferença entre os afundamentos das duas misturas asfálticas. No caso a mistura asfáltica desenvolvida por Melo (2014), que deu como resultado 9,5% de afundamento e a mistura asfáltica com adição de 20% de RAP estudada nesta pesquisa, deu como resultado 7,4% de afundamento, ou seja, mesmo com adição do RAP a mistura asfáltica demonstrou melhor desempenho à deformação permanente. Estes resultados estão condizentes com o comportamento reológico da mistura.

Quanto à resistência à fadiga, observa-se uma maior resistência à fadiga da mistura asfáltica com adição de 20% de RAP, em relação à mistura asfáltica de referência de Melo (2014). Os valores obtidos no desempenho a fadiga remetem à predominância da componente elástica do módulo complexo durante o ensaio de vida de fadiga e, portanto, à menor dissipação de energia por ciclo de carregamento. Quanto menor for o ângulo de fase observado para um corpo de prova de concreto asfáltico, maior será a dominância da componente elástica sobre a componente viscosa. Há que se ressaltar, que na mistura com adição de RAP, o RAP leva para a mistura um teor de ligante, que embora envelhecido, deve dar uma contribuição para melhorar o desempenho à fadiga da mistura.

A estimativa de vida útil dos revestimentos asfálticos mostrou que o ganho em termos de vida de serviço, em relação à mistura asfáltica com adição de 20% de RAP foi 5,3 vezes mais do que a mistura asfáltica de referência que desenvolveu Melo (2014), em função da simulação feita no software Visoroute. Ressalta-se que a estrutura dimensionada pelo método DNER/81 para o tráfego estimado deveria ter a sua espessura de revestimento aumentado.

Então, considerando todas as análises dos resultados desta pesquisa, pode-se concluir que a utilização de 20% de RAP na produção de uma mistura asfáltica, pode apresentar desempenho igual ou melhor que um mistura asfáltica projetada com 100% de agregados virgens. Os resultados desta pesquisa mostram ainda que com esta mistura, se teria uma redução de 0,3 % no teor de ligante e 20% na quantidade de agregados virgens.

Por último, após o desenvolvimento o com os resultados obtidos desta pesquisa, espera-se motivar futuras implantações que envolvam o nobre aproveitamento do RAP.

5.2 RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho de pesquisa, não se fez referência ao estudo do ligante envelhecido e como ele poderia ser rejuvenescido. Tal método de pesquisa foi assim conduzido porque na imensa maioria das prefeituras em que a reciclagem do material fresado de revestimento asfáltico for implementada, este tipo de avaliação dificilmente poderá ser realizado. O provável que irá ocorrer é fazer a dosagem pelo procedimento Marshall, com ajuste de um teor de ligante para dar trabalhabilidade à mistura, como foi feito nesta dissertação.

Para trabalhos futuros recomenda-se:

- Melhorar o procedimento de dosagem da mistura, verificando-se a influência da variabilidade do teor de ligante no RAP, e a sua condição de envelhecimento nas propriedades da mistura.
- Realizar a modificação da granulometria do RAP.
- Recuperar o CAP envelhecido para avaliar o comportamento reológico. É possível que no depósito onde se buscou o RAP para esta pesquisa, houvesse alguma porcentagem de RAP com polímero o que poderia justificar o aumento da resistência à fadiga da mistura estudada. Também, através da reologia, pode-se acrescentar agente rejuvenescedor avaliar se a recuperação do ligante contido no RAP poderia melhorar o desempenho da mistura ou mesmo reduzir o teor de CAP novo na mistura.
- Realizar pesquisas que envolvam maiores taxas de adição de RAP.

6 REFERÊNCIAS

AASHTO - **Pavement Recycling Fundamentals**. AASHTO - Guide for Design of Pavements Structures, Volume 2 - Washington, 2001.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9935: Agregados: Terminologia. Rio de Janeiro, 2005.

AIPCR, COMITÉ TECHNIQUE AIPCR. **Chaussées Routières, Recyclage des chaussées**. Guide pour le recyclage à chaud en centrale des enrobés bitumineux, 2003.

