



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO
DE CONCRETOS ASFÁLTICOS CONVENCIONAIS E
MODIFICADOS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE
LABORATÓRIO E DE ANÁLISE DE DESEMPENHO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Daiana Frank Bruxel

**Santa Maria, RS, Brasil
2015**

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO
DE CONCRETOS ASFÁLTICOS CONVENCIONAIS E
MODIFICADOS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE
LABORATÓRIO E DE ANÁLISE DE DESEMPENHO**

Por

Daiana Frank Bruxel

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de
Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental,
Área de Concentração em Construção Civil,
da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS),
como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS, Brasil

2015

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Frank Bruxel, Daiana

Estudo do comportamento viscoelástico de concretos
asfálticos convencionais e modificados através de
ensaios laboratoriais e de análise de desempenho /
Daiana Frank Bruxel.-2015.

129 p. ; 30cm

Orientador: Luciano Pivoto Specht

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2015

1. Pavimentos 2. Misturas Asfálticas 3. Módulo Dinâmico
4. Asfaltos Polímeros I. Pivoto Specht, Luciano II. Título.

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DE
CONCRETOS ASFÁLTICOS CONVENCIONAIS E MODIFICADOS
ATRAVÉS DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO E DE ANÁLISE DE
DESEMPENHO**

elaborada por
Daiana Frank Bruxel

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

Luciano Pivoto Specht, Dr.
(Presidente/Orientador)

Klaus Machado Theisen, Dr.
(Examinador)

Tatiana Cureau Cervo, Dra.
(Examinador)

Santa Maria, 19 de Agosto de 2015

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais e a minha irmã, pelo incentivo e pela confiança que em mim depositaram.

Um agradecimento especial ao meu namorado James Bohrer, pelo seu apoio, compreensão das minhas ausências, incentivo, certamente não teria conseguido sem você.

A Deus que me deu forças para chegar até o fim, apesar de todos os percalços do caminho.

Ao orientador deste trabalho, professor Luciano Pivoto Specht, pelo incentivo, suporte, e principalmente compreensão com minhas limitações de horários durante o andamento da pesquisa.

Aos Professores Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Deividi da Silva Pereira e Tatiana Cureau Cervo, pelo apoio, amizade e ajuda sempre fornecida durante o mestrado.

A todos os amigos do que estiveram presentes no decorrer do curso, agradeço a amizade e a compreensão, tenho certeza de que todos contribuíram, pois sem vocês não teria concluído sozinha essa pesquisa.

A todos os participantes do GEPPASV, em especial pela ajuda nos “peneiraços” e moldagens a Taís, Núbia, Desirre, Marina, Lucas e Valdir.

Um obrigado especial aos meus bolsistas: Patrick e Crizieli que iniciaram essa jornada comigo e ao Gustavo que me ajudou infinitamente no decorrer desse último ano, não teria conseguido sem a ajuda de vocês.

Ao Fernando Boeira e Jeancarlo Ribas pela amizade, auxílio e caronas no decorrer desses dois anos!

Ao Luis Alberto Nascimento pela sua disponibilidade em compartilhar ideias e nos auxiliar no que fosse preciso.

Ao Klaus Machado Theisen pela ajuda, dedicação e por aceitar realizar a avaliação como membro da banca examinadora.

Ao Francisco Thiago Sacramento Aragão, Abraham Guerrero Pazos e ao Laboratório de Geotecnia/Pavimentação da COPPE.

Enfim gostaria de agradecer profundamente a todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

ESTUDO DO COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS CONVENCIONAIS E MODIFICADOS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO E DE ANÁLISE DE DESEMPENHO

AUTOR: DAIANA FRANK BRUXEL
ORIENTADOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT
Santa Maria, 19 de Agosto de 2015

O transporte rodoviário é de grande importância para muitos países, no Brasil isso pode ser ainda mais extremo, pelo excesso de movimentação das cargas através deste modal. Sabe-se que os custos de manutenção das rodovias são elevados, forçando os pesquisadores a encontrar sempre novas alternativas para melhorar o aproveitamento dos materiais, diminuir o consumo de energia, agilizar as intervenções de restauração, entre outros. O objetivo do presente trabalho é avaliar o comportamento de misturas asfálticas convencionais e modificadas por polímeros quanto à resistência e deformabilidade. Para este estudo foi utilizado um esqueleto mineral agregado britado de origem vulcânica com granulometria enquadrada na Faixa C do DNIT, advindos da pedreira de Santo Antônio da Patrulha, RS. Foram utilizados 4 tipos de ligantes asfálticos, o CAP 50/70, o CAP TLA, o CAP 60/85 e o TLA FLEX. A dosagem e compactação foram feitas segundo a metodologia SUPERPAVE. Foram realizados ensaios para verificação do comportamento mecânico (ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT), ensaio de Módulo de Resiliência (MR) e ensaio de Módulo Dinâmico Uniaxial) e posteriormente realizada uma análise de desempenho das misturas estudadas através do software *AASHTOWare*. A partir destas investigações foi possível verificar o comportamento das misturas estudadas quanto a sua resistência, deformabilidade e principalmente quanto ao seu desempenho. Pode-se afirmar que a escolha da mistura a ser utilizada dependerá do cumprimento de uma série de quesitos de projeto. Os ensaios evidenciaram que as misturas com TLA Flex obtiveram os melhores resultados, fato este que foi confirmado através da análise de desempenho que comprovou que esta mistura, com espessura de 18 cm de revestimento cumpre com todos os requisitos de projeto.

Palavras-chave: Pavimentos, Misturas Asfálticas, Módulo Dinâmico, Asfaltos Polímero.

ABSTRACT

Master's Dissertation
Post-Graduation Program in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

BEHAVIOR STUDY OF VISCOELASTIC CONCRETE ASPHALT MODIFIED BY CONVENTIONAL AND LABORATORY TESTS AND PERFORMANCE ANALYSIS

AUTHOR: DAIANA FRANK BRUXEL
ADVISOR: LUCIANO PIVOTO SPECHT
Santa Maria, August 19, 2015

Road transport is of great importance for many countries, in Brazil it can be even more extreme, by excessive movement of cargo through this modal. We know that the maintenance costs of roads are high, forcing researchers to find always new alternatives to improve the use of materials, reduce energy consumption, speed up restoration interventions, among others. The goal of this study is to evaluate the behavior of conventional asphalt mixtures of polymers and modified for resistance and deformability. For this study, we used a crushed mineral aggregate skeleton of volcanic origin with framed particle size in the range of C DNIT, coming from the quarry of Santo Antonio da Patrulha RS. 4 types of asphalt binders were used, the CAP 50/70, the TLA CAP, the CAP 60/85 and the TLA FLEX, and the latter two are modified polymers. Compression was done according to Superpave methodology. Tests were carried out to check the mechanical behavior (test Tensile Strength for Diametral Compression (RT) assay Resilience Module (MR) and Dynamic Module test Uniaxial) and later held one performance analysis of mixtures studied by *AASHTOWare* software. From these investigations it was possible to verify the behavior of the mixtures studied for their resistance, deformability and especially as its durability. It can be said that the choice of the mixture to be used will depend on its applicability. The tests showed that mixtures with TLA Flex achieved the best results, a fact that was confirmed by performance analysis that demonstrated the mixture of TLA Flex with a thickness of 18 cm coating meets all requirements evaluated.

Keywords: pavement, asphalt mixes, complex modulus, modified asphalt.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Número de amostras por ligante.....	49
Tabela 2: Características dos agregados utilizados na pesquisa.....	52
Tabela 3: Propriedades do CAP 50/70	53
Tabela 4: Propriedades do CAP TLA.....	54
Tabela 5: Propriedades do CAP 60/85	54
Tabela 6: Propriedades do CAP TLA Flex.....	55
Tabela 7: Requisitos volumétricos das amostras para TMN de 19mm	56
Tabela 8: Limites da curva de densificação considerados neste trabalho para o cálculo dos índices CDI, TDI e TDI _m	60
Tabela 9: Valores do Coeficiente de Poisson utilizados.....	64
Tabela 10: Tempo mínimo recomendado para equilíbrio da temperatura para amostras para o ensaio de E*	65
Tabela 11: Estrutura do pavimento para análise de desempenho	67
Tabela 12: Limites de projeto utilizados	69
Tabela 13: Dados informados no <i>AASHTOWare</i> por nível de análise	70
Tabela 14: Resultados volumétricos das dosagens das misturas asfálticas com o Superpave ..	71
Tabela 15: Índices de compactação giratória	75
Tabela 16: Valores de CDI das misturas com os teores de projeto	76
Tabela 17: Valores de TDI _m das misturas com os teores de projeto	78
Tabela 18: Resultados de Resistência à Tração.....	80
Tabela 19: Resultados de Módulo de Resiliência para a frequência de 5 Hz.....	84
Tabela 20: Resultados de Módulo de Resiliência para a frequência de 10 Hz.....	85
Tabela 21: Resultados de Módulo de Resiliência para a frequência de 25 Hz.....	86
Tabela 22: Resultados de E* para misturas com o CAP 50/70	91
Tabela 23: Resultados de E* para misturas com o CAP TLA.....	92
Tabela 24: Resultados de E* para misturas com o CAP 60/85	93
Tabela 25: Resultados de E* para misturas com o CAP TLA Flex	94
Tabela 26: Resultados da análise de desempenho nível 3 para revestimento com 10 cm de espessura.....	103
Tabela 27: Resultados análise de desempenho nível 3 para revestimento com 14 cm de espessura.....	104
Tabela 28: Resultados análise de desempenho nível 3 para revestimento com 18 cm de espessura.....	105
Tabela 29: Resultados da vida útil do pavimento em anos.....	106
Tabela 30: Resultados análise de desempenho nível 2 para revestimento com 10 cm de espessura.....	107
Tabela 31: Resultados análise de desempenho nível 2 para revestimento com 14 cm de espessura.....	108
Tabela 32: Resultados análise de desempenho nível 2 para revestimento com 18 cm de espessura.....	109
Tabela 33: Resultados da vida útil do pavimento em anos.....	110
Tabela 34: Resultados análise de desempenho nível 1 para revestimento com 10 cm de espessura.....	111
Tabela 35: Resultados análise de desempenho nível 1 para revestimento com 14 cm de espessura.....	112

Tabela 36: Resultados análise de desempenho nível 1 para revestimento com 18 cm de espessura	113
Tabela 37: Resultados da vida útil do pavimento em anos	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura hipotética de uma molécula de asfalto.....	26
Figura 2: Estruturas representativas das quatro frações betuminosas	27
Figura 3: Modelo de micelas para o cimento asfáltico de Yen	28
Figura 4: Representação esquemática do ligante asfáltico de comportamento Sol e Gel	29
Figura 5: Modelo SHRP do asfalto	30
Figura 6: CDI, TDI e TDIm determinados a partir da curva de compactação Superpave	37
Figura 7: Exemplo de prensa de ensaio de resistência à tração indireta.....	39
Figura 8: Duração do tempo de carregamento e repouso.	41
Figura 9: Parcelas dos deslocamentos resilientes e permanentes registrados durante	42
Figura 10: Deslocamento resiliente total	42
Figura 11: Curva mestra de módulo dinâmico	45
Figura 12: Localização de Santo Antônio da Patrulha no estado do Rio Grande do Sul	51
Figura 13: Gráfico da composição granulométrica do agregado ajustado à faixa “C” do DNIT	52
Figura 14: Etapas da preparação das misturas asfálticas. A: Separação granulométrica através do peneiramento. B: Estufa utilizada na secagem, aquecimento de moldes, envelhecimento da mistura e aquecimento do ligante. C: Material seco e aquecido para moldagem. D: Molde sendo aquecido e mistura asfáltica sendo envelhecida. E: Massa asfáltica em processo de envelhecimento na temperatura de compactação. F: Compactador Giratório – CGS. G: Moldes utilizados na compactação. H: CPs moldados no CGS.	57
Figura 15: Esquema do compactador giratório Superpave.....	58
Figura 16: Configurações do SGC e parâmetros de compactação	59
Figura 17: Estado de tensões gerado no ensaio brasileiro	62
Figura 18: Prensa hidráulica UTM-25.....	63
Figura 19: Interface software AASHTOWare.....	68
Figura 20: Parâmetros volumétricos do CAP 50/70.....	72
Figura 21 : Parâmetros volumétricos do CAP TLA	73
Figura 22: Parâmetros volumétricos do CAP 60/85.....	73
Figura 23: Parâmetros volumétricos do CAP TLA Flex	74
Figura 24: Valores de CDI <i>versus</i> tipo de ligante	76
Figura 25: Valores de TDIm <i>versus</i> tipo de ligante.....	78
Figura 26: Resultados de Resistência à Tração a 10°C	81
Figura 27: Resultados de Resistência à Tração a 25°C	82
Figura 28: Resultados de Resistência à Tração a 35°C	82
Figura 29: Resultados de MR a 10°C em função da frequência	87
Figura 30: Resultados de MR a 25°C em função da frequência	88
Figura 31: Resultados de MR a 35°C em função da frequência	89
Figura 32: Resultados de E* a 4°C	95
Figura 33: Resultados de E* a 20°C	95
Figura 34: Resultados de E* a 40°C	96
Figura 35: Ângulo de fase das misturas a 4°C.....	96
Figura 36: Ângulo de fase das misturas a 20°C.....	97
Figura 37: Ângulo de fase das misturas a 40°C.....	97
Figura 38: Espaço Cole-Cole para todas as misturas	98
Figura 39: Diagrama de Black para todas as misturas	99
Figura 40: Comparação curva log a(T) para todas as misturas	100

Figura 41: Comparação curva mestra para todas as misturas	101
Figura 42: Comparação curva mestra do ângulo de fase para todas as misturas	102
Figura 43: Duração do pavimento em anos tendo com critério o IRI.....	115
Figura 44: Resultados da Deformação Permanente Total em função da durabilidade do revestimento em anos.....	116
Figura 45: Resultados do Trincamento por Fadiga em função da durabilidade do revestimento em anos	116
Figura 46: Resultados do Trincamento Térmico em função da durabilidade do revestimento em anos	117

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Δt : Tempo de defasagem
 Δ : Ângulo de fase
 $\Delta\sigma$: Diferença de tensões
AASHTO: American Association of Highway and Transportation Officials
ABS: Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
AF: ângulo de fase
ASTM: American Society of Testing and Materials
C: Fator de Correção
CA: Concreto Asfáltico
CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ: Concreto Betuminoso Usinado à Quente
CDI: Compaction Densification Index
CGS: Compactador Giratório SUPERPAVE
cm: centímetros
CNT: Confederação Nacional de Transportes
CPA: Camada Porosa de Atrito
d: Diâmetro do corpo de prova
DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
 Δ : Deformação Elástica
DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR: Dynamic Shear Rheometer
E: Módulo de Elasticidade
E1: Módulo Elástico Real
E2: Módulo de Perda
E*: Módulo Dinâmico
|E*|: Módulo Complexo
 ϵ_0 : Deformação axial recuperável máxima
 ϵ_i : Deformação inicial
 ϵ_p : Deformação plástica
 ϵ_r : Deformação resiliente específica
 ϵ_t : Deformação específica de tração
EVA: Etileno e Acetato de Vinila
ESAL: Equivalent Axle Loads
EUA: Estados Unidos da América
F: Força aplicada
FHWA: (Federal Highway Administration),
FN: Flow Number
 σ_0 : Tensão dinâmica máxima
Gmb: Densidade Específica Aparente Estimada
Gmm: Densidade Máxima Medida
Gsb: Densidade Máxima Aparente
h: Altura Corpo de Prova
Hz: Hertz
IRI: Indicador de Irregularidade
IDT: Indirect Tensile Tester
kPa: Quilo Paschoal

LCPC: *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*
LDPE: *Polietileno de Baixa Densidade*
LMCC: *Laboratório de Materiais de Construção Civil*
LVDT: *Linear Variable Differential Transducer*
MD: *Módulo Dinâmico*
 μ : *Coefficiente de Poisson*
MR: *Módulo de Resiliência*
NCHRP: *National Cooperative Highway Research Program*
Ndes: *Densidade Estimada no final da compactação*
 $\eta_{m\acute{a}x}$: *Máxima tensão de cisalhamento aplicada*
NR: *Borracha Natural*
P: *Carga vertical repetida*
PBD: *Polibutadieno*
PG: *Grau de Desempenho*
PI: *Polisopreno*
RBV: *Relação Betume Vazios*
RPB: *Relação Pó Betume*
RPM: *rotações por minuto*
RT: *Resistência à Tração*
RTFOT: *Rolling Thin Film Oven Test*
s: *Segundo*
SB: *Estireno-Butadieno*
SBS: *Estireno-Butadieno-Estireno*
SEBS: *Estireno-Etileno-Butilenoestireno*
SHRP: *Strategic Highway Research Program*
SIS: *Estireno-Isopreno-Estireno*
SMA: *Stone Mastic Asphalt*
SST: *SUPERPAVE Shear Tester*
SUPERPAVE: *Superior Performing Asphalt Pavement System*
TDI: *Traffic Densification Index*
TDIm: *Traffic Densification Index Modificado*
TLA: *Trinidad Lake Asphalt*
UFMS: *Universidade Federal de Santa Maria*
USACE: *Corpo de Engenheiros do Exército Americano*
UTM: *Universal Testing Machine*
VA: *Vazios com ar*
VAM: *Vazios do Agregado Mineral*
VECD: *Visco-Elastic Continuum Damage*
VMD: *Número de veículos médios diário*
Vmx: *Volume do CP*
VV: *Volume de Vazios*
 ω : *Frequência angular*
 γ_w : *Massa específica da água*
 ϕ : *Ângulo de fase do material*
Wm: *Massa do CP*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	21
1.1. Objetivo geral.....	23
2. REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1. Ligantes	24
2.1.1. Generalidades	24
2.1.2. Composição química	25
2.1.3. Asfalto Natural de Trinidad & Tobago – <i>Trinidad Lake Asphalt</i> (TLA).....	30
2.1.4. Asfaltos Modificados por polímeros	31
2.2. Caracterização de Misturas Asfálticas	32
2.2.1. Misturas asfálticas	32
2.2.2. Dosagem de Misturas Asfálticas	33
2.2.2.1 Dosagem Marshall.....	34
2.2.2.2 Método SUPERPAVE.....	35
2.2.2.2.1 Parâmetros de Compactação.....	37
2.2.3. Ensaio Mecânicos em Misturas Asfálticas para Análise do Desempenho	38
2.2.3.1. Ensaio de Resistencia a Tração por Compressão Diametral	39
2.2.3.2. Módulo de Resiliência (MR).....	40
2.2.3.3 Módulo Dinâmico Uniaxial.....	44
3. METODOLOGIA DA PESQUISA	48
3.1.Planejamento da pesquisa.....	48
3.2. Materiais utilizados	50
3.2.1 Agregados Minerais	50
3.2.2 Ligantes	52
3.3. Ensaio laboratoriais	55
3.3.1. Dosagem das misturas	55
3.3.2. Ensaio Mecânicos	61
3.3.2.1. Ensaio de Resistencia a Tração por Compressão Diametral	61
3.3.2.2. Ensaio de Módulo de Resiliência	62
3.3.2.3. Ensaio de Módulo Dinâmico Uniaxial	65
3.3.3. Análise de desempenho	66
4. RESULTADOS	71
4.1.Dosagem	71
4.1.1. Parâmetros Volumétricos	71
4.1.2. Parâmetros de Densificação	74
4.2. Propriedades Mecânicas	79
4.2.1. Resistência à Tração	79
4.2.2. Módulo de Resiliência.....	83
4.2.3. Módulo Dinâmico Uniaxial.....	90
4.3. Análise de Desempenho.....	102
4.3.1. Nível 3 de análise	102
4.3.2. Nível 2 de análise	106
4.1.1. Nível 1 de análise	110
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	118

5.1 Conclusões.....	118
5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros	121
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123

INTRODUÇÃO

O pavimento é uma estrutura constituída por camadas de materiais capazes de suportar a ação danosa do tráfego e do meio ambiente. O desempenho de um pavimento está relacionado a um complexo conjunto de fatores, dentre eles as propriedades físicas e mecânicas dos materiais das camadas que o constituem.

As misturas asfálticas são utilizadas na estrutura de pavimentos visando proteger as camadas granulares subjacentes do efeito da umidade e de tensões elevadas resultantes das cargas transferidas ao pavimento pelo tráfego. Para desempenhar adequadamente estas funções ao longo da vida útil do pavimento, a mistura asfáltica deve resistir às solicitações impostas pelo tráfego que, somadas às condições ambientais, podem causar processos de degradação no pavimento, como deformações permanentes e trincamento.

A distribuição de esforços no interior da estrutura condiciona as tensões críticas que levam o pavimento a um estado de degradação última; por fadiga, com solicitações ou tensões/deformações nas camadas asfálticas e cimentadas e de compressão/cisalhamento nas camadas granulares e/ou coesivas. Tal distribuição, para uma dada situação de carregamento, depende da rigidez das camadas, que por sua vez é influenciada pelas condições de carregamento como magnitude das cargas e velocidade de passagem das mesmas e ambientais, como temperatura e umidade.

Muitas vezes as propriedades conferidas ao pavimento por um ligante asfáltico convencional não são suficientes para garantir um bom desempenho, podendo ocorrer deterioração prematura da estrutura. Com base nisso a utilização de materiais poliméricos em asfaltos vem sendo utilizada para atender demandas especiais, em situações que exigem desempenho superior e durabilidade do revestimento, aliada a relação custo/benefício.