ALVIM, I.M. **Fresagem & Reciclagem de Pavimentos e Suas Aplicações na Restauração de Rodovias**, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM

Road And Paving Materials Veicle. Pavement Systems, volume 04.03.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION AASHTO M 323. **Standard specification for Superpave volumetric mix design**. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2013.

ANDERSON, M.; TURNER, P.; PETERSON, B. **Making RAP Working SUPERPAVE**. The magazine of the Asphalt Institute, Asphalt Institute - Lexington, Kentucky, 2001.

ANTUNES, F. F. L. **Influência dos Agregados de Diferentes Fontes nas Misturas Asfálticas**. Reunião de Pavimentação Urbana - 16ª RPU. Belo Horizonte - MG, 2009.

ARAÚJO, L. M. D. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. Tese. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Recycling** - U.S.A, 2015.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Cold-Mix Recycling** - manual series no. 21, first edition - U.S.A, 1983.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. **An overview of recycling and reclamation methods for asphalt pavement rehabilitation**. Annapolis, USA, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **Dosagem de misturas betuminosas pelo método Marshall** – Método de Ensaio - NBR 12891. Publicação da ABNT, Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION AFNOR NF P 98-250-2 - **Essais relatifs aux chaussées** - préparation des mélanges hydrocarbonés, partie 2: compactage des plaques - France, 1991.

BAHIA, H. U. **Non-Linear Viscoelastic and Fatigue Properties of Asphalt Binders**. Journal of the Asphalt Paving Technologists, Volume 68, 1999. pg. 1-34.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: Materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

BALBO, J. T. **Estudo das propriedades mecânicas das misturas de brita e cimento e sua aplicação aos pavimentos semirrígidos**. Tese. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993.

BALBO, J.T.; BODI, J. **Reciclagem a quente de misturas asfálticas em usinas: alternativa para bases de evelado módulo de elasticidade**. In: Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes. XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – Florianópolis: 2004. Vol. I. p.174-185.

BAROUX, R.; CHAMPION, M.; POIRIER, J.C. **Recyclage des enrobés en centrale** - Aspects techniques. Bulletin de Liason des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Paris, 1982. p. 78-84.

BENEVIDES, S.A.S. **Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos-Empírico do DNER e Resiliência da COPPE/UFRJ em Rodovias do Ceará**. Dissertação. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

BERNUCCI et al., L. B. **Construção e Reabilitação de pavimentos, Reciclagem de Pavimentos** – Petrobrás. Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto - Rio de Janeiro, 2008.

BERNUCCI, L. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Publicado por PETROBRAS E ABEDA, 3ª ed.- Rio de Janeiro, 2010. 504f.

BICHERON G., MIGLIORI F. **AOÛT 1986 EUROBITUME 85**. - Effet du régénérant sur le vieux bitume au cours du recyclage à chaud, 1986.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos** - São Paulo: Fazendo Arte Editora, 2014.

BONNOT, J. **Régénération et recyclage des enrobés bitumineux, Bulletin de Liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées**, 1980.

BROSSEAUD, Y.; JACQUES, S. **Will bituminous mixes be made differently tomorrow: state of the art for warm mix asphalt in France – Choice for Sustainable Development**. Pre-Proceedings of the 23rd PIARRC World Road Congress - Paris, 2007.

BROWN, E. R.; MANGLORKAR, H. **Evaluation of laboratory properties of SMA mixtures**. National Center for Asphalt Technology Research Report No. 93-5, 1993.

CARLESSO, G. C. **Estudo do comportamento de mistura asfáltica modificada por Nanoargila e Polímero SBS**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2017.

CASTRO, Neto; A.M. e BERNUCCI, L.B. **Proposta de Dosagem de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente**. Anais do 15 ° IBP - Rio de Janeiro, 2000.

CFTR – **GUIDE TECHNIQUE**. Retraitement des chaussées et recyclage des matériaux bitumineux de chaussées – CFTR, juillet 2004.

CHAPPAT, M.; PLAUT, J. F. **Le recyclage des enrobés en centrale: bilan après 1 an – Revue Générale des Routes et Autoroute**. França, mars 1982.