A formação de trilha de rodas, uma das mais comuns perdas de regularidade e serventia dos pavimentos, é resultado da deformação permanente causada pelo acúmulo de deformação plástica sob aplicação de cargas repetitivas, agravadas quando estas são aplicadas quando o pavimento é submetido a altas temperaturas de serviço.

Fissuras por fadiga ocorrem durante toda a vida útil do pavimento e normalmente resultam em severos danos a estrutura. Já as fissuras térmicas são causadas pela exposição do pavimento a um simples ciclo de temperatura onde a temperatura atinge a temperatura mínima

crítica ou a diversos ciclos em que a temperatura inferior é superior à temperatura mínima crítica, ocorrendo normalmente em direção perpendicular ao tráfego.

Neste sentido, de entendimento estrutural do pavimento flexível, torna-se imperioso o entendimento da reologia dos materiais. A reologia pode ser definida como a parte da física que estuda os materiais que apresentam propriedades intermediárias entre um sólido e um fluido. A resposta das misturas asfálticas sob diversas condições de carregamento (estático, dinâmico, de curta ou longa duração) e considerando a variável ambiental temperatura é estudada através da reologia.

O asfalto é um material complexo, tanto sob a ótica da composição quanto de comportamento. Apresenta comportamento viscoelástico, caracterizado pela redução da rigidez sob longos períodos de carregamento ou altas temperaturas e comportamento elástico em situações inversas. Durante a vida útil do pavimento, as misturas asfálticas apresentam uma parcela viscosa e uma parcela elástica em resposta a solicitações do tráfego. As misturas asfálticas, por consequência, tem comportamento semelhante a este, de queda ou elevação da rigidez, dependendo da temperatura ou do tempo de aplicação de carga (ligada a velocidade operacional dos veículos).

Nos países do chamado primeiro mundo há uma preocupação efetiva com a melhoria da qualidade do pavimento rodoviário e com o aumento da vida útil das rodovias. Há cerca de trinta anos foi verificada que a adição de polímeros ao asfalto melhora consideravelmente suas propriedades, especialmente a resistência à fratura a baixas temperaturas e ao escoamento sob condições de aquecimento elevado.

A evolução das pesquisas permitiu aprofundar os conhecimentos e hoje já se tem informação mais precisa sobre o mecanismo de atuação dos polímeros como reforço das propriedades do ligante. Os países em que os estudos estão mais avançados são França, Espanha e Alemanha, na Europa e Estados Unidos da América (EUA). Este último implantou um projeto conhecido como SUPERPAVE, resultado de um programa de pesquisas em que foram gastos cerca de 150 milhões de dólares para aprofundar estudos sobre qualidade de ligantes rodoviários e de misturas betuminosas.

A partir desse projeto surgiram ensaios mecânicos que buscam relacionar o desempenho da mistura com suas características de rigidez e deformabilidade, entre esses, o ensaio de Módulo Dinâmico Uniaxial e o ensaio de Tração Direta, sendo que os dados oriundos de tais testes são utilizados para a obtenção dos parâmetros do dano contínuo ou VECD.

Enquanto isso o Brasil continua atrasado na utilização desses novos ensaios, utilizando como parâmetros ensaios que nem são mais utilizados em países de primeiro mundo. As pesquisas acadêmicas mais recentes buscam implementar esses ensaios e novas tecnologias como novos parâmetros para a prática no país.

1.1. Objetivo geral

A pesquisa tem como objetivo avaliar o comportamento de misturas asfálticas convencionais e modificadas por polímeros através da realização de ensaios que avaliam o comportamento viscoelástico, além de realizar, com os dados obtidos, uma análise de desempenho no atual método de dimensionamento da AASHTO.

Objetivos específicos

O estudo tem como principais especificidades às citadas a seguir:

- a) Avaliar os parâmetros volumétricos e de densificação empregando a metodologia SUPERPAVE para misturas asfálticas convencionais e modificadas;
- b) Determinar experimentalmente o módulo dinâmico e o módulo de resiliência em várias frequências e temperaturas, bem como a resistência das misturas.
- c) Analisar o desempenho das misturas estudadas empírico-mecanicamente através do *software AASHTOware* quanto à irregularidade longitudinal, deformação permanente e trincamento por fadiga.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo aborda os assuntos de maior pertinência para a concepção e desenvolvimento desta pesquisa. Iniciou-se com uma abordagem sobre ligantes, seguido da caracterização e dosagem de misturas asfálticas, bem como ensaios mecânicos para obtenção da rigidez e resistência das misturas.

2.1. Ligantes

2.1.1 Generalidades

O asfalto é uma mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo. Podem ser extraídos da natureza em lagos naturais, rochas asfálticas ou por processo de refino do petróleo. São comumente utilizados em serviços de impermeabilização e juntamente com agregados para a produção de misturas asfálticas.

Os petróleos ou óleos crus diferem em suas propriedades físicas e químicas, variando de líquidos negros viscosos até líquidos castanhos bastante fluidos, com composição química predominantemente parafínica, naftênica ou aromática. Existem aproximadamente 1.500 tipos de petróleos explorados no mundo, porém somente uma pequena porção deles é considerada apropriada para produzir asfalto (SHELL, 2003). Como os óleos crus têm composições distintas dependendo de sua origem, os asfaltos resultantes de cada tipo também terão composições químicas distintas.

O Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP, como é conhecido no Brasil – é um produto: semissólido a temperatura baixa, viscoelástico na temperatura ambiente e líquido em temperatura alta; comporta-se como fluido em temperaturas com valores próximos a 100°C e como pseudoplástico em temperaturas entre 25°C e 60°C (LEITE, 1999).

O manuseio e estocagem do asfalto devem ser feitos com a temperatura mais baixa possível, a se evitar o envelhecimento do ligante. O envelhecimento do ligante é um fenômeno que tem influência no desempenho da mistura asfáltica. A exposição do ligante às

altas temperaturas e às intempéries permite a perda de voláteis e a oxidação, o que é prejudicial no que diz respeito à fadiga. Tem-se, ao longo dos anos, tentado diminuir este efeito com adição de produtos e novas tecnologias executivas.

Quanto à deformação permanente o ligante apresenta menor resistência no início de sua vida de serviço, quando sua rigidez é menor, sendo afetado também pelas altas temperaturas e por veículos trafegando à baixa velocidade com cargas elevadas.

Os CAPs mais utilizados no Brasil são o 30/45 e o 50/70. Esta classificação é feita por meio da penetração de uma agulha padrão sob condições padronizadas (uma medida de dureza) e os números indicam a faixa de penetração, ou seja, CAP cuja dureza está entre 30 e 45 é classificado como um CAP 30/45. A especificação do DNIT 095/2006-EM versa sobre os cimentos asfálticos de petróleo.

2.1.2 Composição Química

Quimicamente o asfalto é definido como um sistema coloidal constituído por micelas de asfaltenos dispersadas em um meio intermicelar oleoso, formado pela mistura de óleos aromáticos e saturados, chamado maltenos (BERNUCCI *et al*, 2008 *apud* BRULÉ, 1974).

Para Leite (1999) os CAP's são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais - vanádio, níquel e ferro) através de ligações covalentes. A composição química é bastante complexa, o número de átomos de carbono por molécula varia de 20 a 120. O fracionamento químico mais empregado em Centros de Pesquisas na Europa e EUA, cuja metodologia está descrita na norma ASTM D 4124, separa o CAP em compostos saturados, nafteno-aromáticos, polar-aromáticos e asfaltenos (insolúveis em n-heptano). Os asfaltenos separam-se primeiro, por precipitação, com a adição de n-heptano. Os outros constituintes, denominados maltenos, solúveis em n-heptano, são separados por cromatografia de adsorção.

Os asfaltenos são aglomerados de compostos polares e polarizáveis, formados em consequência de associações intermoleculares. São considerados responsáveis pelo comportamento reológico dos CAP e constituídos de hidrocarbonetos naftênicos condensados e de cadeias curtas de saturados, conforme a Figura 01. O peso molecular dos asfaltenos é da ordem de 3.000 (LEITE, 1999).

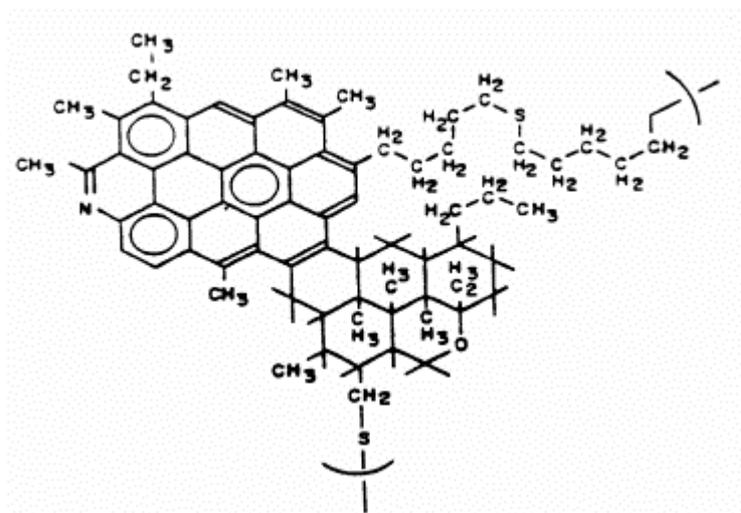


Figura 1: Estrutura hipotética de uma molécula de asfalteno

Fonte: Leite (1999).

O fracionamento químico separa o cimento asfáltico em compostos saturados (S), aromáticos (A), resinas (R) e asfaltenos (A), sendo este método conhecido como SARA (Figura 2). Os asfaltenos, responsáveis pela parcela viscosa do comportamento do CAP, são os componentes mais complexos e com a maior polaridade. Estudos têm demonstrado que a quantidade e as características dos asfaltenos variam consideravelmente de asfalto para asfalto. Um baixo teor de asfaltenos (menor que 10 %) têm sido associado a misturas asfálticas pouco estáveis. Resinas são geralmente escuras e semissólidas ou sólidas. São fluidas quando aquecidas e tornam-se frágeis quando resfriadas. Funcionam como agentes que dispersam os asfaltenos nos óleos formando um líquido homogêneo. Na oxidação, as resinas transformam-se em asfaltenos (LUCENA, 2005).

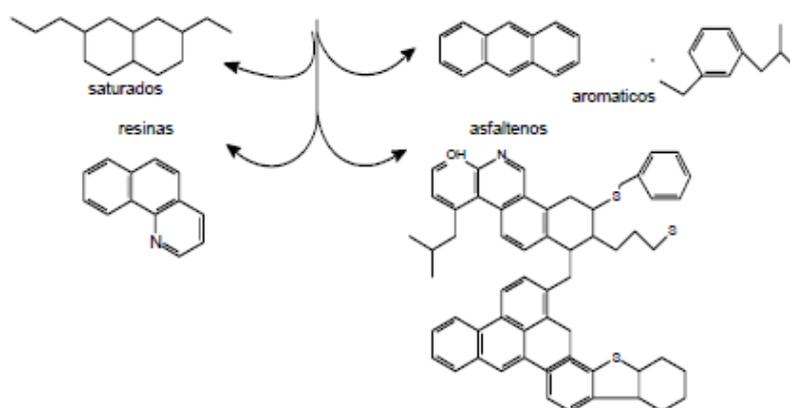


Figura 2: Estruturas representativas das quatro frações betuminosas

Fonte: Masson *et al.*,(2001) *apud* Lucena, 2005.

Os saturados agem no sentido de influenciar negativamente a susceptibilidade térmica, os aromáticos contribuem para a melhoria de propriedades físicas, as resinas melhoram a ductibilidade e dispersão dos asfaltenos e os asfaltenos contribuem aumentando a viscosidade e tornando os cimentos asfálticos menos susceptíveis a variações de temperatura.

Segundo Yen (1991 *apud* Leite, 1999), o CAP pode ser considerado uma dispersão coloidal de asfaltenos em saturados e aromáticos, circundados por resinas que agem como agentes peptizantes. Este modelo é representado na Figura 3. A aglomeração de micelas de asfaltenos com adsorção de resinas, chamada de supermicela, é dependente da temperatura, teor de parafinas e outros compostos químicos. Neste modelo simples e bastante utilizado de composição do asfalto, o cimento asfáltico é considerado como formado por asfaltenos, resinas (polares aromáticos e nafteno aromáticos) e óleos (saturados). Os asfaltenos são insolúveis quando o cimento asfáltico é dissolvido num solvente apolar como o pentano, hexano ou heptano. O componente que é dissolvido é chamado “malteno” (ou petroleno) e é composto de resinas e óleos.

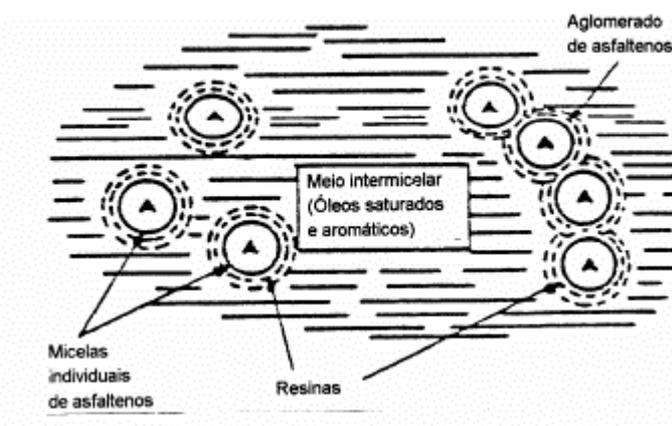


Figura 3: Modelo de micelas para o cimento asfáltico de Yen

Fonte: Yen, (1991) apud Leite (1999).

No modelo de micelas, o CAP não é uma verdadeira solução, mas sim considerado um sistema coloidal que consiste em micelas (asfaltenos) de grande peso molecular dispersas ou dissolvidas num meio oleoso de menor peso molecular (maltenos). Afastando-se do centro das micelas, há uma transição gradual para resinas menos polares, estas camadas estendendo-se até o meio oleoso de dispersão.

Em presença de quantidade suficiente de resinas e aromáticos, os asfaltenos formam micelas com boa mobilidade e resultam em ligantes conhecidos como Sol. Porém, se as frações não estão bem balanceadas, há formação de estruturas de pacotes de micelas com vazios internos que resultam em ligantes de comportamento conhecido como Gel, sendo um exemplo desse tipo os asfaltos oxidados utilizados em impermeabilizações. Esse comportamento Gel pode ser minimizado com o aumento de temperatura (LEITE, 1999; SHELL, 2003).

A Figura 04 mostra a representação esquemática dos comportamentos Sol e Gel.

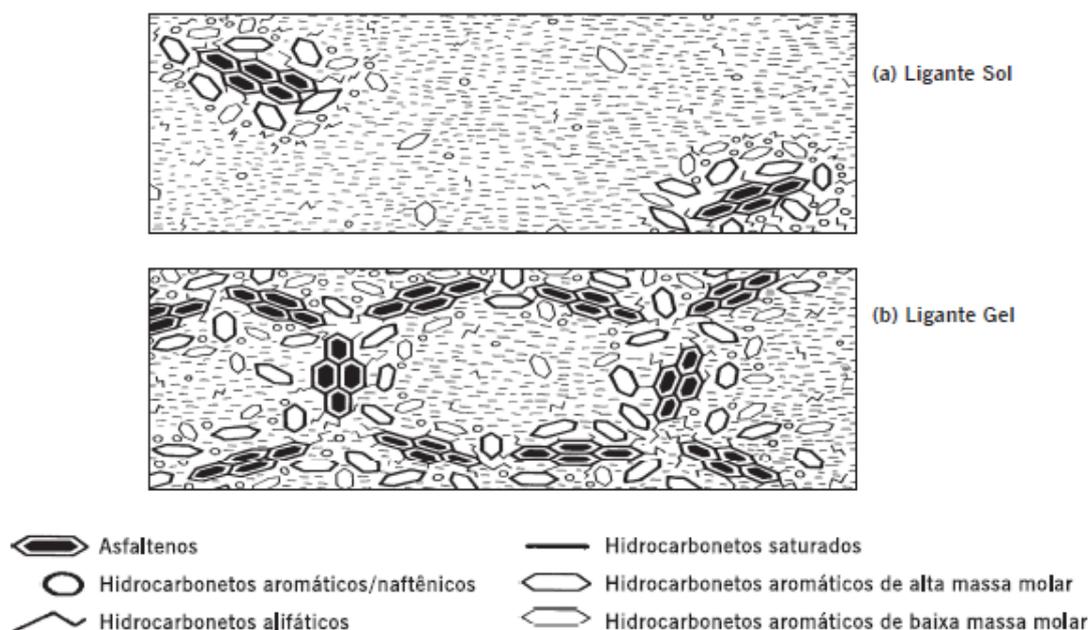


Figura 4: Representação esquemática do ligante asfáltico de comportamento Sol e Gel

Fonte: Shell, (2003) *apud* Bernucci *et al* (2006).

Lucena (2005) discorre que um outro modelo muito utilizado atualmente é o modelo estudado em um programa de pesquisa denominado SHRP (*Strategic Highway Research Program*). O modelo estrutural do programa SHRP não considera o conceito de asfaltenos e maltenos de Yen e classifica os compostos constituintes do CAP em polares e apolares. Em contrapartida, propõe que forças intra e intermoleculares (Van der Waals, ligações de hidrogênio e ligações $\pi - \pi$) são responsáveis pela formação de redes tridimensionais que resultam em características elásticas e viscosas. Por aumento da temperatura ou por ação de forças cisalhantes, ocorre destruição de aglomerados, com consequente redução da elasticidade e aumento das características viscosas. O comportamento não-Newtoniano do CAP ao esfriar é consequência das atrações inter e intramoleculares entre asfaltenos e outros compostos.

De acordo com os pesquisadores do SHRP, o asfalto é uma matriz molecular tridimensional formada por moléculas polares dentro de moléculas neutras (apolares) (Figura 5). A natureza tridimensional torna o asfalto elástico, porém aplicando-se uma determinada tensão (mecânica ou térmica), as ligações fracas se rearranjam e o asfalto experimenta deformação permanente (LUCENA, 2005).

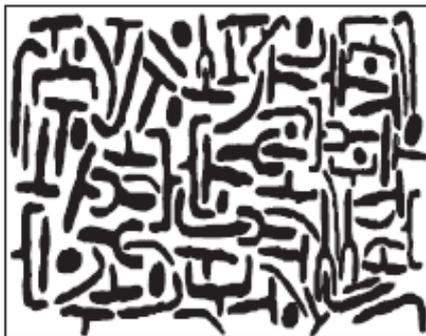


Figura 5: Modelo SHRP do asfalto

Fonte: SHRP, (1994) *apud* Lucena(2005).

2.1.3 Asfalto Natural de Trinidad & Tobago – *Trinidad Lake Asphalt (TLA)*

Os asfaltos naturais ocorrem em várias partes do mundo como na Venezuela, Mar Morto, Suíça e no nordeste da Província de Alberta como depósito de areias betuminosas e/ou oleosas. Há ocorrências em forma de “lagos” superficiais, como em Trinidad, sendo o mais conhecido de todos os depósitos o Pitch Lake de Trinidad e Tobago – TLA (COSTA, 2008).

O ano de 1595 é reconhecido como ano da descoberta do TLA e quem deu início a sua utilização foi o Sir Walter Raleigh que era um membro da corte inglesa que utilizou o TLA para calafetar suas embarcações.

As primeiras pavimentações asfálticas realizadas no Brasil, especificamente na cidade do Rio de Janeiro foram com asfalto importado em barris e sacos de Trinidad, no início do século XX.

O *Trinidad Lake Asphalt (TLA)* é um asfalto natural extraído de lagos de asfalto a céu aberto no sudoeste da ilha de Trinidad e Tobago, em La Brea, uma cidade da Província de Brighton. Atualmente, após sua extração o produto é desidratado e toda a impureza removida. O depósito abrange cerca de 40 hectares e possui profundidade de cerca de 80m (COSTA *et al*, 2008).

Por ser um material muito viscoso, seu uso tem sido recomendado apenas como aditivo para aumento da resistência à deformação permanente, aumento vida de serviço de misturas asfálticas, melhoria da adesão, melhoria das propriedades antiderrapantes e para aumentar a estabilidade. Sua aplicação à mistura pode ser via seca (acrescido diretamente à

mistura) ou via úmida (acrescido previamente ao ligante como modificador) (CAVALCANTI, 2010).

A empresa que explora o Pitch Lake é uma estatal de nome *Lake Asphalt of Trinidad & Tobago Limited* (1978) a qual apresenta as seguintes características do produto comercializado:

- Mistura coloidal estável composta de 53 a 55% de betume; 35 a 37,5% de minerais (sílica, alumina, óxido de ferro, enxofre e potássio); 4,3% de água de hidratação de minerais e 3,2% de outras matérias orgânicas.

- Penetração a 25°C está entre 0 e 5, a densidade entre 1,3 e 1,5 e ponto de amolecimento entre 89 e 99°C.

Segundo o distribuidor estatal do TLA, os componentes maltenos do betume dão ao material sua natureza aderente. O TLA possui até o dobro dos maltenos dos ligantes convencionais e contribui para melhor adesividade entre o ligante e o agregado. Os componentes minerais encontrados na estrutura proporcionam uma estrutura física mais estável.

No Brasil o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte criou a especificação de material 168/2013 que especifica Cimento asfáltico de petróleo modificado por asfalto natural do tipo TLA.

2.1.4. Asfaltos Modificados por Polímeros

Os cimentos asfálticos produzidos pelo refino do petróleo atendem satisfatoriamente à maioria das situações às quais os pavimentos são submetidos. Contudo, nos últimos anos, as rodovias de alto volume de tráfego apresentam aumento no VMD (número de veículos médio diário), maior peso nos caminhões, aumento da carga por eixo e aumento da pressão dos pneus, requerendo revestimentos betuminosos mais resistentes e técnicas construtivas mais modernas. A modificação de cimento asfálticos por polímeros tem sido uma solução para suprir algumas deficiências do cimento asfáltico e melhorar propriedades como a susceptibilidade térmica, resistência à deformação permanente e à trincas térmicas (AIREY, 2003 *apud* LUCENA, 2005).

Mano e Mendes (2001) definiram polímeros como sendo moléculas relativamente grandes, de pesos moleculares da ordem de 10^3 a 10^6 em cuja estrutura se encontram

repetidas unidades químicas simples conhecidas como meros. Os polímeros são materiais viscoelásticos dependentes do tempo e da temperatura. As propriedades mecânicas são afetadas pelo peso molecular, estrutura química, distribuição da cristalinidade e temperatura.

Os tipos de polímeros mais utilizados podem ser divididos em três categorias: copolímeros em blocos e outros termoplásticos, polímeros sintéticos e borrachas naturais. Os copolímeros em blocos contêm estireno na extremidade do bloco e butadieno no meio do bloco. Nesse grupo estão o estireno-butadieno (SB), estirenobutadieno-estireno (SBS), estireno-isopreno-estireno (SIS), estireno-etileno-butilenoestireno (SEBS) e acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS). Incluso no grupo dos termoplásticos estão o polietileno de baixa densidade (LDPE) e o copolímero de etileno e acetato de vinila (EVA). O segundo grupo consiste de homopolímeros como a borracha natural (NR), polibutadieno (PBD), polisopreno (PI) e poli (2-cloro-1,3- butadieno) e copolímeros como a borracha de estireno butadieno (SBR). Os outros tipos de modificadores são, por exemplo, as fibras e o pneu moído.

A utilização de pneus inservíveis, além de buscar melhorias nas propriedades do betume, visa possibilitar a utilização do lixo plástico proveniente destes materiais. A compatibilidade entre os materiais também é requerida e tem papel fundamental na determinação das propriedades da mistura (LUCENA, 2005).

No Brasil, as especificações DNIT 129/2011-EM e DNIT 111/2009 –EM disciplinam o uso de asfaltos modificado com polímeros elastomérico e asfalto-borracha, respectivamente.

2.2. Caracterização de Misturas Asfálticas

2.2.1. Misturas asfálticas

Mistura asfáltica é uma mistura de materiais granulares, material de enchimento e ligante asfáltico em proporções pré-definidas, onde o ligante asfáltico atua como agente aglutinante entre os agregados, de forma a fornecer rigidez e resistência à mistura de agregados e impermeabilidade.

Na prática, podem ser utilizadas nas estruturas dos pavimentos tanto como camada de rolamento quanto na forma de camada de ligação (também conhecida como *binder*) entre a superfície e as camadas subjacentes de suporte.

Na maioria dos pavimentos brasileiros usa-se revestimento com misturas asfálticas, que se for processada de forma adequada proporciona impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, de acordo com o clima e tráfego previstos em projeto (BERNUCCI et al, 2006).

As misturas asfálticas podem ser misturadas a frio ou a quente. O primeiro grupo são os pré-misturados a frio, em que se empregam as emulsões asfálticas como ligante, já as misturas à quente distinguem-se em diversos tipos de acordo com a granulometria empregada, teor de ligante, percentagem de vazios e função que desempenhará na estrutura do pavimento. Estas podem ser designadas como Concreto Asfáltico (CA), também chamado de Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ), Camada Porosa de Atrito (CPA), e Stone Mastic Asphalt (SMA).

No Brasil o concreto asfáltico é utilizado em larga escala para o revestimento das estruturas das rodovias por ser resistente em muitos aspectos, podendo utilizar CAP convencional ou CAP modificado por polímeros, borracha ou TLA. As especificações de serviço do DNIT 031/2006, 385/1999 e 112/2009 tratam de misturas asfálticas com ligante convencional modificado por polímero e com asfalto borracha.

2.2.2. Dosagem de Misturas Asfálticas

O principal objetivo da dosagem de misturas asfálticas é produzir uma mistura que possua trabalhabilidade satisfatória e a melhor combinação possível das seguintes características: Estabilidade (resistência à ação do tráfego sem sofrer distorções ou deslocamento); Durabilidade (resistência à desagregação pela ação do tráfego e/ou do intemperismo); Flexibilidade (resistência à flexão sob ação de carga repetida, sem ocorrência de fissuras); Impermeabilidade (resistência à penetração e à percolação de água) e Resistência ao atrito (ROHDE, 2007).

Um bom projeto de mistura asfáltica deve considerar os seguintes fatores que correspondem às principais causas de defeitos nos pavimentos: deformação permanente, trincas por fadiga, trincas a baixas temperaturas, além dos efeitos da umidade e do envelhecimento (ASPHALT INSTITUTE, 1995).

A seguir estão descritos os principais métodos para dosagem de misturas asfálticas.

2.2.2.1 Dosagem Marshall

No Brasil, maior parte dos projetos de misturas asfálticas ainda é realizado pela metodologia Marshall. Método que foi desenvolvido na década de 1930 por Bruce G. Marshall, do Departamento de Transporte do Estado do Mississippi dos Estados Unidos. Durante a segunda guerra, o USACE (Corpo de Engenheiros do Exército Americano), carecia de um método simples, prático e eficiente para dosagem de misturas asfálticas a quente, para uso na pavimentação de pistas de aeroportos militares. A razão determinante dessa necessidade foi o crescente aumento das cargas e das pressões dos pneus impostos pela aviação militar, devido ao desenvolvimento de pesados aviões de bombardeiro.

Partindo desta perspectiva, realizaram uma pesquisa de caráter nacional, para selecionar aparelhos de ensaio simples e de fácil transporte, para serem utilizados em campo. Naquela ocasião o USACE adotou o aparelho e o método de projeto de misturas betuminosas concebido por Bruce Marshall. Este método se limita a misturas betuminosas a quente, utilizando CAP de penetração compatíveis com as condições ambientais. O agregado deve ter diâmetro efetivo de pelo menos 1 polegada (25,4 mm) (SENÇO, 2001).

O método Marshall prevê a dosagem das misturas considerando valores admissíveis empíricos para a estabilidade e a fluência. A estabilidade é o valor da máxima carga suportada pelos corpos-de-prova, depende do tipo e das proporções dos materiais granulares, bem como do tipo e, principalmente, da quantidade de ligante asfáltico empregado. A fluência é a deformação sofrida pelo corpo-de-prova quando submetido a uma tensão constante (ROHDE, 2007). Além da estabilidade e da fluência, outros parâmetros são calculados para dosagem das misturas asfálticas tais como: a densidade, volume de vazios e a relação entre vazios do agregado mineral preenchidos por betume.

Para execução do método, primeiro é realizado a preparação das amostras, onde o agregado e o asfalto são aquecidos separadamente e, então misturados. A mistura é colocada no molde cilíndrico aquecido e compactada com 50 ou 75 golpes por face do corpo-de-prova, com um soquete de 4.540 g, caindo de uma altura de 457,2 mm. São avaliados cinco teores de ligante empregando três amostras para cada porcentagem estudada, de modo a tornar possível a escolha do teor de ligante de projeto. Então os corpos-de-prova moldados são deixados em repouso, ao ar livre, durante 24 horas e extraídos dos moldes. Então pesados (ao ar e imersos em água) para obtenção dos elementos necessários ao cálculo das características físicas e volumétricas. Logo após as amostras são imersas em água a 60°C, por cerca de 30 a 40

minutos, e então submetidas ao ensaio para a determinação das características mecânicas (estabilidade e fluência).

O método Marshall apresenta algumas limitações, como a pouca representatividade do método de compactação em relação ao campo e a grande influência na determinação do teor de projeto derivada de fatores ligados à preparação dos corpos-de-prova (tipo de soquete, formas de apoio, etc.). Trata-se de um método de fácil assimilação e execução, e tem como principal aliado o baixo custo dos equipamentos necessários para sua realização, sendo uma das principais razões de até hoje ter tido grande aceitação e utilização no meio técnico rodoviário brasileiro.

2.2.2.2 Método SUPERPAVE

Entre os anos de 1940 e 1990, a maioria das misturas asfálticas a quente produzida nos EUA, eram dosada utilizando a metodologia *Marshall* ou *Hveem* (ROBERTS *et al.*, 1996). O método foi desenvolvido pela *Strategic Highway Research Problem* (SHRP), no qual foi criado para substituir os métodos de *Hveem* e *Marshall*. A comum análise volumétrica destes dois métodos serviu de base para o método SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavement System*).

É a metodologia usada atualmente nas universidades e Departamentos de Estradas dos EUA. No Brasil este tipo de dosagem tem sido feito em centros de pesquisas e em algumas universidades federais, mas obras federais já foram realizadas com este procedimento (CAVALCANTI, 2010). Talvez a desvantagem desse método até o momento seja o alto custo para compra dos equipamentos.

Trata-se de um método que abrange o dimensionamento de misturas asfálticas adaptadas aos requisitos de desempenho ditadas pelo tráfego e ambiente (clima). Facilita a escolha e a combinação do ligante asfáltico, agregado, e algum modificante necessário para alcançar o nível requerido do desempenho do pavimento. A metodologia inclui equipamentos de ensaios, métodos e critérios. A aplicação do sistema SUPERPAVE depende do volume de tráfego ou de outra forma de classificação funcional da rodovia.

Foram desenvolvidos três níveis de projeto de misturas:

O nível 1 - para tráfego com carga de eixo equivalente (ESAL- *Equivalent Axle Loads*) abaixo de 10^6 . É requerido apenas projeto volumétrico. Engloba moldagem de corpos-de-

prova usando o Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) e a seleção do teor de ligante é baseado na percentagem de vazios (V_v), nos vazios do agregado mineral (VAM), na percentagem de vazios preenchido com asfalto e razão fíler/asfalto.

Cavalcanti (2010) ressalta que embora seja recente, a metodologia de dosagem SUPERPAVE nível 1, que é a utilizada no Brasil, tem limitação assim como na metodologia Marshall, de apenas considerar os parâmetros volumétricos, sendo as propriedades mecânicas as que realmente se relacionam diretamente com o desempenho da mistura.

O nível 2 - para tráfego com ESAL entre 10^6 e 10^7 . Usam-se o projeto volumétrico como ponto de partida e uma bateria de testes com os equipamentos: Analisador de Cisalhamento SUPERPAVE (SUPERPAVE Shear Tester - SST) e Analisador de Tração Indireta (Indirect Tensile Tester - IDT). Estes são testes de predição de desempenho.

O nível 3 - para tráfego com ESAL acima de 10^7 . Engloba os passos dos níveis 1 e 2 e testes adicionais com o SST e IDT em uma faixa mais ampla de temperatura e ensaios com corpos-de-prova confinados. A previsão de desempenho do nível 3 é mais confiável, pois se baseia num grupo de ensaios maior (LEITE *et. al*, 1996).

A Dosagem SUPERPAVE tem como diferença mais importante em relação ao Marshall o tipo de compactação: utiliza um compactador designado de giratório, que aplica energia por amassamento. Este tipo de compactador giratório SUPERPAVE (CGS) foi adotado pelos pesquisadores do SHRP como dispositivo que compacta a amostra de mistura asfáltica mais próxima à forma de compactação feita em campo, de modo que as densidades finais fossem aquelas obtidas no pavimento através de condições reais de clima e carregamento. Onde o seu funcionamento se compara a de um rolo compressor que, em vez de aplicar golpes de impacto, faz a compactação exercendo uma tensão de amassamento na mistura. Os parâmetros utilizados na operação do CGS são: ângulo de rotação de $1,25 \pm 0,02^\circ$; taxa de 30RPM; tensão de compressão aplicada ao CP durante a rotação de 600kPa e capacidade de reproduzir corpos de provas com diâmetro de 100mm e 150mm (CAVALCANTI, 2010).

Uma limitação da dosagem Superpave é que ela considera apenas os parâmetros volumétricos na definição do projeto de mistura. Contudo são as propriedades mecânicas que estão mais relacionadas com o desempenho dos revestimentos asfálticos, fato pelo qual foram desenvolvidos diferentes tipos de testes para caracterizar o seu comportamento em termos de deformação permanente (BAHIA e FAHEEM, 2007).

2.2.2.2.1 Parâmetros de Compactação

Para este método, as misturas dosadas são compactadas no compactador giratório onde é possível obter uma curva relacionando o aumento da densidade aparente da mistura com o número de giros do compactador, conhecidas como curvas de densificação. A partir dessa curva é possível obter os índices *Construction Densification Index* (CDI) e *Traffic Densification Index* (TDI), que podem ser utilizados para prever a trabalhabilidade da mistura e a resistência da mesma à deformação permanente, respectivamente (MAHMOUD e BAHIA, 2004).

Estes autores propuseram o uso de dois índices: *Compaction Densification Index* (CDI) e *Traffic Densification Index* (TDI), como requisitos para o procedimento de dosagem de misturas asfálticas. Os índices CDI e TDI são determinados a partir das curvas de densificação e representam o comportamento das misturas durante a construção da pista e durante a vida de serviço (Figura 6). Controlando esses índices é esperado que houvesse uma otimização dos requerimentos de construção e tráfego.

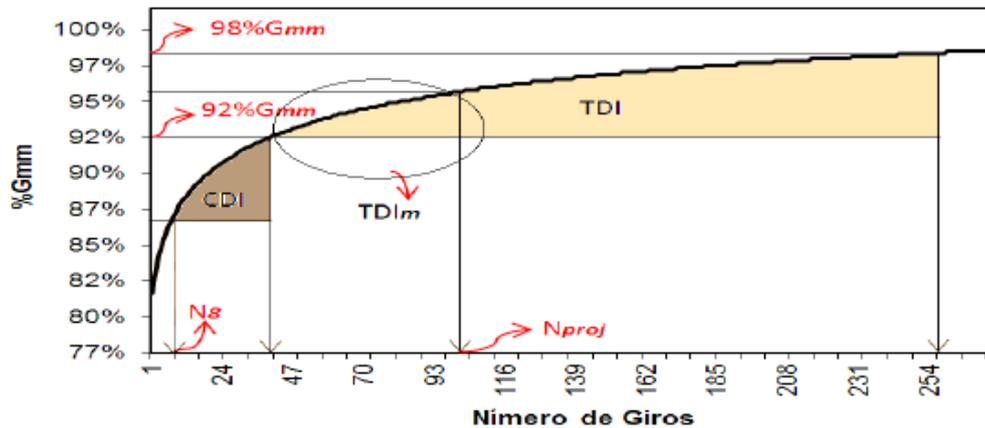


Figura 6: CDI, TDI e TDIm determinados a partir da curva de compactação Superpave

Fonte: Lopes *et al* (2010)

O CDI é definido como a área abaixo da curva de densificação (Figura 8) obtida com o SGC a partir do giro de número 8 (N8) até o ponto equivalente a 92% da densidade máxima

medida da mistura. Seria o equivalente a compactação pelos rolos compactadores em campo. Misturas com valores de CDI acima de determinado valor, tem melhor compatibilidade, enquanto misturas com valores de CDI baixos tem problemas de estabilidade e devem ser evitadas.

Nascimento (2008) afirma que misturas com valores de CDI entre 50 e 100, têm melhor compactabilidade, enquanto misturas com valores de CDI baixos têm problemas de estabilidade e devem ser evitadas. Como o CDI é uma medida volumétrica de representação do trabalho da vibro acabadora no início do processo de espalhamento do material do pavimento, um valor alto inviabiliza a compactação e um valor muito baixo deixa o pavimento suscetível a afundamentos devido à deformação plástica (excesso de ligante).

O TDI é a área sob a curva de densificação entre 92 e 98% do valor da Gmm (Figura 8). Este índice baseia-se no princípio de que o pavimento continua sua compactação após sua abertura ao tráfego. Embora a compactação giratória seja realizada em temperaturas bem mais altas do que a temperatura de serviço do pavimento, tendo-se em vista a estrutura pétreia influencia no comportamento da mistura asfáltica, espera-se que o índice TDI oriundo da compactação giratória esteja relacionado com a estabilidade da mistura. Quanto maiores os valores de TDI, melhores são as expectativas do revestimento, resistir aos esforços impostos pelo tráfego durante sua vida de serviço (NASCIMENTO, 2008).

Existe ainda o chamado TDI modificado (TDIm), adotado por Nascimento (2008), que é calculado de 92% de Gmm até o giro do Nprojeto. Este parâmetro é utilizado quando os CPs não são compactados até 98% da Gmm, possibilitando o aproveitamento dos corpos de prova moldados até o Nprojeto.

Bahia e Faheem (2007) estabelecem como valor mínimo para TDI de 400, já Nascimento (2008) afirma que os valores mínimos de TDIm devem ser de 250 para uma boa estabilidade da mistura.

2.2.3. Ensaio Mecânicos em Misturas Asfálticas para Análise do Desempenho

Os ensaios mecânicos são utilizados para análise dos parâmetros de desempenho das misturas asfálticas. São comumente realizados em laboratório e estabelecidos com o objetivo de reproduzir as condições de campo, embora impliquem às vezes na adoção de elevados fatores de ajuste campo-laboratório.

Os ensaios mecânicos dividem-se em ensaios que avaliam a resistência e a deformabilidade das misturas. Os ensaios empregados para deformações permanentes estão apresentados a seguir.

2.2.3.1. Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral

Este ensaio foi desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo Carneiro para determinação da resistência à tração de corpos-de-prova cilíndricos de concreto de cimento portland, através de solicitação estática. É conhecido em vários centros de pesquisa no exterior como “ensaio brasileiro”. A resistência à tração (RT) tem se mostrado um importante parâmetro para a caracterização de misturas asfálticas.

Consiste na aplicação de um esforço no corpo de prova que é dado por duas forças de compressão concentradas e diametralmente opostas em um cilindro, que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendicular a esse diâmetro (MEDINA e MOTTA, 2005). A realização deste ensaio pode ser feita utilizando-se a própria prensa de ensaio de estabilidade Marshall conforme mostrado na Figura 07.



Figura 7: Exemplo de prensa de ensaio de resistência à tração indireta

O Valor da resistência à tração indireta (RT) é dado pela equação (1)

$$RT = \frac{2.F}{\pi.D.H} \quad (1)$$

Onde:

RT = Resistência à tração;

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

D = Média de quatro medidas do diâmetro do corpo de prova;

H = Média de quatro medidas da altura do corpo de prova.

2.3.3.2. Módulo de Resiliência (MR)

O módulo de resiliência (MR) é um módulo de elasticidade obtido em condições de carregamento cíclico, ao qual são submetidos os materiais de pavimentação. É análogo ao módulo de elasticidade **E**, sendo ambos definidos como razão entre tensão e deformação. A diferença é que o Módulo de Resiliência é determinado em ensaio de carga repetida. Valores de pico das tensões e das deformações recuperáveis que ocorrem nos ensaios são aproveitados para calcular a constante elástica resiliente mesmo que a tensão de pico ou deformação recuperável não ocorra ao mesmo tempo em um teste dinâmico deste tipo. Apesar de este enfoque negligenciar os efeitos da perda de energia, o uso da resposta resiliente parece dar resultados satisfatórios em cálculos de tensão e deformação de um pavimento (BARKSDALE et al, 1997 *apud* MARQUES, 2004).

Os estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais usados em pavimentação foram iniciados na década de 1930 com Francis Hveem, que foi o primeiro a relacionar as deformações recuperáveis (resiliência) com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos. Foi ele também quem adotou o termo “resiliência”, que é definido classicamente como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. Hveem criou um equipamento chamado estabilômetro para medir essas deformações verticais através de sensores eletromecânicos (strain gages). O nome módulo de resiliência (resilient modulus em inglês) foi criado para que não fosse confundido com o módulo de Young, determinado estaticamente (BERNUCCI *et al*, 2006).

O ensaio de módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas é padronizado no Brasil através da norma DNIT-ME 135/2010 e não faz distinção da deformação específica instantânea da deformação específica total, como é feito pela norma ASTM D 4123/82. Estas deformações permitem a obtenção de dois valores de MR: um denominado módulo de resiliência instantâneo e o outro total. O módulo instantâneo é calculado com base na deformação horizontal que ocorre na fase de descarregamento de um ciclo de carga-descarga, e o módulo de resiliência total, usando a deformação total recuperável, que inclui a deformação recuperável instantânea e a dependente do tempo durante a fase de descarregamento (MARQUES, 2004).

O ensaio é realizado aplicando-se cargas repetidas num intervalo de 0,1 s e repouso de 0,9 s, no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico. Essa carga gera uma tensão transversal ao plano de aplicação da carga e medidores LVDT medem o deslocamento diametral recuperável na direção correspondente à tensão gerada (deslocamento horizontal). Esta aplicação de carga simula o efeito do tráfego, que aplica cargas transientes do movimento dos veículos. Na Figura 8 tem-se a duração do tempo de carregamento e repouso.