CLAUBER, C.; SALOMÃO, P. **O uso de Reciclagem de Pavimentos como Alternativa para o Desenvolvimento Sustentável em obras rodoviárias no Brasil**, 2011.

CNT - Confederação Nacional de Transporte **PESQUISA CNT DE RODOVIAS 2015: Relatório gerencial**. Brasília – DF, 2016.

COLBERT - **The determination of mechanical performance of laboratory produced hot mix asphalt mixtures using controlled RAP and virgin aggregate size fractions**, 2012.

COLBERT - **The properties of asphalt binder blended with variable quantities of recycled asphalt using short term and long term aging Simulations**, 2012.

COLLEGE STATION, TEXAS TRANSPORTATION INSTITUTE. **Design Of Recycled Asphalt Concret Mixtures**. Confederação Nacional dos Transportes - Asfalto de qualidade, 2015.

COSTA, C. J. B. **Aplicação de Técnicas de Reciclagem de Pavimentos, como Forma de Minimizar os Impactos Ambientais Causados em Obras Rodoviários no Brasil** - Revista Pavimentação. Associação Brasileira de Pavimentação - Ano V, nº 16, 2010. p. 38-49.

DAVID, D. **Misturas Asfálticas recicladas a frio: estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado** - Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. Pg. 117.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **Misturas betuminosas** – determinação da resistência à tração por compressão diametral. DNER-ME 138/94 - Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - **Misturas betuminosas** – determinação do módulo de resiliência. DNER-ME 133/94 - Rio de Janeiro, 1994.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes **MANUAL DE PAVIMENTAÇÃO** - Rio de Janeiro, 2006. 3 ed. p. 274p.

FONTES, L. P. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho / Universidade Federal de Santa Catarina, Portugal, 2009.

FREIRE, J.; GÓIS, T. S.; KLIPPEL, W. D. **O estado da arte sobre uso de reciclado de Pavimento asfáltico na pavimentação no Brasil e no mundo**. XXVIII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte – Curitiba, 2014.

GARRIDO, R. L; BALBO, J. T. **Deformações permanentes em mistura asfáltica reciclada**. 9º Congresso Ibero-Americano del Asfalto - Asunción, 1997. Tomo 2.

GONZALO, V.; PÉREZ, F. J.; MIRÓ, R.; MARTÍNEZ, A.; BOTELLA, R. **Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)** - Construction and Building Materials, 2011.

GRECA ASFALTOS S.A. **Estudo comparativo de deformação permanente de concretos asfálticos confeccionados com ligantes asfálticos diversos** - 16º Encontro Técnico do Departamento de Estradas de Rodagem do Paraná (DER) - Curitiba, 2012.

HICKS, R. G.; CHENG, D.; DUFFY, T. **Evaluation of Terminal Blend Rubberized Asphalt in Paving Applications** - Report Number: CP2C-2010-102 Technical Memo - California Pavement Preservation Center, Chico - California, 2010. pg.82.

HOU, T. **Fatigue Performance Prediction of North Carolina Mixtures Using Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model**. 2009. 132 p. Dissertação (Mestrado) – Civil Engineering, Graduate Faculty of North Carolina State University, North Carolina.

JONES, D. R. **Understanding How the Origin and Composition of Paving-Grade Asphalt Cements Affect Their Performance** - SHRP Asphalt Research Program Memorandum #4, The University of Texas Austin – Texas, 1992.

KANDHAL, P. S; COOLEY JR., L. A. **The Restricted Zone in the SUPERPAVE Aggregate Gradation Specification. National Cooperative Highway Research Program-NCHRP** - Report 464 – USA, 2001.

KIM, Y. R. **Modeling of Asphalt Concrete**. 1st ed. USA: American Society of Civil Engineers, McGraw-Hill Construction, 2009.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES (LCPC). **Reciclagem de misturas asfálticas** - France, outubro 2011.

LEITE, M. F. L.; MOTTA, L.M.G. **O Efeito do Filler nas Características do Ligante Asfáltico** - XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET - Natal, 2002.

LEWIS, W. A.; BROAD, B.A. (1968). An investigation of the performance of nine major roads having cement-bound granular bases. Road Research Laboratory, RRL Report LR 196, Crowthorne.