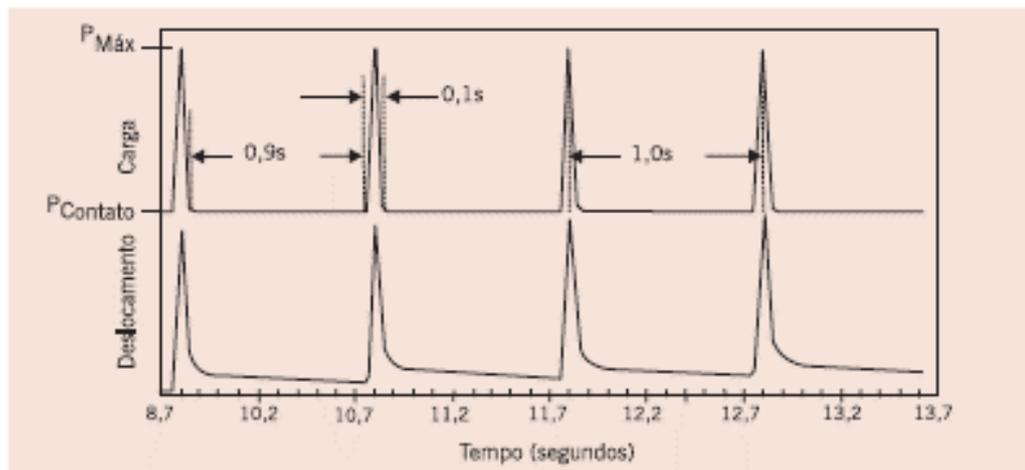


Figura 8: Duração do tempo de carregamento e repouso.

Fonte: Bernucci *et al*(2006).

Nas Figuras 9 e 10 tem-se as parcelas dos deslocamentos obtidos durante o ensaio de MR.

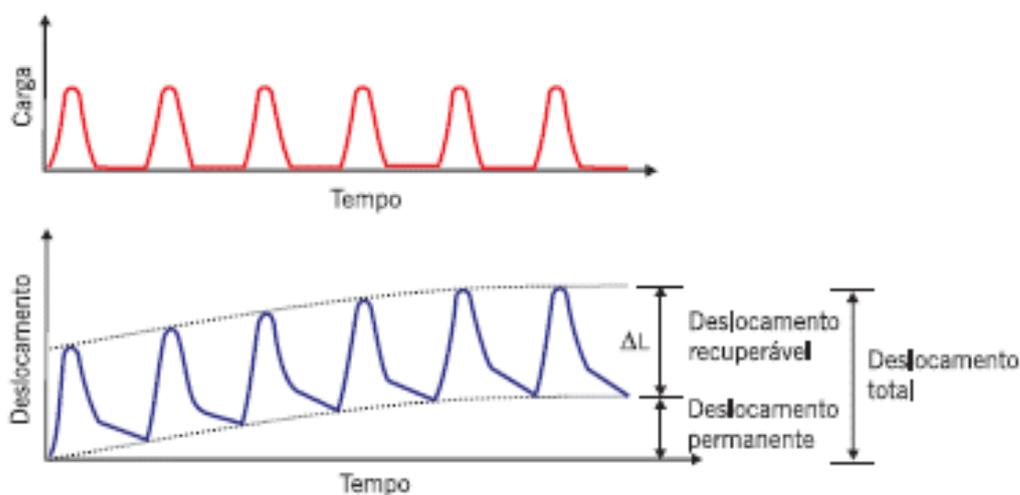


Figura 9: Parcelas dos deslocamentos resilientes e permanentes registrados durante

Fonte: Bernucci *et al*(2006).

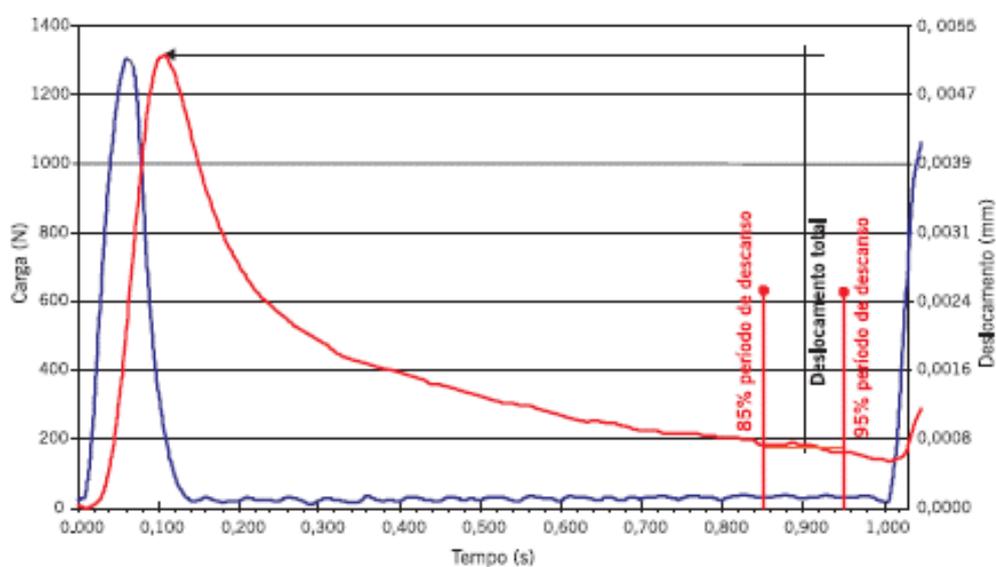


Figura 10: Deslocamento resiliente total

Fonte: Bernucci *et al*(2006).

Núñez *et al* (2007) assegura que o módulo de resiliência (MR) é um fator importante na definição do dimensionamento racional dos pavimentos, estando intimamente ligado ao projeto da mistura. É a razão entre a tensão de tração e a correspondente deformação específica recuperável, quando as misturas asfálticas são submetidas a carregamentos repetidos, de curta duração.

Um pavimento com camada asfáltica típica está sujeita à flexão quanto à ação de uma carga. Onde esta ação será resistida pela rigidez radial ao invés da rigidez vertical desta camada, sendo assim, para corpos-de-prova verticais extraídos do pavimento, o ensaio diametral ou viga à flexão seriam mais representativos quanto a rigidez da camada. Contudo o ensaio diametral tem vantagem por utilizar corpos-de-prova delgados, que permite avaliar diversas seções de um pavimento. Outra grande vantagem é o de ser um ensaio não-destrutivo, permitindo que sejam determinadas outras propriedades do material após sua caracterização, como, por exemplo, teor de ligante, resistência à tração, desgaste, densidade, etc. (BRITO, 2006).

O MR para misturas asfálticas pode variar: com o tipo de mistura, faixa granulométrica, tipo de ligante, propriedades volumétricas, energia de compactação, temperatura de compactação e pela temperatura do ensaio. O MR para materiais viscoelásticos varia tanto com o tempo de aplicação da carga como com o tempo de repouso, uma vez que o deslocamento recuperável depende dos dois. Para materiais viscoelásticos lineares, embora o deslocamento total varie com o número de ciclos de aplicação de carga devido ao acúmulo de deslocamentos não-recuperáveis, onde o deslocamento não-recuperável deve se manter constante ao longo dos ciclos (BERNUCCI *et al.*, 2006).

Motta (1998) descreve que muitos fatores influenciam na estimativa do Módulo de Resiliência de misturas asfálticas e não é trivial se obter uma relação simples de estimativa que leve em conta todos os aspectos da mistura. Porém, de uma forma geral, pode-se dizer que o Módulo de Resiliência varia com a granulometria da mistura (sendo maior quanto mais grossa for a faixa adotada) e com o ligante asfáltico (sendo maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade), mas não é muito sensível ao teor de asfalto, dentro da faixa normal de dosagem.

As principais diferenças entre o Módulo de Resiliência e o Módulo Complexo é que neste último, levam-se em conta as parcelas elásticas e não elásticas das deformações, e se utilizam carregamentos *haversine*, enquanto no Módulo de Resiliência utilizam-se carregamentos de ondas semi-seno-verso quadradas em compressão diametral ou flexão e só a parcela elástica é levada em conta no cálculo do módulo.

2.2.3.3 Módulo Dinâmico Uniaxial

O módulo dinâmico é o valor absoluto do módulo complexo $|E^*|$, e é definido por uma porção real e outra imaginária. Por definição, o módulo complexo, E^* , é um número complexo que relaciona tensão e deformação para materiais viscoelásticos sujeitos a carregamento senoidal aplicado num certo domínio de frequência (MARQUES, 2007).

O desenvolvimento deste ensaio é anterior a 1960 e foi realizado pelos pesquisadores da Universidade do estado de Ohio, nos EUA. Papazian realizou ensaios aplicando tensões senoidais a corpos-de-prova, medindo as deformações resultantes, concluindo que os conceitos de viscoelasticidade poderiam ser aplicados nos estudos dos pavimentos asfálticos. O ensaio é hoje conhecido como ensaio de Módulo Dinâmico (MD), de onde se extraem propriedades viscoelásticas como módulo dinâmico $|E^*|$ e o ângulo de fase (AF). (THEISSEN, 2011)

Em 1979 foi adotado pela ASTM como método de ensaio padrão para determinação do módulo dinâmico de misturas asfálticas (ASTM D 3497-79). Atualmente, existe uma série de ensaios para a obtenção do MD em misturas asfálticas e o ensaio pode ser realizado com vários tipos de corpo-de-prova, entre eles pode se citar, as amostras cilíndricas, com diâmetro mínimo de 100 mm, usado por pesquisadores americanos e as amostras em formato de vigas trapezoidais a flexão em dois pontos, propostos pelos pesquisadores do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) (BRITO 2006).

Di Benedetto *et al.* (2001) afirma que o uso de corpos cilíndricos permite medidas diretas de tensões e deformações, caracterizando um ensaio homogêneo. Já na viga trapezoidal, as tensões e deformações não são diretamente calculadas, buscando-se uma solução analítica para a estrutura, para assim extrair-se os parâmetros, caracterizando um ensaio não homogêneo.

O ensaio consiste basicamente na aplicação de um carregamento axial semi-senoidal (*haversine*) em CP's cilíndricos, sendo medidos os deslocamentos verticais correspondentes. Ao avaliar uma mistura asfáltica no domínio das pequenas deformações onde o comportamento esperado é viscoelástico linear, uma solicitação sinusoidal aplicada desencadeia uma resposta também sinusoidal.

Duas normas americanas podem ser usadas para a realização do ensaio: AASHTO T 342/2011 e ASTM D 3497. Ambas as normas determinam que a amostra seja submetida a um carregamento por compressão axial. A execução do ensaio em várias frequências resulta não

somente em parâmetros, mas sim numa curva como resultado do ensaio. Se esta curva é feita para diferentes temperaturas, a união destas curvas resulta numa curva mestra do material em função da frequência reduzida (Figura 11), sendo um importante instrumento na caracterização de misturas asfálticas para o dimensionamento e análise de pavimentos (THEISEN, 2011).

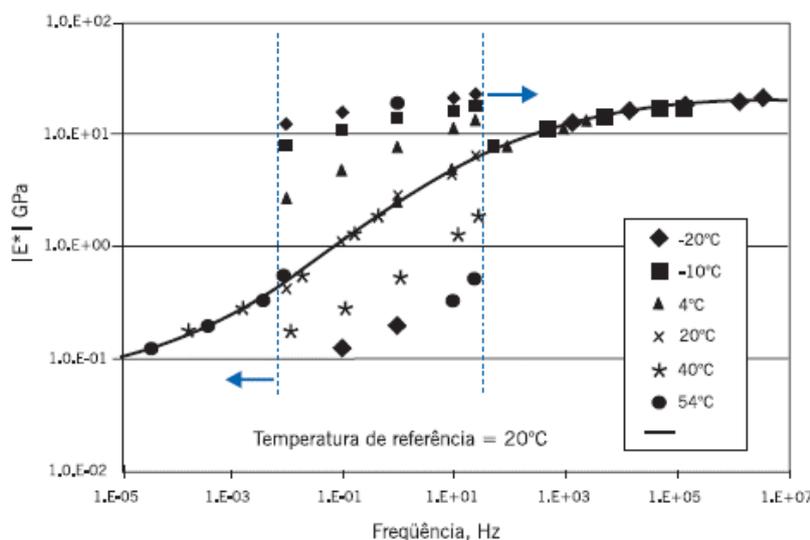


Figura 11: Curva mestra de módulo dinâmico

Fonte: Bernuci *et al.*, 2006.

Como pode ser visto na Figura 11, o MD cresce em função da frequência e este crescimento deve-se ao fato de que quando a frequência é aumentada existe um tempo menor em carga, não havendo tempo para manifestações de deformações viscoelásticas. Quando a frequência é muito alta, o MD atinge seu maior valor, pois só existem praticamente deformações elásticas no material. Quando a temperatura é baixa, o tempo de carregamento é longo e as deformações viscoelásticas podem se manifestar em sua totalidade, provocando assim MD baixo. Para frequências muito baixas, o MD atinge seu menor valor, assim explicando o formato da curva mestra (THEISEN, 2011).

A norma da AASHTO T 311/2011 para o ensaio de módulo dinâmico estabelece um procedimento de ensaio com frequências que variam de 0,1Hz a 25Hz em temperaturas de -10°C a 54,4°C, e que o carregamento dinâmico depende da rigidez do material, podendo

variar de 15kPa a 2800kPa. As amostras devem apresentar dimensões de 100mm de diâmetro e 150mm de altura,

Já a norma da ASTM D 3497 estabelece apenas três temperaturas de ensaio (5°C, 25°C e 40°C), três frequências de carregamento (1Hz, 4Hz e 16Hz), e carregamentos com valores de até 200kPa, tornando imprecisa a construção das curvas. Os CP's possuem diâmetro mínimo de 100mm e relação altura/diâmetro de 2 para 1.

O ensaio proporciona o valor do módulo complexo da amostra em temperaturas diferentes e frequências diferentes. O módulo complexo E^* é um número complexo definido pela relação entre a amplitude complexa da tensão sinusoidal da pulsação ω aplicada ao material $\sigma = \sigma_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$ e a amplitude complexa da deformação sinusoidal que resulta em regime estável. Em consideração à característica viscoelástica do material, a deformação apresenta uma defasagem com relação à tensão, o que é traduzido por um ângulo de fase ϕ entre os dois sinais: $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \text{sen}(\omega t - \phi)$. Isso fornece parâmetros indicativos da predominância viscosa ou elástica do material, conforme os valores extremos:

$\phi = 0^\circ$ para materiais puramente elásticos;

$\phi = 90^\circ$ para materiais puramente viscosos.

O módulo complexo tem sua notação conforme as equações abaixo:

$$\sigma(t) = \text{Im}[\sigma_0 \cdot e^{i\omega t}] \text{ com } \sigma^*(t) = \sigma_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = \text{Im}[\varepsilon^*(t)] \text{ com } \varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{i\omega t} \quad (3)$$

$$E^*(t) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \cdot e^{-i\phi}} = |E^*| e^{i\phi} \quad (4)$$

Onde:

$|E^*|$ é denominado módulo dinâmico ou módulo de rigidez.

ϕ é denominado ângulo de fase do material (permite estimar a energia de dissipação do material).

A seguinte notação pode igualmente ser utilizada (lembre-se que $i = \sqrt{-1}$).

$$E^*(I\omega) = E^1 + iE^2 \quad (5)$$

E^1 é denominado módulo elástico real: parte real do módulo e que está associado ao comportamento elástico do material. Permite avaliar a parte recuperável da energia armazenada.

E^2 é denominado módulo da perda: parte imaginária do módulo e está associada ao

comportamento viscoso irreversível do material devido a uma dissipação de energia. Este valor representa a energia produzida por atrito interno no material.

O módulo complexo permite a generalização dos corpos viscoelásticos pelas leis mecânicas, cujo princípio é reservado somente aos corpos elásticos. O E^* tem sido a base para o desenvolvimento de modelos de previsão para caracterizar a resposta tensão deformação de misturas asfálticas, quando o material não é elástico.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1. Planejamento da pesquisa

Tendo em vista os objetivos propostos para este trabalho de mestrado, a metodologia empregada consistiu, num primeiro momento, na realização de dosagens de misturas asfálticas utilizando o compactador giratório Superpave (SGC).

Para isso, selecionaram-se agregados minerais de boa qualidade, de origem vulcânica, oriundos da Pedreira TRS, Santo Antônio da Patrulha – RS, os quais foram submetidos a uma avaliação completa de suas propriedades físicas e mecânicas, visando sua aplicação em pavimentação. Para uso nesta pesquisa, os agregados minerais foram separados por peneiramento, sendo utilizados pedras 3/4, 3/8 e pó-de-pedra, viabilizando, desta forma, a composição da melhor curva granulométrica. Os agregados foram enquadrados na Faixa C – DNIT 031/2006-ES.

Em termos de ligante, foram utilizados 4: o CAP 50/70, o CAP TLA, o CAP 60/85 e o CAP TLA FLEX.

A combinação de uma faixa granulométrica com 4 tipos de CAP resultou em 4 diferentes combinações, que compõem o universo principal de misturas asfálticas da presente pesquisa.

Realizaram-se as moldagens pela metodologia Superpave das amostras para escolha do teor de projeto de ligante para cada um dos ligantes estudados. Posteriormente moldou-se 108 corpos-de-prova (CP), sendo 96 nas dimensões de 10 cm x 6,5 cm para ensaios de MR e RT e 12 nas dimensões de 10 cm x 15 cm para ensaios de Módulo Dinâmico.

Para os ensaios de MR e RT foram utilizados 48 CP's moldados com 4% de volume de vazios e 48 com 5,5% de volume de vazios, totalizando as 96 amostras. Já nos ensaios de Módulo Dinâmico as amostras continham 5,5% de volume de vazios, como pode ser observado na Tabela 01.

Tabela 1: Número de amostras por ligante

Ligante	N ° Amostra para cada Ligante		
	E*	MR/RT	
	5,5% vv	4,0 % vv	5,5% vv
CAP 50/70	3	12	12
CAP TLA	3	12	12
TLA 60/85	3	12	12
TLA FLEX	3	12	12
Parcial	12	48	48
Total		108	

Com os resultados das dosagens obtidas, foram comparados os teores de projeto de ligante e as propriedades volumétricas das misturas. Para as misturas asfálticas dosadas com o SGC, foram calculados os índices de compactação giratória baseados nas curvas de densificação (%Gmm versus número de giros): o CDI e TDI.

Com estas misturas asfálticas, foram feitos ensaios uniaxiais com diferentes temperaturas com varredura de frequências para determinação do módulo dinâmico (E*), ensaios de módulo de resiliência (MR) e resistência à tração por compressão diametral (RT).

Nos ensaios com as amostras de MR/RT primeiramente foram realizados os ensaios de MR. Realizou-se este ensaio com amostras com 2 volumes de vazios, 3 temperaturas diferentes 10° C, 25° C e 35° C e 3 frequências de carregamentos diferentes 0,1 Hz, 1 Hz e 10 Hz.

Trabalhou-se com valores diferentes de vazios, pois utilizou-se normas brasileiras e americanas. A norma brasileira cobra 4% de volume de vazios para o ensaio de MR, já a norma americana pede o volume de vazios em que o pavimento é liberado ao tráfego.

Após os ensaios laboratoriais e realização de uma análise de desempenho pelo software *AASHTOWare*, os dados obtidos foram tabulados e analisados em planilha eletrônica do Excel para de forma a cumprir os objetivos da pesquisa.

3.2. Materiais utilizados

3.2.1 Agregados Minerais

Para conhecer o desempenho potencial dos agregados, é importante considerar como são formados e o que aconteceu com eles desde então, antes de serem utilizados em um revestimento asfáltico. O agregado escolhido para uma determinada utilização deve apresentar propriedades de modo a suportar tensões impostas na superfície e no interior do pavimento. O desempenho das partículas de agregado é dependente da maneira como são produzidas, mantidas unidas e das condições sob as quais vão atuar. A escolha é feita em laboratório onde uma série de ensaios é utilizada para a predição do seu comportamento posterior quando em serviço (BERNUCCI *et al*, 2006).

Os materiais granulares foram coletados diretamente das unidades de produção, de forma a ter sua adequada representatividade, e então realizados os ensaios de caracterização de cada fração como granulometria, forma, sanidade, abrasão, massa específica e análise petrográfica. Estes ensaios laboratoriais foram realizados no LMCC (Laboratório de Materiais de Construção Civil) da UFSM (Universidade Federal de Santa Maria).

Os materiais desta pesquisa são aqueles convencionalmente utilizados em obras e empreendimentos rodoviários e disponíveis na região de atuação do projeto. O agregado é proveniente de Santo Antônio da Patrulha, localizado no estado do Rio Grande do Sul, conforme Figura 12. O material é oriundo da Pedreira TRS, localizada às margens da BR-290 (km 30).



Figura 12: Localização de Santo Antônio da Patrulha no estado do Rio Grande do Sul

Fonte: Prefeitura de Santo Antônio da Patrulha(2013)

O material pétreo é originário de uma rocha dácito, de origem vulcânica básica da planície costeira.

Para o projeto de confecção da massa asfáltica foi tomado como referência o projeto executado com a metodologia Marshall e que já havia sido implementado em campo. Os agregados foram enquadrados na Faixa C – DNIT 031/2006-ES. Foi utilizada para esta pesquisa a proporção de 22% para brita $\frac{3}{4}$, 32% de brita $\frac{3}{8}$ e 46% de pó de pedra. A Figura 13 apresenta a curva granulométrica da mistura com relação à faixa adotada.

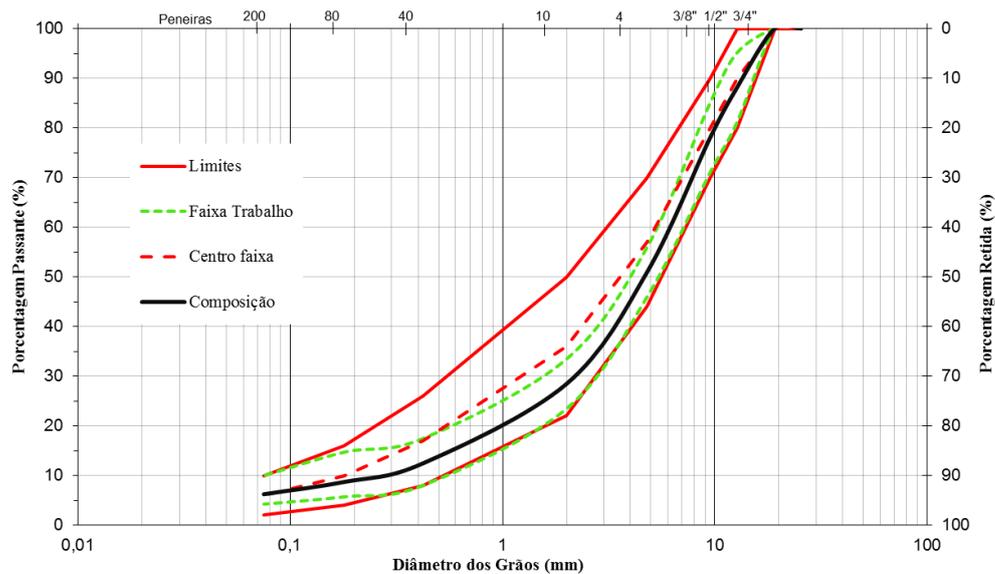


Figura 13: Gráfico da composição granulométrica do agregado ajustado à faixa "C" do DNIT

Na Tabela 02, apresentam-se as características dos materiais pétreos utilizados.

Tabela 2: Características dos agregados utilizados na pesquisa

Propriedade	Norma	Graúdo	Miúdo
Absorção	DNER-ME 195/97	1,827	-
Massa específica real do grão	DNER-ME 195/97	2,828	2,597
Massa específica aparente do grão	DNER-ME 195/97	2,689	-
Desgaste ou perda à Abrasão	DNER-ME 035/98	10,26	-
Sanidade	DNER-ME 089/94	0,395	-
Equivalente de areia	DNER-ME 054/97	-	68,74
Umidade	DNER-ME 196/98	1,12	-
Índice de lamelaridade brita 3/4	DNER-ME 086/94	14	-
Índice de lamelaridade brita 3/8	DNER-ME 086/94	28,6	-

3.2.2 Ligantes

O cimento asfáltico ou ligante asfáltico pode ser considerado um material viscoelastoplástico e termo sensível, ou seja, possui uma parcela viscosa, elástica e plástica; é

sensível a mudança de temperatura, em altas temperaturas (acima de 100 °C) se torna plástico, quando recebe um carregamento, o material deforma e não volta ao estado original, o cimento asfáltico atua como um fluido viscoso e em baixas temperaturas (abaixo de 0 °C), o cimento se torna elástico, atuando como uma borracha: quando recebe um carregamento, o material se deforma, quando o carregamento é retirado, o material volta ao estado original.

Para a presente pesquisa foram aproveitados quatro tipos de ligantes asfálticos, sendo eles: CAP 50/70, CAP TLA, CAP 60/85 e CAP TLA Flex, cujas propriedades encontram-se nas Tabelas 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

Destes ligantes asfálticos, o CAP 50/70 é o mais comumente utilizado no país, sem adição de polímeros, o CAP 60/85 é um asfalto em que há a adição de polímero SBS, o CAP TLA, é a modificação do ligante asfáltico convencional com 25% de asfalto natural oriundo da jazida da ilha de Trinidad e Tobago, e o CAP TLA Flex é o CAP TLA com adição de polímero SBS.

O CAP 50/70 tem sua origem na Refinaria de Petróleo Alberto Pasqualini (REFAP) residente na cidade de Canoas/RS. O cimento asfáltico foi coletado em latas metálicas de 3,6 l e 18 l diretamente do caminhão fornecedor, após ter suas propriedades conferidas para sua posterior utilização na Usina de Asfalto da empresa Triunfo/Concepa em Santo Antônio da Patrulha/RS.

Tabela 3: Propriedades do CAP 50/70

Ensaio	Unidade	CAP 50/70	
¹ Penetração a 25°C, 5s, 100 g	0,1mm	62,00	
¹ Ponto de Amolecimento	°C	47,80	
¹ Ponto de Fulgor	°C	>236,0	
¹ Visc. Brookfield a 135°C, SP21, 20 RPM	cP	317,50	
¹ Visc. Brookfield a 150°C, SP21, 50 RPM	cP	150,50	
¹ Visc. Brookfield a 177°C, SP21, 100 RPM	cP	59,50	
¹ Densidade relativa à 20/4°C	Anotar	1,01	
² PG	-	58-16	
APÓS ENVELHECIMENTO NO RTFOT			
² DSR	Temp (°C)	G* (KPa)	φ (°)
	58	4,66	85,49
	64	1,98	86,89
	70	0,91	87,98

Tabela 4: Propriedades do CAP TLA

Ensaio	Unidade	CAP TLA	
¹ Penetração a 25°C, 5s, 100 g	0,1mm	43,00	
¹ Ponto de Amolecimento	°C	53,00	
¹ Ponto de Fulgor	°C	>235,00	
¹ Visc. Brookfield a 135°C, SP21, 20 RPM	cP	552,50	
¹ Visc. Brookfield a 150°C, SP21, 50 RPM	cP	258,00	
¹ Visc. Brookfield a 177°C, SP21, 100 RPM	cP	96,00	
¹ Densidade relativa à 20/4°C	Anotar	1,07	
² PG	-	70-22	
APÓS ENVELHECIMENTO NO RTFOT			
² DSR	Temp (°C)	G* (KPa)	φ (°)
	64	5,78	84,85
	70	2,52	86,4
	76	1,13	87,58

Fonte: Betunel¹/COPPE²

Tabela 5: Propriedades do CAP 60/85

Ensaio	Unidade	CAP 60/85	
¹ Penetração a 25°C, 5s, 100 g	0,1mm	58,00	
¹ Ponto de Amolecimento	°C	64,00	
¹ Ponto de Fulgor	°C	268,00	
¹ Visc. Brookfield a 135°C, SP21, 20 RPM	cP	1020,00	
¹ Visc. Brookfield a 150°C, SP21, 50 RPM	cP	590,00	
¹ Visc. Brookfield a 177°C, SP21, 100 RPM	cP	186,00	
¹ Densidade relativa à 20/4°C	Anotar	1,01	
² PG	-	76-22	
APÓS ENVELHECIMENTO NO RTFOT			
² DSR	Temp (°C)	G* (KPa)	φ (°)
	70	7,01	66,07
	76	3,34	66,53
	82	1,9	66,63

Fonte: Compasa¹/COPPE²

Tabela 6: Propriedades do CAP TLA Flex

Ensaio	Unidade	CAP TLA Flex	
¹ Penetração a 25°C, 5s, 100 g	0,1mm	21,00	
¹ Ponto de Amolecimento	°C	65,00	
¹ Ponto de Fulgor	°C	>235,0	
¹ Visc. Brookfield a 135°C, SP21, 20 RPM	cP	1635,00	
¹ Visc. Brookfield a 150°C, SP21, 50 RPM	cP	783,00	
¹ Visc. Brookfield a 177°C, SP21, 100 RPM	cP	262,00	
¹ Densidade relativa à 20/4°C	Anotar	1,07	
² PG	-	76-10	
APÓS ENVELHECIMENTO NO RTFOT			
² DSR	Temp (°C)	G* (KPa)	φ (°)
	70	6,08	49,63
	76	4,78	71,54
	82	2,43	79,11

Fonte: Betunel¹/COPPE²

3.3. Ensaios laboratoriais

3.3.1. Dosagem das misturas

As dosagens das misturas foram elaboradas utilizando os critérios SUPERPAVE nível de projeto 1, sendo suprimidas as fases de compactação para determinação do teor tentativo e de escolha da granulometria, pois já havia uma granulometria definida. Moldaram-se corpos de prova empregando teores de 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0% para todas as misturas, para assim determinar qual o teor ideal de ligante de projeto.

As misturas preparadas para dosagem foram feitas manualmente, em bacias metálicas sobrepostas em chapa aquecida, sendo que após a homogeneização foram condicionadas durante 2 horas em estufa, na temperatura de compactação, previamente à sua moldagem, de acordo com o procedimento AASHTO R 30-02 – *Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt*.

As curvas de dosagem foram obtidas com 4 teores de ligante, sendo que em cada teor testa-se 3 ou 4 corpos-de-prova. Em alguns casos avaliou-se teores adicionais, ou corpos-de-prova extras em cada teor, de acordo com a dispersão dos resultados obtidos.

A densidade específica aparente (G_{sb}) dos corpos-de-prova foi determinada segundo AASHTO T 166-05. Na G_{sb} , o volume aparente inclui o volume de agregado sólido mais o volume dos poros superficiais contendo água. É medido quando o agregado está na condição Saturada Superfície Seca (SSS) e pode ser calculado pela equação 6.

$$G_{sb} = \frac{W_s}{(V_s + V_{pp}) \cdot \gamma_w} \quad (6)$$

A determinação da densidade específica máxima (G_{mm}) foi feita segundo AASHTO T 209-05 (método de Rice), onde cada mistura foi determinada com os teores utilizados na dosagem. Assim, com o valor da G_{mm} e da densidade do ligante asfáltico pôde-se obter o valor da densidade específica efetiva dos agregados, que foi utilizada para o cálculo da G_{mm} dos corpos-de-prova com outros teores.

Com as propriedades físicas dos agregados e das misturas asfálticas, foram calculados os seguintes parâmetros volumétricos dos corpos-de-prova: porcentagem de vazios com ar (V_a), vazios no agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV) e relação pó-betume efetivo (RPB). Tais cálculos seguiram as recomendações do *Asphalt Institute (Asphalt Handbook – MS-4, 1989)*.

Na Tabela 7 estão apresentados os requisitos volumétricos das amostras com tamanho máximo nominal de 19mm para dosagem Superpave.

Tabela 7: Requisitos volumétricos das amostras para TMN de 19mm

CAP	Volume de Vazios (%)	VAM min(%)	RBV(%)	RPB(%)
50/70	4,00	13%	65-75	0,6-1,2
TLA	4,00	13%	65-75	0,6-1,2
60/85	4,00	13%	65-75	0,6-1,2
TLA FLEX	4,00	13%	65-75	0,6-1,2

A moldagem dos corpos de prova foi executada utilizando-se o compactador giratório IPC Servopac com sistema de carga eletropneumático, conforme o esquema simplificado mostrado nas Figuras 14, 15 e 16. O número de giros de projeto adotado foi $N_{proj} = 100$, que representa um tráfego equivalente a carga de eixo simples entre $3 \cdot 10^6$ e $3 \cdot 10^7$, considerado em vias urbanas de tráfego médio a pesado. O molde utilizado para moldagem dos corpos de prova

foi o de 100 mm de diâmetro.

O compactador giratório permite apenas a compactação de um corpo de prova por vez, assim cada amostra era colocada no molde pré-aquecido na temperatura de compactação e moldada aplicando-se 100 giros.



Figura 14: Etapas da preparação das misturas asfálticas. A: Separação granulométrica através do peneiramento. B: Estufa utilizada na secagem, aquecimento de moldes, envelhecimento da mistura e aquecimento do ligante. C: Material seco e aquecido para moldagem. D: Molde sendo aquecido e mistura asfáltica sendo envelhecida. E: Massa asfáltica em processo de envelhecimento na temperatura de compactação. F: Compactador Giratório – CGS. G: Moldes utilizados na compactação. H: CPs moldados no CGS.

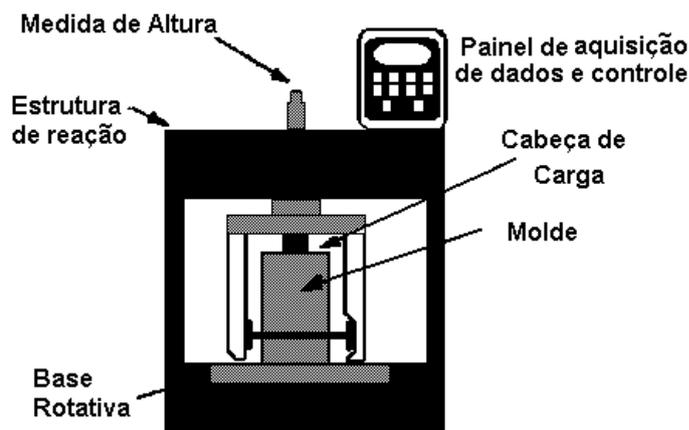


Figura 15: Esquema do compactador giratório Superpave

Fonte: Marques, 2001.

Observou-se durante o preenchimento do molde com a mistura que havia tendência dos agregados graúdos caírem primeiro. Prevendo-se que o excesso de agregado graúdo na base pudesse interferir no comportamento do corpo de prova, adotou-se o procedimento de homogeneizar a amostra de modo a se evitar a queda de muitas partículas graúdas no início da moldagem.

As amostras são fixadas nesta estrutura suportando o molde e permitindo seu giro. Durante a compactação a cabeça de carga é que faz a compressão do corpo-de-prova e o seu diâmetro corresponde nominalmente ao diâmetro interno do molde (100mm). Para que o molde seja posicionado no ângulo de giro são usados mancais. O ângulo de compactação do SGC é definido em $1,25^\circ$. A velocidade constante de giro é de 30 rpm sendo acionada por um motor elétrico que atua sobre a base rotativa, enquanto que a pressão de compactação no corpo-de-prova é de 600kPa, fornecida por um sistema hidráulico ou mecânico que aplica a carga na cabeça de carga.

A pressão da cabeça de carga é medida durante a compactação e à medida que o corpo-de-prova vai se adensando, o sistema de carregamento é acionado para ajustar a posição da cabeça de carregamento para que a pressão de compactação constante seja mantida durante o processo. A variação vertical da posição da cabeça de carga é igual à variação da altura do corpo-de-prova. Esta altura é processada, através de uma conexão serial conectada a um microcomputador. A Figura 16 mostra as configurações finais do molde SGC e dos parâmetros de compactação adotados pelo SHRP.

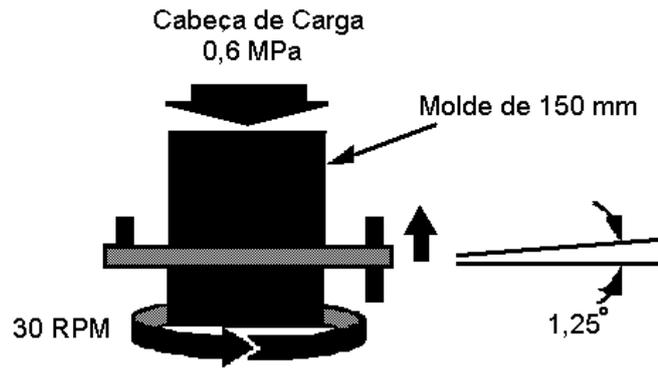


Figura 16: Configurações do SGC e parâmetros de compactação

Fonte: Marques, 2001.

Durante a compactação no SGC, este cria um arquivo com as informações de altura a cada giro, ângulo de giro e tensão vertical, entre outros dados. Com a altura do CP a cada giro é possível determinar a densidade da amostra durante a compactação, pela equação 07:

$$G_{mb(estimada)} = \frac{W_m / V_{mx}}{\gamma_w} \quad (7)$$

Onde:

$G_{mb(estimada)}$ = densidade específica aparente estimada durante a compactação;

W_m = massa do CP, em gramas;

γ_w = massa específica da água;

V_{mx} = volume do CP calculado a partir do diâmetro interno do molde e a altura medida pelo SGC em um determinado giro.

A correção da densidade aparente estimada é feita porque no cálculo do volume do corpo de prova é considerado que o cilindro representativo é perfeito, sendo ignoradas as irregularidades superficiais que levam a um volume levemente superior (NASCIMENTO, 2008).

O fator de correção (C) é a relação entre a densidade medida por pesagem hidrostática (AASHTO T 166-05) e a densidade estimada ao final da compactação N_{des} , sendo calculada pela seguinte equação (08):

$$C = \frac{G_{mb(medida)}}{G_{mb(estimada)}} \quad (8)$$

Onde:

C = fator de correção;

$G_{mb(medida)}$ = densidade específica aparente medida após N_{des} ;

$G_{mb(estimada)}$ = densidade específica aparente estimada em N_{des} .

Tendo-se o fator de correção ao final da compactação, o mesmo é aplicado para os outros giros, obtendo-se a densidade corrigida em todos os momentos da compactação, conforme a equação 9:

$$G_{mb(corrigida)} = CxG_{mb(estimada)} \quad (9)$$

Onde:

$G_{mb(corrigida)}$ = densidade específica aparente corrigida em um giro qualquer;

$G_{mb(estimada)}$ = densidade específica aparente estimada em um giro qualquer.

Com o valor da densidade corrigida, pode-se determinar a porcentagem da G_{mm} ($\% G_{mm}$) em qualquer giro da compactação através da seguinte equação:

$$\% G_{mm} = 100x \frac{G_{mb(corrigida)}}{G_{mm}} \quad (10)$$

Após a determinação da $\% G_{mm}$ ao longo da compactação, plotou-se um gráfico com $\% G_{mm}$ em função do número de giros, assim obtendo-se a curva de densificação do CP. Com essa curva, calcularam-se os índices de CDI, TDI e TDIm de cada amostra. A Tabela 8 apresenta os limites inicial e final da curva de densificação utilizados para o cálculo dos índices CDI, TDI e TDIm.

Tabela 8: Limites da curva de densificação considerados neste trabalho para o cálculo dos índices CDI, TDI e TDIm

<i>Índices</i>	<i>Límite Inicial</i>	<i>Límite Final</i>
CDI	Giro 8 (N_{ini})	92% da G_{mm}
TDI	92% da G_{mm}	98% da G_{mm}
TDIm	92% da G_{mm}	Giro 100 (N_{des})

Fonte: Nascimento(2007)

Para este trabalho, os cálculos foram processados numa planilha eletrônica do Microsoft Excel. Inserindo os dados do processo de compactação, calcularam-se automaticamente todos os parâmetros utilizados nessa pesquisa.

Definidos os teores de ligante de projeto, realizaram-se as moldagens dos corpos de prova para os ensaios mecânicos. Moldaram-se corpos-de-prova em concreto asfáltico nas dimensões de 10 x 6,5 cm e 10 x 15cm. A quantidade de massa a ser processada para estas amostras foi calculada de modo a se obter massa suficiente para moldagem com a altura desejada. Optou-se por fazer a moldagem fixando a altura, assim foi possível prever a quantidade de vazios, levando em consideração também a correção da Gmb para cálculo da massa do corpo de prova para se alcançar o Vv% desejado.

3.3.2. Ensaios Mecânicos

Os ensaios e procedimentos usados nesta pesquisa são apresentados de maneira resumida e conforme foram efetivamente realizados. A descrição completa e detalhes de cada ensaio devem ser consultados nas especificações originais das normas referenciadas.

3.3.2.1. Ensaio de Resistência a Tração por Compressão Diametral

A norma DNIT 136/2010, prescreve as orientações para a determinação da resistência à tração por compressão diametral em amostras com diâmetro 10 cm e altura de 6,5 cm, moldadas através do método Superpave, consistindo da aplicação de uma carga estática de compressão, com velocidade de 0,8mm/s, distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga (Figura 17). A medida resultante é a resistência à tração (RT), dada pela equação 1 já apresentada.

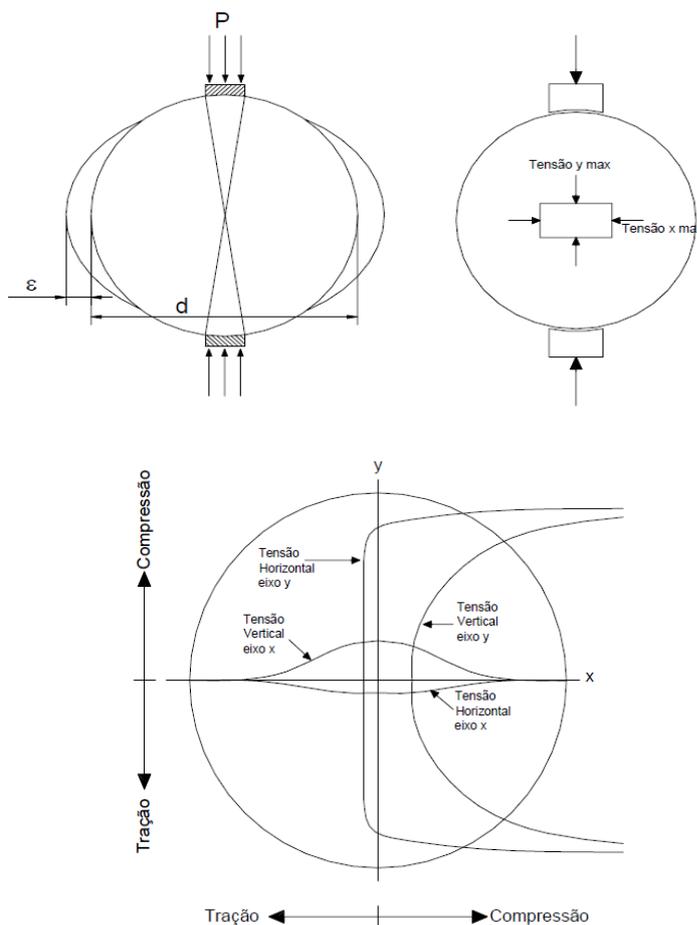


Figura 17: Estado de tensões gerado no ensaio brasileiro

Fonte: Specht (2004)

Tanto para a realização do ensaio de Resistência à Tração como para o ensaio de Módulo de Resiliência, as amostras foram condicionadas nas temperaturas de 10°C, 25°C e 35°C por pelo menos 12 horas.