LIMA, A. T. **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente** – Dissertação. Universidade Federal do Ceará - Fortaleza, 2003. pg. 99.

LONG, F. M. **Permanent Deformation of Asphalt Concrete Pavements: A Nonlinear Viscoelastic Approach to Mix Analyses and Design** - Tese (Doutorado) Civil and Environmental Engineering, University of California - Berkeley, 2001. p. 318.

LPC BITUMINOUS MIXTURE DESIGN GUIDE. **Manuel d'aide à la formulation des enrobés** – sept 2007.

MAGALHÃES, S. T. **Misturas Asfálticas de Módulo Elevado Para Pavimentos de Alto Desempenho**. Tese. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro, 2004. p.184.

MARCON, M. F. **Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímero sbs, borracha moída de pneu e nanomateriais**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2016.

MEDANI, T. O. **Design Principles of Surfacing on Orthotropic Steel Bridge Decks**. 2006. 300 p. Dissertação (Mestrado) – Civil Engineering, Section of Road and Railway Engineering, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Netherlands.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2014.

MIRÓ, R. **Evaluation of high modulus mixture behaviour with high reclaimed asphalt pavement (RAP) percentages for sustainable road construction**. Construction and Building Materials - Catalunya, 2011.

MONÉRON, P.; MEASSON, M. - **Fabrication des graves-bitume avec un taux de recyclage de 15 %** - Institut Francais des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) – França, nov. 2002.

MONISMITH, C. L. **Asphalt Mixture Behavior in Repeated Flexure**. Technical Report TE-63-2. Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, California, November 1963.

MONTEPARA A.; TEBALDI, G.; MARRADI, A.; BETTI, G. **Effect on Pavement Performance of a Subbase Layer Composed by Natural Aggregate and RAP**. Procedia Social and Behavioral Sciences – Itália, 2012.

MOREIRA, H. S. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas a frio com diferentes teores de agregado fresado incorporado e diferentes modos de compactação**. Dissertação. Universidade Federal do Ceará - Fortaleza, 2005. pg. 99.

MOURA, E. **Estudo de Deformação Permanente em Trilha de Roda de Misturas Asfálticas em Pista e em Laboratório**. Tese. Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo, 2010. p. 299.

NAISHENG, G.; ZHANPING, Y.; YINGHUA, Z.; YIQIU, T.; DIAB, A. **Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures**. Construction and Building Materials, 2014.

NAKAMURA, D. B. **Reciclagem de pavimentos asfálticos**. Universidade de Uberaba, Novembro 2011.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENTS ASSOCIATION. **Handling and Processing of Reclaimed Asphalt Pavements**, Washington, 2016.

NGUYEN, H. V. **Efeitos dos procedimentos de mistura e tamanhos de misturas de asfalto com adição de RAP**. Construction and Building Materials, 2013. pg. 728–742.

PERES, A. R.; BALBO, J. T. **Estudo das deformações permanentes em misturas asfálticas recicladas com emprego de agente de reciclagem ARX-1**. Associação Brasileira de Pavimentação, Vol. 1- São Paulo, 1998. pg. 249-269.

POLACCO, G. **Rheological properties of asphalt/SBS/clay blends**. European Polymer Journal, Volume 44. Amsterdam, September 2008. pg. 3512-3521.

POULIKA KOS, L. **Influence of short and long term aging on chemical, microstructural and macromechanical properties of recycled asphalt mixtures**. Department Road Engineering/Sealing Components Laboratory - Zürich, 2014.

PRADYUMNA, T. A.; MITTAL, A. A.; JAIN, P. K. **Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for Use in Bituminous Road Construction**. Journal Elsevier, 2013.

REIS, A. C. **Propriedades mecânicas de misturas asfálticas recicladas em usina protótipo de escala reduzida**. Dissertação. Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro, 2013. pg. 114.

RESCHNER, K. **Scrap tire recycling**. A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods - Berlin, Germany, July 2008. pg.16.