3.3.2.2. Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência seguiu as prescrições das normas do DNIT-ME 135/2010 e ASTM D 4123:1982. O equipamento utilizado (Figura 18) é uma UTM - 25 (Universal Test Machine) da IPC Global, que é composta por um pistão que proporciona um

carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo hidráulico, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1 Hz. O equipamento funciona dentro de uma câmara com temperatura controlada permitindo ensaios em diversas temperaturas.

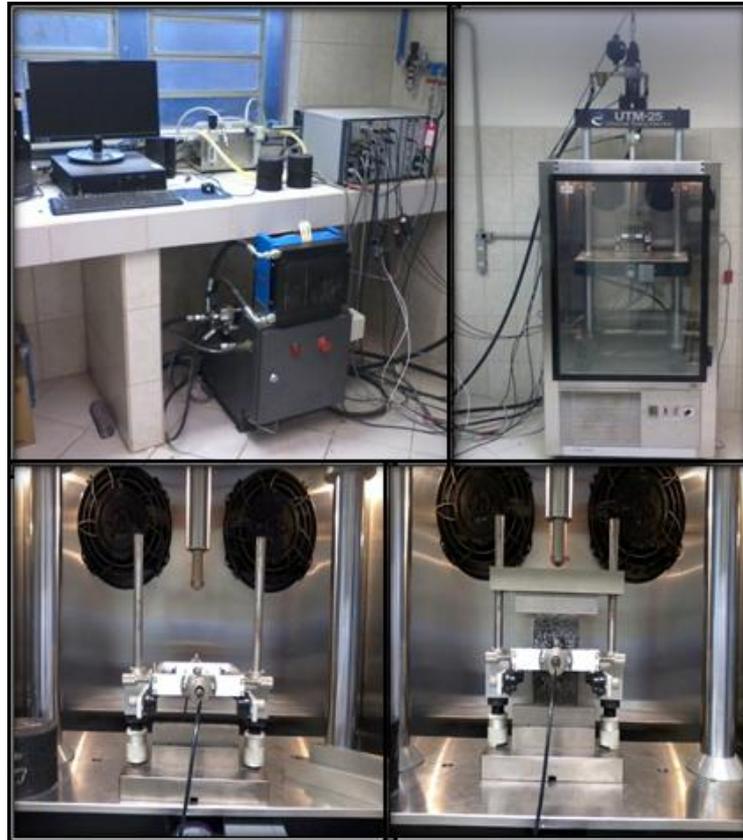


Figura 18: Prensa hidráulica UTM-25

Para a realização dos ensaios foram seguidas as seguintes etapas de montagem do conjunto:

- Condicionar as amostras por pelo menos 12 horas na temperatura desejada de ensaio;
- Colocar o corpo-de-prova sobre a base da estrutura de suporte, entre os dois cabeçotes curvos;
- Fixar e ajustar os transdutores LVDT (*Linear Variable Differential Transducer*) de modo a se obter registro no microcomputador;

O módulo de resiliência (MR) é medido a partir da aplicação do carregamento dinâmico com tempo de 0,1s e 0,9s de repouso, a amostra sofre deformações horizontais, que são medidas através de um LVDT, ligado a um microcomputador. Para esta pesquisa os ensaios foram realizados em 3 frequências de carga diferentes: 25 Hz, 10 Hz e 5 Hz, além disso os ensaios foram realizados nas temperaturas de 10°C, 25°C e 35°C.

Para execução do ensaio o coeficiente de Poisson variou em função da temperatura, como pode ser observado na Tabela 09.

Tabela 9: Valores do Coeficiente de Poisson utilizados

Temperatura	Coeficiente de Poisson
10° C	0,15
25°C	0,30
35°C	0,35

A equação 11 foi utilizada para o cálculo do MR.

$$MR = \frac{P}{\Delta.h} \cdot (0,9976 \cdot \mu + 0,2692) \quad (11)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, MPa

P = carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo-de-prova;

Δ = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga;

h = altura do corpo-de-prova;

μ = o coeficiente de Poisson.

O módulo de resiliência em misturas asfálticas é influenciado por diversas variáveis, como o tipo de mistura, faixa granulométrica, tipo de ligante asfáltico, as propriedades volumétricas, a energia e a temperatura de compactação, são alguns exemplos que podem modificar os resultados do módulo de resiliência.

3.3.2.3. Ensaio de Módulo Dinâmico Uniaxial

Os ensaios de módulo dinâmico foram realizados com 12 amostras de dimensões de 10x15 cm, sendo 3 amostras para cada ligante. Determinou-se o módulo complexo após aplicação de carga em altas e baixas frequências, nas temperaturas de 4°C, 20°C e 40°C. As frequências altas são: 25Hz, 10Hz e 5Hz; as baixas frequências são 1Hz; 0,5Hz e 0,1Hz. Os corpos de prova passaram pelo condicionamento de temperatura conforme pode ser observado na tabela 10 abaixo.

Tabela 10: Tempo mínimo recomendado para equilíbrio da temperatura para amostras para o ensaio de E^*

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

Realizou-se os ensaios utilizando-se uma prensa hidráulica MTS, da PETROBRAS/CENPES, seguindo os procedimentos da norma AASHTO T 311 – *Determining Dynamic Modulus of Hot-mix Asphalt Concrete Mixtures*.

O ensaio foi realizado com a deformação axial controlada entre 50 a 70 microstrains (10^{-6}), no intuito de buscar um regime de viscoelasticidade linear. No entanto para alcançar esta faixa de deformação foi necessário o ajuste das cargas aplicadas, as quais variam em função da temperatura e frequência do ensaio. O cálculo é realizado através da equação 12:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (12)$$

Onde,

$|E^*|$ = Módulo dinâmico uniaxial;

σ_0 = Tensão dinâmica máxima;

ε_0 = Deformação axial recuperável máxima.

Optou-se pelo ensaio uniaxial para determinação do módulo dinâmico por ser um ensaio que apresenta grande potencial de correlação com o desempenho em campo, tanto em termos de deformação permanente quanto de fadiga, segundo *Report 465* (WITCZAK *et al.*, 2002).

3.3.3. Análise de desempenho

Com base nos resultados obtidos nas pistas experimentais da AASHTO, monitorada sob ação de tráfego de veículos comerciais no período de outubro de 1958 a novembro de 1960, em Ottawa, no Estado de Illinois (EUA), foi elaborado o Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis da AASHTO (1972), após tratamento e análise estatística dos dados obtidos na pista, gerando um método de dimensionamento com base empírica.

Métodos de dimensionamento empíricos tem deficiências, que certamente foram mais evidenciadas nas últimas duas décadas, com o desenvolvimento de *softwares* de análise de tensões e deformações, bem como de modelos de desempenhos elaborados com auxílio de programas computacionais.

Diante das limitações do método empírico, buscaram-se novas alternativas para o dimensionamento de pavimentos. A AASHTO em cooperação com a FHWA (*Federal Highway Administration*), através da *National Cooperative Highway Research Program*, projeto 1-37 A, desenvolveu o *Guide Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavement structures*, com incorporação de soluções mecanísticos-empíricas e, seus modelos e dados refletem o estado da arte de projeto de pavimentos. Além disto, também teve como objetivo a elaboração de um programa computacional que incorporasse as novas técnicas de projeto do Guia da AASHTO (NCHRP, 2004).

Os modelos numéricos são utilizados para analisar os dados de entrada do tráfego, clima e comportamento dos materiais e para estimar os danos acumulados ao longo da vida útil dos pavimentos novos e restaurados, de uma proposta de estrutura. É aplicado tanto para pavimentos rígidos, flexíveis e semirrígidos, podendo ser novos ou a restaurar. As previsões

de desempenho são realizadas tendo como base alguns defeitos e a qualidade ao rolamento, através da irregularidade longitudinal. Sobre os danos aos pavimentos flexíveis, cita-se a seguir alguns inclusos no programa: deformação permanente (afundamento de trilha de roda), fadiga (trincamento de baixo para cima e de cima para baixo) e trincas térmicas (MATTOS, 2014).

O *AASHTOWare Pavement ME Design* é um software de dimensionamento de pavimentos, que se baseia no Guia AASHTO em uma metodologia mecanicista-empírica. Os engenheiros podem prever com precisão o desempenho do pavimento, pois o software incorpora características mecânicas dos materiais, dados climáticos, espectros de carga por eixo e outros avanços (AASHTO, 2014).

O programa analisa o desempenho da estrutura de um pavimento mediante critérios pré-estabelecidos. O software utiliza uma aproximação hierárquica na incorporação das variáveis de entrada, em função da importância do projeto e da disponibilidade dos dados. Tal aproximação se refere aos dados de entrada de tráfego, materiais e meio ambiente. A partir dos resultados obtidos no *AASHTOWare Pavement*, é possível conduzir uma análise de sensibilidade para verificar os efeitos da variação dos parâmetros de projeto no comportamento dos pavimentos ao longo de sua vida útil (PELISSON *et. al.*, 2015).

Nesta pesquisa para a realização da análise de desempenho, utilizou-se o software *AASHTOWare Pavement*. A partir de uma estrutura definida avaliou-se a capacidade de suporte durante a vida útil prevista conforme os modelos de previsão do software.

Foram iniciados os dimensionamentos dos pavimentos a partir dos materiais e parâmetros que compõem a Tabela 11. Foi adotada a hipótese de não aderência entre as camadas do pavimento.

Tabela 11: Estrutura do pavimento para análise de desempenho

Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo de Resiliência	Coefficiente de Poisson
Revestimento	CBUQ	10, 14 e 18	- ¹	0,30
Base	BGS	15	200	0,35
Sub Base	MS	16	300	0,35
Subleito	Solo	-	101	0,40

Nota ¹: o software utiliza o valor de E* que pode ser calculado ou estimado, dependendo da disponibilidade de dados.

A versão do software utilizado foi *AASHTOWare Pavement ME Design 2.1* do ano de 2014. No programa é feita a escolha do tipo de pavimento e os dados para sua caracterização, como vida útil de projeto, início e término da construção do pavimento e a data de abertura deste, justamente pelo fato do software levar em consideração os efeitos climáticos que o pavimento pode sofrer.

Na figura 19 pode-se observar a interface do *software*.

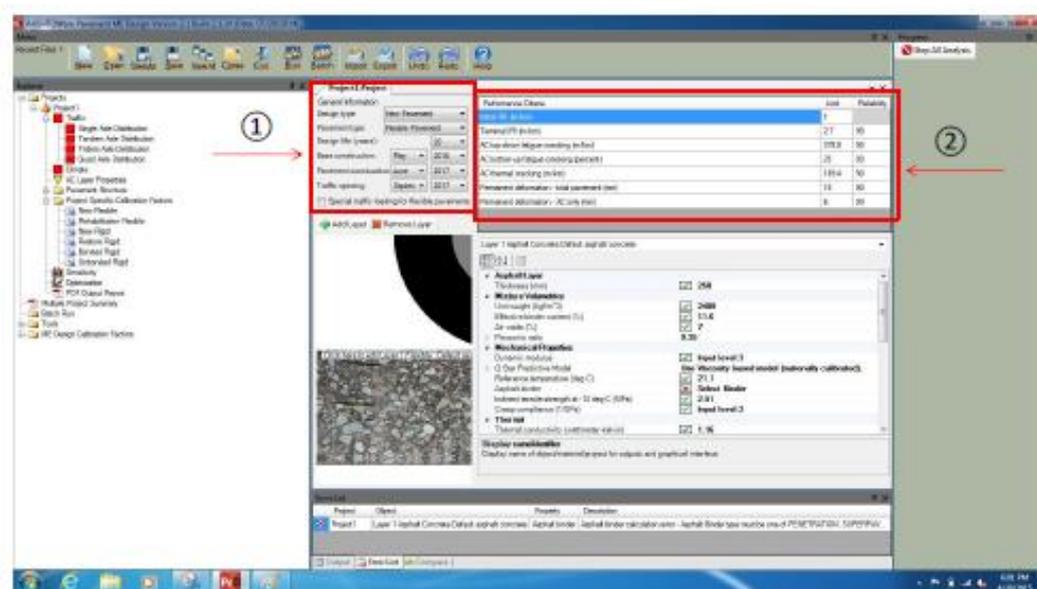


Figura 19: Interface software AASHTOWare

Para o estudo foi considerado que a liberação ao tráfego se deu próximo ao meio do ano, no Brasil, pois desta maneira o software americano estima as ações climáticas nos meses mais quentes, assim condicionando o pavimento ao seu início de vida útil a elevadas temperaturas e consequentemente a maiores deformações iniciais ao pavimento.

Na Tabela 12 estão os critérios que avaliaram se a estrutura do pavimento atendeu as solicitações dentro da vida de projeto; o software avalia os critérios de IRI (Irregularidade Longitudinal da pista), trincamento do revestimento de cima para baixo, o trincamento no revestimento de baixo para cima, trincamento térmico, deformação total do pavimento e deformação do revestimento e, também pode se estipular a confiabilidade que se pretende impor ao projeto.

Tabela 12: Limites de projeto utilizados

Cr�terios de Desempenho	Unidades	Limites
IRI	m/km	2,7
Deforma�o Permanente	m/mm	378,8
Trincamento por Fadiga	%	25,0
Trincamento T�rmica	m/km	198,4
Fadiga do topo para a base	mm	19,0
Deforma�o Revestimento	mm	6,0

Empregaram-se os dados do tráfego da BR 116, obtidos por Klamt (2014) através da ECOSUL, na Praça de Bom Retiro, em Pelotas/RS.

Para o cálculo dos valores de N, foi levado em considera o a taxa de crescimento determinada no trabalho de Klamt (2014) de 4,86% com um crescimento do volume de tráfego médio geométrico.

Para as cargas por eixo foi ponderada a hipótese de que o carregamento por eixo se deu com 80,0% da frota com carga máxima no valor máximo estabelecido pelo CTB, e que os demais 20,0% de veículos trafegam vazios, se deslocando na busca de carga ou retornando para as bases de referência (LASTRAN, 2003).

O software permite que seja feita a escolha do local sobre o qual estará o pavimento, ou seja,   possível escolher as condi es climáticas que estarão agindo sobre a estrutura. Para o trabalho foram utilizadas as condi es da região de Savannah (Georgia) nos EUA. A escolha se deu pela indisponibilidade de dados nacionais e pela semelhança de clima com estado, em termos de temperatura e pluviometria.

O *AASHTOWare* permite 3 níveis de análise, descritos a seguir:

- Nível 1: requer do projetista a obten o de dados com maior acurácia, tais como, propriedades obtidas através de ensaios de laboratório, contagem do tráfego (volume e pesagens, levantamento deflectom trico com FWD e outros). Este nível pode ser utilizado para pistas experimentais ou para rodovias de alto volume de tráfego.

- Nível 2: destinado a utiliza o em projetos correntes, requer ensaios, mas o uso de correla es   permitido. Correla es regionais entre propriedades dos materiais de pavimenta o são aceitas, como exemplo, módulo do subleito podendo ser estimado através de correla o empírica com o CBR. Possui moderado nível de confiança de desempenho.

- Nível 3: consiste de valores totalmente estimados. Na falta, adotam-se os oferecidos pelo próprio programa com base na experiência norte-americana. Apresenta o menor nível de confiança dos 3, devendo ser utilizado para rodovias de baixo volume de tráfego ou em anteprojeto.

Portanto, no nível 1 tem-se a probabilidade de ocorrer menos erros do que nos níveis 2 e 3. Desta forma o nível escolhido para entrada de dados está relacionado à precisão do projeto final. No caso desta dissertação, foi possível realizar as análises pelos 3 níveis, possibilitando assim uma comparação dos resultados obtidos em cada nível.

Para a análise houve alteração na espessura dos revestimentos, trabalhando com as espessuras de 10, 14 e 18 cm para cada um dos 4 ligantes, totalizando um total de 12 simulações para cada nível do programa. Para cada análise deveria ser fornecido o valor do volume de vazios inicial (considerado como 7,0%) e o teor efetivo de ligante da mistura.

Na tabela 13 constam os dados informados para cada nível de análise no *AASHTOWare*.

Tabela 13: Dados informados no *AASHTOWare* por nível de análise

Nível de análise	Dados informados
1	Valores do E*, PG, G* e ângulo de fase
2	PG, G* e ângulo de fase
3	PG

4. RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na parte experimental da pesquisa, tais como: definições dos teores de ligante de projeto das misturas, parâmetros volumétricos e de densificação e os resultados das propriedades mecânicas, pelos ensaios de MR, RT e Módulo Dinâmico Uniaxial, além disso, os resultados das análises de desempenhos.

4.1. Dosagem

4.1.1 Parâmetros Volumétricos

Para a determinação dos teores de ligante de projeto para 4% de volume de vazios, utilizaram-se no mínimo 3 teores de ligante e 3 amostras para cada mistura. Com os valores obtidos encontram-se os teores de projeto de ligante para cada mistura estudada, dados que podem ser vistos na Tabela 14, que ainda traz os resultados dos parâmetros volumétricos de cada mistura, com 4% de volume de vazios.

Tabela 14: Resultados volumétricos das dosagens das misturas asfálticas com o Superpave

<i>Ligante</i>	<i>Teor Ligante (%)</i>	<i>VAM (%)</i>	<i>RBV(%)</i>	<i>RPB(%)</i>	<i>Teor Efetivo de Ligante em Volume (%)</i>
50/70	5,38	17,22	75,96	1,16	11,50
TLA	5,90	17,96	75,00	1,06	11,30
60/85	5,60	17,92	74,95	1,12	11,80
TLA FLEX	5,90	17,47	76,24	1,06	11,10

Pode-se observar que para volume de agregado mineral (VAM) e para a relação pó-betume todas as misturas atenderam os limites das faixas consideradas, apenas para o RBV

algumas misturas tiveram valores acima do limite da faixa, mas mesmo assim estas misturas foram aceitas.

Nas Figuras 20, 21, 22 e 23 encontram-se os parâmetros volumétricos apresentados na forma de gráficos.

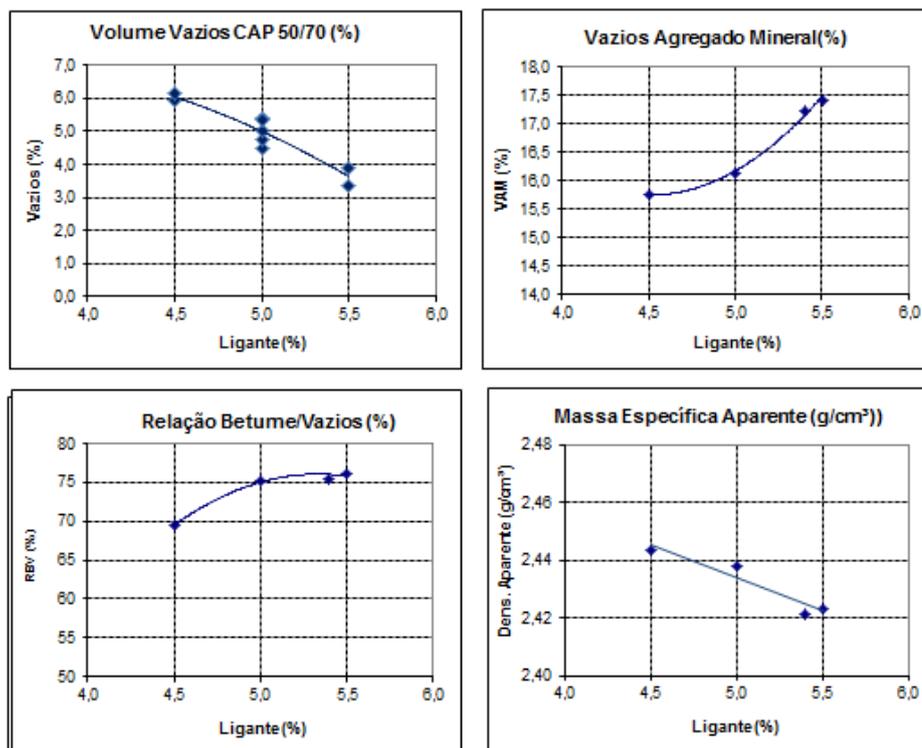


Figura 20: Parâmetros volumétricos do CAP 50/70

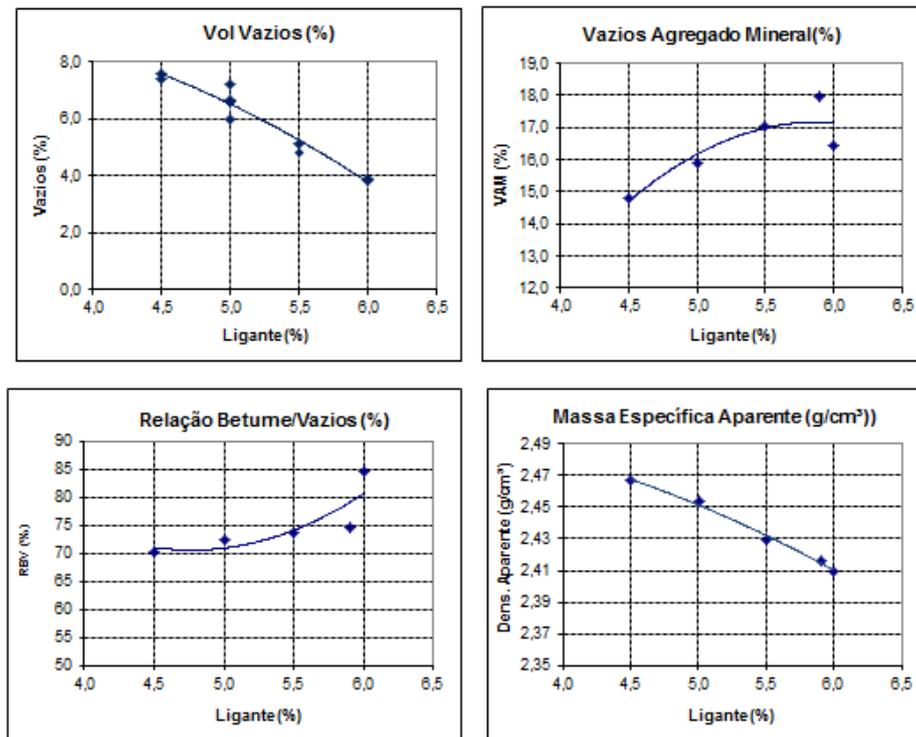


Figura 21 : Parâmetros volumétricos do CAP TLA

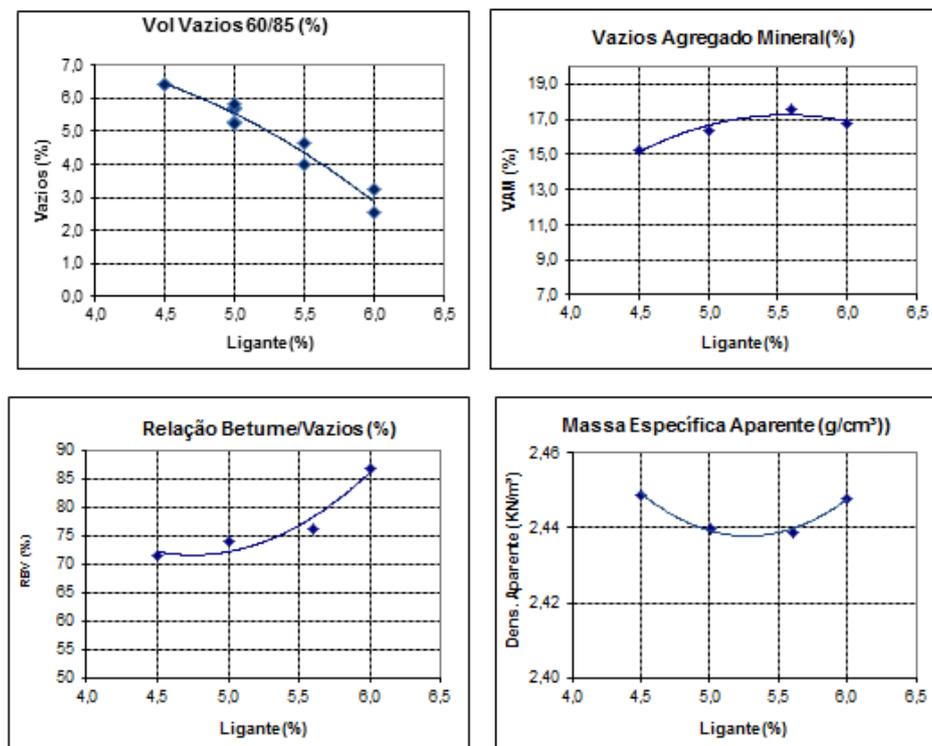


Figura 22: Parâmetros volumétricos do CAP 60/85

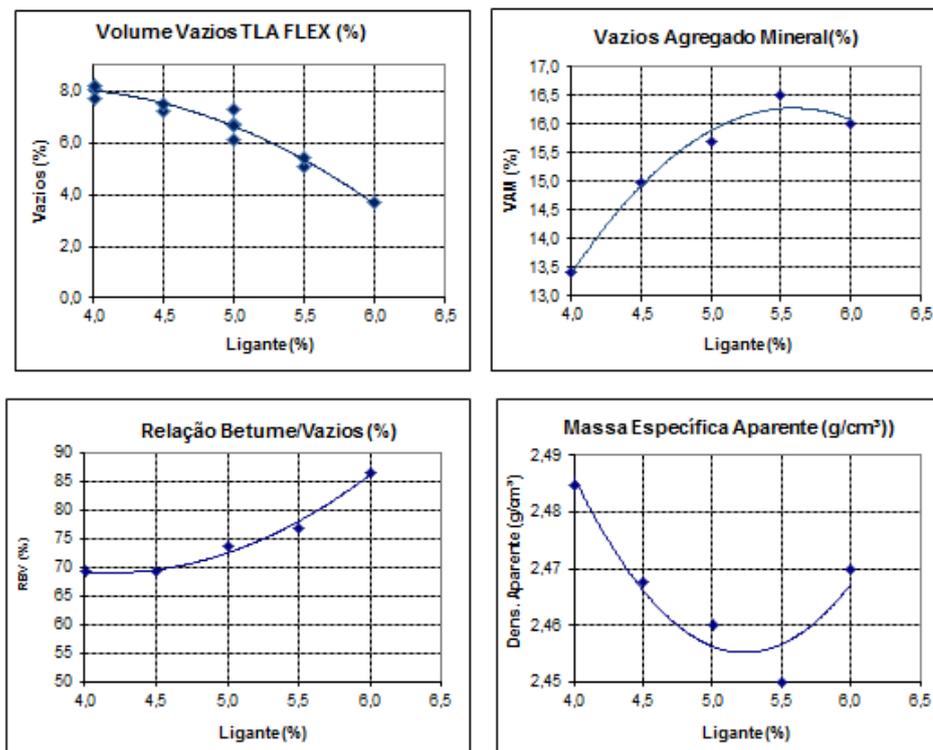


Figura 23: Parâmetros volumétricos do CAP TLA Flex

Quanto aos teores de ligante de projeto, as misturas modificadas tiveram teores maiores, que o da mistura convencional 50/70. Misturas que continham o TLA na composição tiveram o mesmo teor de ligante. A diferença entre os teores de ligante nas misturas ficou em torno de 0,5%.

4.1.2 Parâmetros de Densificação

Conforme descrito no Capítulo 3, os parâmetros de compactação giratória foram calculados para todos os CP's oriundos do SGC durante os procedimentos do projeto de dosagem, obtendo-se desta forma, para cada mistura betuminosa, curvas com a variação dos índices CDI e TDI_m. Na Tabela 15 estão os resultados obtidos para os parâmetros de densificação.

Tabela 15: Índices de compactação giratória

<i>Ligante</i>	<i>Teor de Ligante %</i>	<i>CDI</i>	<i>TDIm</i>
50/70	4,5	245	413
50/70	5,0	175	498
50/70	5,5	79	605
TLA	4,5	175	487
TLA	5,0	111	556
TLA	5,5	158	520
TLA	6,0	94	598
60/85	4,5	285	396
60/85	5,0	197	476
60/85	5,5	113	595
60/85	6,0	55	639
TLA Flex	4,5	585	103
TLA Flex	5,0	365	309
TLA Flex	5,5	214	485
TLA Flex	6,0	79	606

Ressalta-se que os dados da Tabela 15 são as médias dos resultados obtidos para cada teor de ligante, média esta calculada com no mínimo 3 amostras para cada mistura. Para melhor interpretação desta tabela, os dados foram apresentados em forma de gráficos, como podem ser examinados nas Figuras 24 e 25.

Misturas com valores de CDI entre 50 e 100 (linha preta no gráfico), têm melhor compactabilidade, enquanto misturas com valores de CDI baixos têm problemas de estabilidade e devem ser evitadas.

Como o CDI é uma medida volumétrica de representação do trabalho da vibro acabadora no início do processo de espalhamento do material do pavimento, um valor alto inviabiliza a compactação e um valor muito baixo deixa o pavimento suscetível a afundamentos devido à deformação plástica (excesso de ligante).

Observando a Figura 24 o TLA Flex é o ligante que obteve maiores valores de CDI, seguido pelo CAP 60/85, ambos são ligantes modificados com adição de polímeros, sendo assim possuem um nível de compactação mais complexo, comprovado pelo seu valor mais

alto em relação aos demais. Para o CAP TLA ao contrário dos demais ligantes estudados, o aumento de teor de ligante não ocasionou uma queda nos valores de CDI, estes variaram.

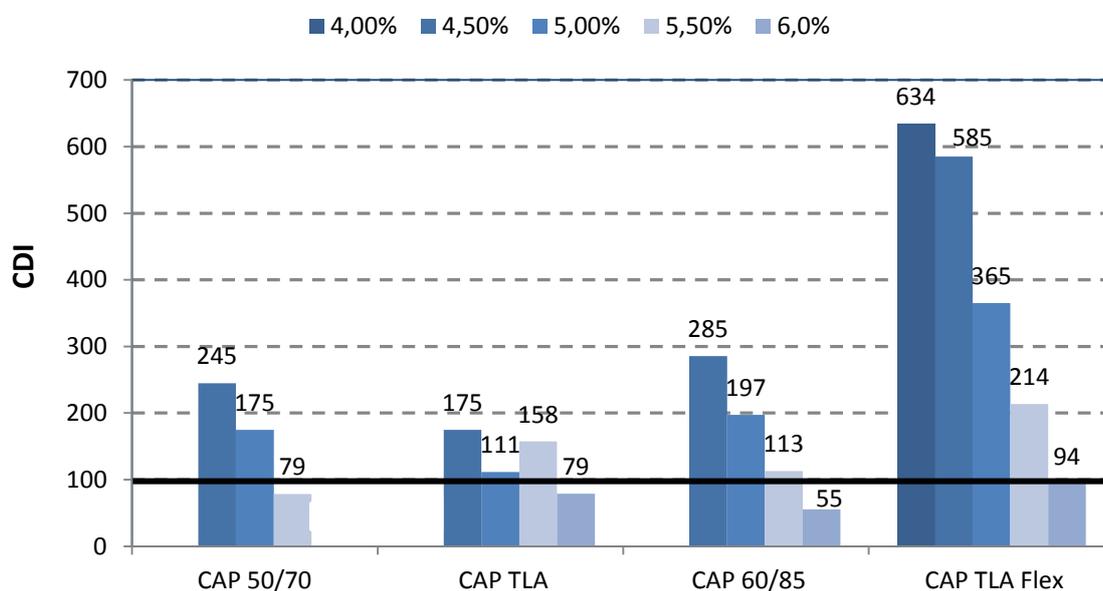


Figura 24: Valores de CDI *versus* tipo de ligante

Para as misturas com os teores de projeto obteve-se valores de CDI demonstrados na Tabela 16.

Tabela 16: Valores de CDI das misturas com os teores de projeto

<i>Ligante</i>	<i>% Ligante</i>	<i>CDI</i>
50/70	5,4	98
TLA	5,9	107
60/85	5,6	100
TLA Flex	5,9	106

As misturas com os ligantes 50/70 e 60/85 obtiveram valores entre a faixa considerada ideal (50 a 100), já as misturas com TLA e TLA Flex tiveram valores um pouco acima de 100, mas ainda possuíam boa trabalhabilidade e compactabilidade.

Embora a compactação giratória seja realizada em temperaturas bem mais altas do que a temperatura de serviço do pavimento, tendo-se em vista que a estrutura pétreia influencia no comportamento da mistura asfáltica, espera-se que o índice TDI oriundo da compactação giratória esteja relacionado com a estabilidade da mistura. Quanto maiores os valores de TDI, melhores são as expectativas de o revestimento resistir aos esforços impostos pelo tráfego durante sua vida de serviço (NASCIMENTO, 2008).

Como o TDI é a área que vai de 92% até 98% da Gmm, e neste estudo nenhuma amostra alcançou os 98%, não foi calculado este parâmetro e então considerou-se o TDIm.

Os valores de TDIm de todas as misturas foram favoráveis quanto à resistência à deformação permanente. As misturas melhoraram significativamente o TDIm, cujo tráfego admitido para a compactação giratória, estabelece um valor mínimo de 400, conforme limite definido por BAHIA e FAHEEM (2007) e 250 (linha preta no gráfico) conforme NASCIMENTO (2008).

Quanto ao TDIm, o seu valor para todas as misturas aumentou com o teor de ligante. O que explica este comportamento é que, tendo-se em vista que o mesmo é determinado a partir do giro onde a %Gmm é 92%, em misturas com maiores teores de ligante esta %Gmm é rapidamente alcançada, fazendo com que o material receba mais giros a partir desta densidade até alcançar N=100 giros.

Pode-se afirmar que os maiores valores de TDIm foram para as misturas com ligantes modificados, nesse caso o CAP 60/85, seguido do CAP TLA Flex, mas todas as misturas conseguiram valores acima do limite ideal. Com o aumento do teor de ligante encontra-se os maiores valores de TDIm. Novamente as misturas com o CAP TLA tiveram um comportamento diferente que os demais ligantes.

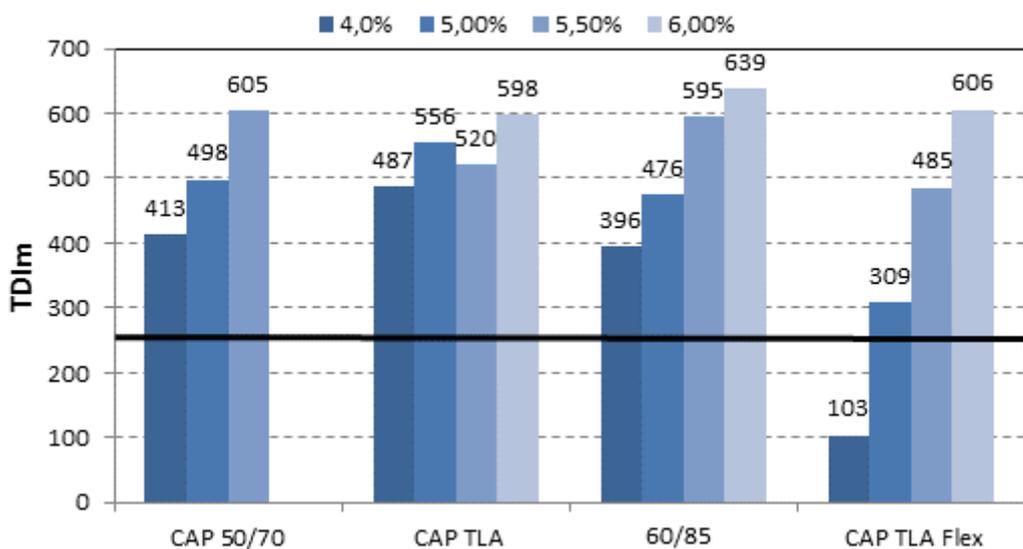


Figura 25: Valores de TDIm *versus* tipo de ligante

Para as misturas com os teores de projeto obteve-se os valores de TDIm demonstrados na Tabela 17.

Tabela 17: Valores de TDIm das misturas com os teores de projeto

<i>Ligante</i>	<i>% Ligante</i>	<i>TDIm</i>
50/70	5,4	583
TLA	5,9	582
60/85	5,6	604
TLA Flex	5,9	581

Todas as misturas obtiveram valores acima do mínimo recomendado. Avaliando os resultados das misturas com os teores de projeto para CDI e TDIm a melhor mistura seria a do CAP 60/85, pois teve CDI e TDIm de 100 e 604 respectivamente, seguida da mistura de CAP 50/70 e posteriormente das misturas que tinham em sua composição CAP TLA.

4.2. Propriedades Mecânicas

Nesta parte do trabalho, são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização mecânica das misturas asfálticas através dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo de resiliência e módulo dinâmico uniaxial.

Os corpos-de-prova foram moldados com os teores de projeto de ligante, conforme apresentado anteriormente. Utilizou-se 3 corpos-de-prova para cada mistura e cada teor, totalizando 96 corpos-de-prova de 6,5x10 cm, para a realização de módulo de resiliência e resistência à tração, sendo que 48 com volume de vazios de 4% e 48 com volume de vazios de 5,5%, além de 12 corpos de prova para o ensaio de módulo dinâmico com as dimensões de 15x10 cm. Como o ensaio de módulo de resiliência é um ensaio não destrutivo para as amostras, as mesmas foram utilizadas para realizar o ensaio de resistência à tração.

4.2.1 Resistência à Tração (RT)

Na Tabela 18 estão apresentadas as médias dos resultados de ensaios de resistência à tração realizados em todas as misturas e temperaturas estudadas.

As Figuras 26, 27 e 28 mostram a média dos resultados dos ensaios de resistência à tração e o desvio-padrão para cada mistura.

Tabela 18: Resultados de Resistência à Tração

<i>Temperatura</i>	<i>Ligante</i>	<i>V_v %</i>	<i>RT (MPa)</i>	<i>DP</i>
10°C	50/70	4,0	3,15	0,06
		5,5	3,22	0,43
	TLA	4,0	3,84	0,29
		5,5	3,56	0,28
	60/85	4,0	3,91	0,18
		5,5	3,66	0,21
	TLA Flex	4,0	4,30	0,29
		5,5	3,15	0,06
25°C	50/70	4,0	1,15	0,20
		5,5	1,03	0,02
	TLA	4,0	1,69	0,05
		5,5	1,57	0,12
	60/85	4,0	1,67	0,05
		5,5	1,71	0,17
	TLA Flex	4,0	2,37	0,01
		5,5	2,34	0,09
35°C	50/70	4,0	0,43	0,08
		5,5	0,38	0,02
	TLA	4,0	0,65	0,22
		5,5	0,70	0,03
	60/85	4,0	0,82	0,12
		5,5	0,71	0,01
	TLA Flex	4,0	1,00	0,05
		5,5	1,10	0,05

Os ensaios realizados a temperatura de 10°C (Figura 26) demonstram que os ligantes convencionais têm os menores valores de RT, enquanto que os ligantes modificados os maiores valores. Quando se avalia a influência do volume de vazios, percebe-se que ocorre queda dos valores de RT quando há aumento do V_v. Para as misturas com TLA Flex, 60/85 e 30/45, ocorrem queda, sendo que para o último está é de 8%. Já para o CAP 50/70 há um aumento de 2% do valor.

A diferença entre os valores mais elevados e mais baixos foi de 30%, onde se presume que a diferença foi menor pela ação da temperatura. A temperatura influenciou no volume de vazios, pois o aumento deste ocasionou queda de resistência.

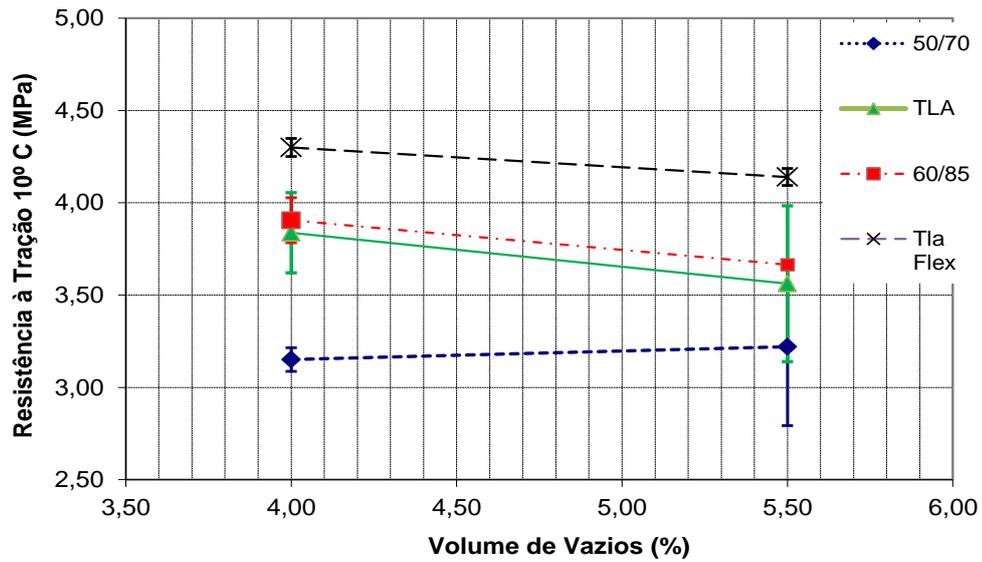


Figura 26: Resultados de Resistência à Tração a 10°C

Pode-se observar na figura 27, que na temperatura de 25° C os menores valores encontrados são para o CAP 50/70 e os maiores valores para o CAP TLA Flex, valores estes que se mantém mesmo com a diferença no volume de vazios. Quando se considera a diferença de volume de vazios, observa-se que os ligantes convencionais tendem a ter uma queda no valor de RT. Para o CAP 50/70 esta queda é em torno de 10%. Para o CAP 60/85 houve um aumento no valor de RT com o aumento do volume de vazios na ordem de 28%. Para as misturas com TLA Flex o valor se mantém constante independente do volume de vazios.

Para ligantes modificados o aumento de resistência com o aumento do volume de vazios e para o ligante convencional ocorre queda de RT com aumento de vazios.