REYES, O.; BERARDINELLI, E. **Avaliação de misturas de asfalto de mistura quente com substituição de agregados por Material de pavimentação de asfalto recuperado (RAP)**. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2012. pg.379-388.

SANTOS, A. S. **Segmentos monitorados de Araranguá: Construção e previsão de desempenho do revestimento em camadas singulares e integradas**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis, 2016.

SERFASS, J. P. - **Recyclage en centrale des matériaux de chaussées – technique de l'ingénieur-aout** - Centre français d'exploitation du droit - França,2008.

SHEN, S.; CARPENTER, S. H. **Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing**. COE Report No. 29, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois, Illinois, March 2007.

SHIUH, J. C.; HSIUNG, C. W.; CHUNG, C. H. **Road Materials and Pavement Design, Engineering Properties of Bituminous Mixtures Blended with Second Reclaimed Asphalt Pavements**. Journal Taylor & Francis, Setembro 2011.

SILVA, H. M. **Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?** Departamento de Engenharia Civil (DEC). University of Minho - Portugal, 2012.

SILVA, A. H. M. **Avaliação do comportamento de pavimentos com camada reciclada de revestimentos asfálticos a frio com emulsão modificada por polímero**. Dissertação. Escola Politécnica, São Paulo, 2011.

SILVA, J. P. S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas**. Tese. Universidade de Brasília - Brasília, DF, 2011. pg.145.

SILVEIR J. A. **Estudo de dosagem de misturas asfálticas recicladas a frio no Ceará**. Fortaleza, 2002.

SOARES, J. B.; ALDIGUERI, D. R. e LEITE, L.M. **Métodos de Dosagem e Caracterização Mecânica Asfálticas Recicladas a Quente**. Relatório interno. Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, UFC, Ceará, 2002.

SOUSA, J. B. **Test Method Selection**. SHRP-A-415 – Permanent Deformation Response of Asphalt Mixes, Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington, DC, 1994.

SPECHT L. P. **Utilização de material fresado como camada de pavimento - Estudo laboratorial e aplicação em campo**. 42ª Reunião Anual de Pavimentação e o 16º Enacor (Encontro Nacional de Conservação Rodoviária). Gramado, RS, 2013.

SU, K. **Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement**. Resources, Conservation and Recycling. Journal Elsevier, November, 2009. p. 37-44.

TAYEBALI, A. A. **Test Method Selection**. SHRP-A-404 – Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, DC, 1994.

THE ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Hot-Mix Recycling**. Manual N°20, USA.

TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Routine Maintenance Uses for Milled Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)** – Texas, July 1994.

TONIAL, I. A. **Influência do envelhecimento do revestimento asfáltico na vida de fadiga de pavimentos**. Dissertação, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

TRICHÊS, G. **Desenvolvimento de Método para Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos - Fase II: Desempenho dos Segmentos Monitorados UFSC - Relatório Técnico Parcial de Acompanhamento** – Florianópolis, Dezembro, 2016.

VALDÉS G. **Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)**. Construction and Building Materials - Journal Elsevier, March, 2011. p. 1289-1297.

VASCONCELOS K. L. **Influência do percentual de fresado e do envelhecimento de curto prazo na dosagem de misturas asfálticas recicladas a quente.** Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004.

WOLDEKIDAN, M. F. **Response Modeling of Bitumen, Bituminous Mastic and Mortar.** 2011. 260 f. Dissertação (Mestrado) – Civil Engineering, Section of Road and Railway Engineering, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Netherlands.

WU, R.; TSAI, B. W.; HARVEY, J. T. **Using four-point bending tests in calibration of the California mechanistic-empirical pavement design system.** In: 2nd Workshop on Four Bending Point, University of Minho, 2009.

XIAO, F. - **Rheological property investigations for polymer and polyphosphoric acid modified asphalt binders at high temperatures.** Construction and building materials. Journal Elsevier, 2014. v. 64, p.316-323.

ZHAO, S. **Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement.** Construction and building materials. Journal Elsevier, July, 2013. v. 44, pg.92-100.

ZUBARAN, M. **Tecnologias viabilizam a aplicação de asfalto reciclado** - Revista M&T - Marketing Editorial - São Paulo, Dezembro de 2011.