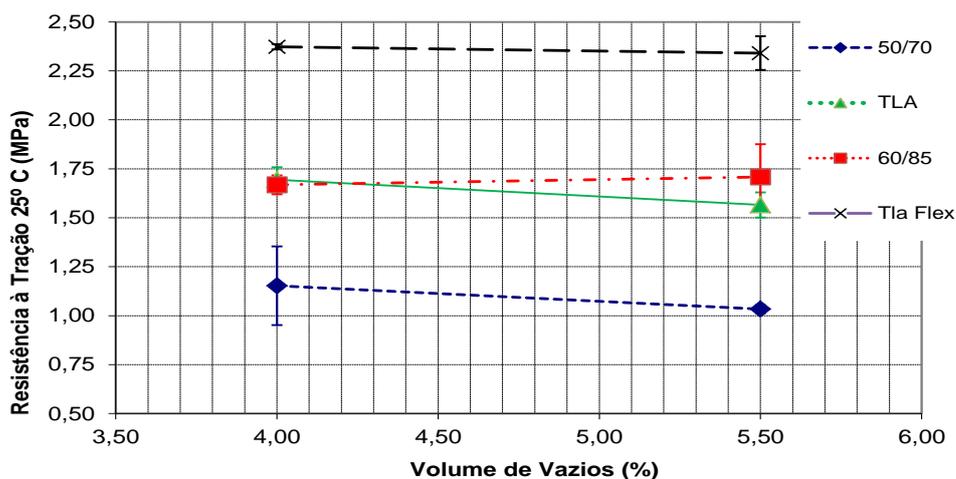


Figura 27: Resultados de Resistência à Tração a 25°C

A Figura 28 apresenta os valores de resistência à tração para a temperatura de 35°C e os valores mais elevados foram os das misturas do CAP TLA Flex e os menores do CAP 50/70. Quando se compara os valores de RT nos diferentes volumes de vazios observa-se que ocorreram as maiores diferenças de valores. O ligante convencional obteve uma queda nos valores de RT com o aumento de vazios de 11%. Já para os ligantes com TLA na sua composição ocorreu aumento no valor da resistência entre 7 e 10%. Misturas com o CAP 60/85 o teve perde de resistência de 13%.

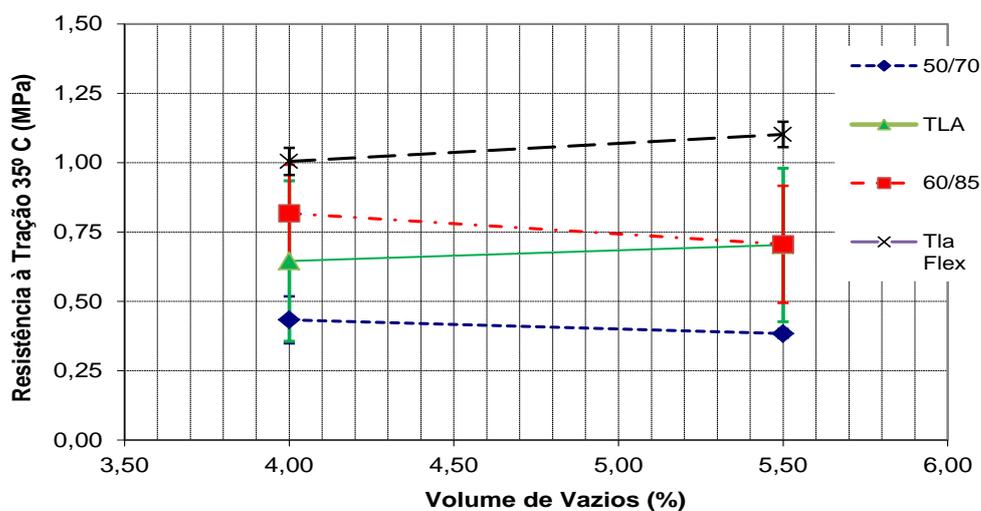


Figura 28: Resultados de Resistência à Tração a 35°C

Pode-se afirmar que mesmo com a diferença de temperatura, que os maiores valores encontrados foram para a temperatura de 10°C, seguido 25°C e 35°C, como se esperava. O valor de RT do TLA Flex a 35°C consegue ser similar com o valor de RT do CAP 50/70 a 25°C. Os maiores valores encontrados foram para as misturas com CAP TLA Flex. Já o CAP 50/70 por ser um ligante convencional produziu misturas menos resistente (menores valores de RT).

Do ponto de vista prático, observando as barras de erro, é possível verificar que, na maioria dos casos há uma leve queda nos valores de RT, como era de se esperar. Para todas as temperaturas os maiores resultados forma do TLA Flex, seguidos do 60/85, TLA e por último o convencional.

A partir dos dados aferidos realizou-se uma análise estatística, utilizando o *software StatSoft Statistica* (versão 8 MR-3), para indicar a influência das variáveis independentes na variável de resposta (variável dependente).

Ao analisar os resultados apurados pela análise estatística para a Resistencia à Tração em função da temperatura e do volume de vazios, verificou-se que a temperatura tem maior influencia na resistência independente da mistura, sendo o fator de maior relevância.

4.2.2 Módulo de Resiliência (MR)

Os ensaios de módulo de resiliência foram executados nas temperaturas de 10°C, 25°C e 35°C. Cada corpo-de-prova de cada mistura foi ensaiado em três frequências de carregamento (5 Hz, 10 Hz e 25 Hz). O valor de MR adotado para a mistura é a média dos valores admitidos de cada corpo de prova, após análise de dispersão.

Nas Tabelas 19, 20 e 21 estão demonstrados os valores de MR para cada mistura e frequência de ensaio, já nas Figuras 29, 30 e 31 são mostradas as médias dos resultados de MR com seus respectivos valores acrescidos e subtraídos dos desvios-padrão determinados.

Tabela 19: Resultados de Módulo de Resiliência para a frequência de 5 Hz

<i>Temp</i>	<i>Ligante</i>	<i>V_v %</i>	<i>MR (MPa)</i>	<i>DP</i>	
10°	50/70	4,0	13605	899	
		5,5	13219	1987	
	TLA	4,0	15683	1081	
		5,5	15651	585	
	60/85	4,0	13698	614	
		5,5	12130	522	
	TLA Flex	4,0	15006	617	
		5,5	14304	159	
	25°	50/70	4,0	3584	333
			5,5	3596	77
TLA		4,0	5607	692	
		5,5	4532	1744	
60/85		4,0	4464	1026	
		5,5	5443	261	
TLA Flex		4,0	5922	497	
		5,5	8295	159	
35°		50/70	4,0	984	39
			5,5	901	15
	TLA	4,0	1573	482	
		5,5	1571	19	
	60/85	4,0	1550	699	
		5,5	1140	87	
	TLA Flex	4,0	2069	101	
		5,5	2079	97	

Tabela 20: Resultados de Módulo de Resiliência para a frequência de 10 Hz

<i>Temp</i>	<i>Ligante</i>	<i>Vv %</i>	<i>MR (MPa)</i>	<i>DP</i>	
10°	50/70	4,0	15221	1399	
		5,5	14830	1821	
	TLA	4,0	17212	1277	
		5,5	16882	721	
	60/85	4,0	15125	825	
		5,5	13806	602	
	TLA Flex	4,0	16430	703	
		5,5	15450	349	
	25°	50/70	4,0	4763	841
			5,5	4573	68
TLA		4,0	6587	658	
		5,5	5073	948	
60/85		4,0	5251	1139	
		5,5	6445	186	
TLA Flex		4,0	6762	606	
		5,5	8695	349	
35°		50/70	4,0	1297	29
			5,5	1158	15
	TLA	4,0	2064	580	
		5,5	2076	10	
	60/85	4,0	1934	794	
		5,5	1512	84	
	TLA Flex	4,0	2648	37	
		5,5	2692	79	

Tabela 21: Resultados de Módulo de Resiliência para a frequência de 25 Hz

<i>Temperatura</i>	<i>Ligante</i>	<i>Vv %</i>	<i>MR (MPa)</i>	<i>DP</i>	
10°	50/70	4,0	17286	1327	
		5,5	15967	2200	
	TLA	4,0	19106	1214	
		5,5	18651	514	
	60/85	4,0	17353	671	
		5,5	15566	327	
	TLA Flex	4,0	17508	256	
		5,5	17395	510	
	25°	50/70	4,0	6569	309
			5,5	6217	285
TLA		4,0	8298	576	
		5,5	6508	839	
60/85		4,0	6332	1194	
		5,5	7950	319	
TLA Flex		4,0	8442	547	
		5,5	9414	510	
35°		50/70	4,0	1861	5
			5,5	1777	20
	TLA	4,0	2906	744	
		5,5	2817	15	
	60/85	4,0	2677	889	
		5,5	2127	128	
	TLA Flex	4,0	3511	27	
		5,5	3695	85	

Examinando o gráfico da Figura 29, para a temperatura de 10°C os valores mais altos foram os das misturas com CAP TLA com 4% de vazios, isto comprova relatos da literatura que a presença de TLA eleva a rigidez das mistura.

Nota-se que a diferença nos valores de vazios compromete o desempenho de todas as misturas há uma expressiva redução dos valores de MR com aumento do volume de vazios, alterando de sobremaneira a distribuição de esforços na estrutura do pavimento.

Na análise em relação à frequência de carregamento, assinala-se que os maiores valores foram na frequência alta de 25 Hz e as maiores quedas de valores foram para as misturas ensaiadas a 5 Hz com volume de vazios de 5,5%, para o CAP 60/85 a queda dos valores foi de 12%.

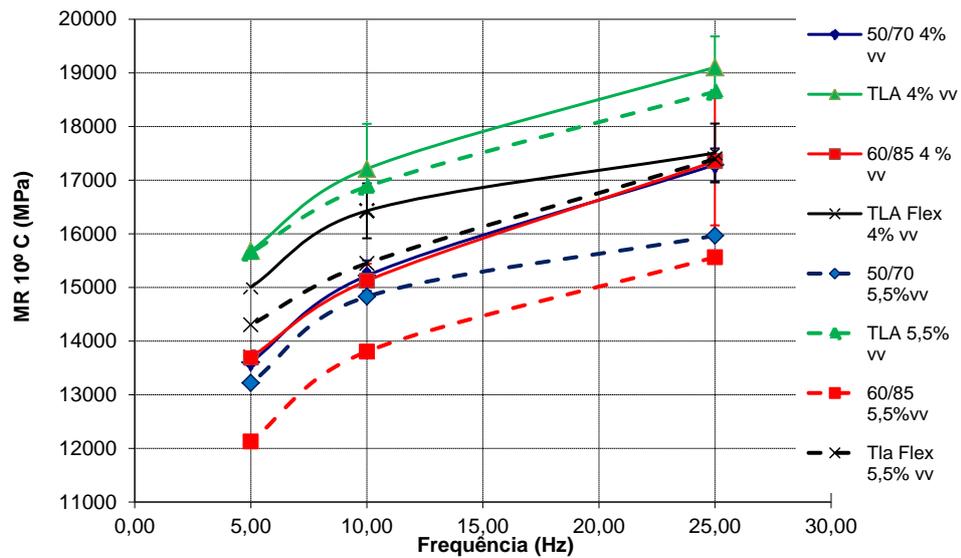


Figura 29: Resultados de MR a 10°C em função da frequência

Com base nos dados da Figura 30 pode-se afirmar que os maiores valores obtidos são os da frequência de 25 Hz e com 5,5% de volumes de vazios, pois só estão ocorrendo deformações plásticas nas misturas. Os valores mais elevados são das misturas com TLA Flex, inclusive as misturas com 4% de volume de vazios alcançaram valores mais altos que as demais misturas dos outros ligantes estudados com 5,5% de Vv, comprovando a eficiência desse ligante e sua maior flexibilidade. Existe uma tendência de queda nos valores de MR para os ligantes convencionais quando há aumento no volume de vazios, exemplificando isto as misturas do CAP TLA tiveram uma queda de valores representativa de 22%. Já para as misturas com ligantes modificados, os maiores valores são encontrados com maior volume de vazios, sendo que no CAP 60/85 ocorre um aumento de 26% no valor de MR.

Quando se avalia o desempenho das misturas em relação às diferentes frequências de carregamento, nota-se que independente da frequência, os maiores valores alcançados são os das misturas de TLA Flex, tanto que na frequência de 5 Hz, houve um aumento no valor de MR de 40% nas misturas com 5,5% de volume de vazios. Pode-se notar também que os menores valores encontrados foram para as misturas com o CAP 50/70.

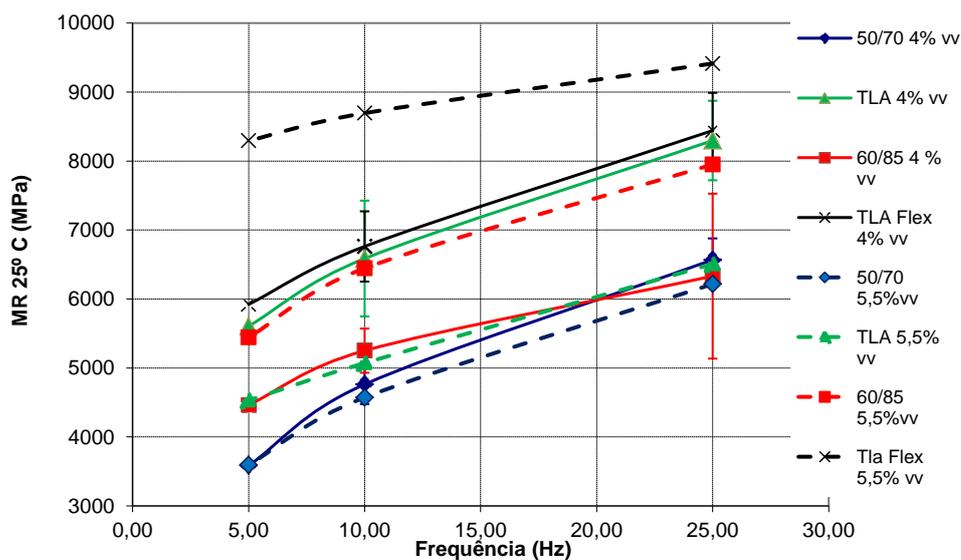


Figura 30: Resultados de MR a 25°C em função da frequência

Para a temperatura de 35°C, os maiores valores encontrados são os das misturas de TLA Flex com 5,5% de volume de vazios e os menores valores para as misturas do CAP 50/70 com 5,5 % de volume de vazios. Com relação às demais misturas, ocorreu o inverso do que para o TLA Flex, os maiores valores encontrados foram para as misturas com 4% de volume de vazios. As misturas do CAP TLA Flex com 4% de vv possuem maiores valores quando carregadas na frequência de 5 Hz e menores valores na frequência de 25 Hz quando comparadas as misturas com 5,5% de volume de vazios, fato este que se difere das demais misturas estudadas onde ocorre o inverso.

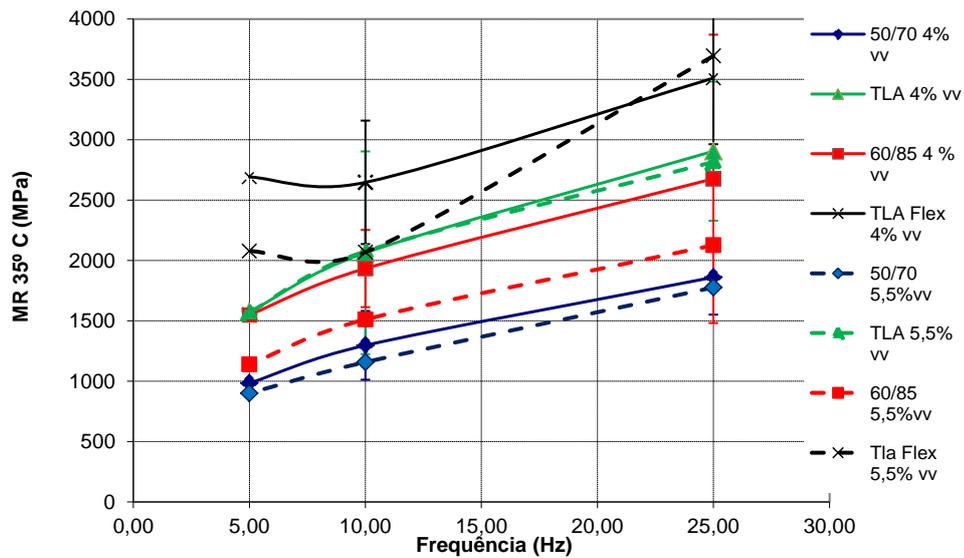


Figura 31: Resultados de MR a 35°C em função da frequência

Com base nos dados obtidos afirma-se que nas temperaturas de 25°C e 35°C a mistura com os valores mais elevados, independente da frequência foi a de TLA Flex, devido a ser uma mistura mais viscosa, característica esta herdada do CAP mais rígido. Já para baixa temperatura (10°C) a mistura que obteve os maiores resultados foi o TLA. Os valores mais elevados foram sempre encontrados na frequência de 25 Hz porque sofre menores deformações elásticas e o tempo de repouso é menor.

A partir dos dados obtidos realizou-se uma análise estatística, para verificar qual a influência das variáveis independentes na variável de resposta (variável dependente). Nesta análise buscou-se descobrir o que influencia mais o módulo de resiliência: a temperatura, frequência ou o volume de vazios.

Ao analisar os resultados apurados pela análise estatística para o valor de MR para cada mistura, verificou-se que a temperatura tem maior influência para as misturas com ligantes CAP 50/70, CAP TLA e CAP TLA Flex, seguida da frequência e por último o volume de vazios. Para as misturas com CAP 60/85 as variáveis que mais influenciaram foram temperatura e frequência.

Realizando a análise para todas as misturas, verificou-se a relevância da temperatura e da frequência para o MR.

Observando-se os valores de MR e RT dessas misturas, é desejado que a relação de ambos apresente um valor pequeno, pois busca-se uma baixa rigidez para evitar elevada absorção de tensões que levem ao trincamento prematuro do revestimento e uma alta resistência à tração para que a mistura resista a esforços de tração, que é o que ocorre com as misturas que contém TLA em sua composição.

Os ensaios de MR comprovaram que os valores mais altos são para ligantes modificados, pois possuem comportamento elástico melhor, ao contrário do que ocorre com as misturas convencionais que são menos rígidas.

Cada mistura deve ser selecionada de acordo com um caso específico de aplicação. Como por exemplo, um determinado tipo de tráfego, ou de clima ou ainda do tipo da estrutura. Estes ensaios mostram que misturas com TLA são indicadas para altas temperaturas e baixas frequências, já misturas com ligante 60/85 são indicadas para menores temperaturas.

4.2.3 Módulo Dinâmico Uniaxial (E^*)

Os ensaios de Módulo Dinâmico foram obtidos conforme descrito no capítulo anterior. Nas tabelas 22, 23, 24 e 25 são mostrados os resultados obtidos para cada mistura nas frequências ensaiadas.

Tabela 22: Resultados de E^* para misturas com o CAP 50/70

<i>Ligante</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Frequência (Hz)</i>	<i>E^* (MPa)</i>	<i>Ângulo de Fase (°)</i>	<i>Deformação (μm)</i>
50/70	4°C	25	20021	6,82	59,55
		10	19215	8,74	60,48
		5	18062	9,60	59,73
		1	15190	12,12	57,38
		0,5	13730	13,41	56,69
		0,1	10528	16,99	57,86
	20°C	25	10264	19,33	53,94
		10	7994	22,53	6,18
		5	6379	25,26	61,89
		1	3772	31,25	60,95
		0,5	2805	34,33	61,72
		0,1	1250	39,92	63,59
	40°C	25	1167	42,36	55,49
		10	646	44,19	58,39
		5	441	42,22	64,49
		1	198	35,58	74,66
		0,5	148	31,53	72,19
		0,1	89,5	22,95	72,76

Tabela 23: Resultados de E^* para misturas com o CAP TLA

<i>Ligante</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Frequência (Hz)</i>	<i>E^* (MPa)</i>	<i>Ângulo de Fase (°)</i>	<i>Deformação (μm)</i>
TLA	4°C	25	22641	5,01	62,65
		10	21161	6,80	63,35
		5	20020	7,30	63,19
		1	17471	8,98	63,20
		0,5	16209	9,83	63,28
		0,1	13246	12,35	60,23
	20°C	25	12632	13,89	61,98
		10	10641	16,29	63,56
		5	9251	17,43	64,27
		1	6644	20,55	63,21
		0,5	5642	22,68	62,99
		0,1	3452	27,51	62,05
	40°C	25	2949	31,29	62,68
		10	1757	36,72	66,85
		5	1253	38,64	65,66
		1	574	38,81	63,10
		0,5	391	37,92	66,30
		0,1	198	34,07	51,50

Tabela 24: Resultados de E^* para misturas com o CAP 60/85

<i>Ligante</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Frequência (Hz)</i>	<i>E^* (MPa)</i>	<i>Ângulo de Fase (°)</i>	<i>Deformação (μm)</i>
60/85	4°C	25	16200	6,89	63,40
		10	15200	8,10	63,10
		5	14300	8,85	63,50
		1	12300	11,10	62,00
		0,5	11300	12,20	60,60
		0,1	8940	15,20	62,40
	20°C	25	8680	17,10	62,20
		10	7350	19,80	63,40
		5	6350	21,30	64,70
		1	4310	25,70	61,70
		0,5	3510	28,10	61,00
		0,1	1960	33,10	61,80
	40°C	25	1960	34,00	62,40
		10	1270	36,30	65,00
		5	894	37,00	66,40
		1	447	33,50	65,10
		0,5	337	32,20	62,90
		0,1	196	27,70	64,50

Tabela 25: Resultados de E^* para misturas com o CAP TLA Flex

<i>Ligante</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Frequência (Hz)</i>	<i>E^* (MPa)</i>	<i>Ângulo de Fase (°)</i>	<i>Deformação (μm)</i>
TLA Flex	4°C	25	18035	5,92	62,90
		10	17112	6,99	63,41
		5	16202	7,68	63,11
		1	13985	9,54	62,24
		0,5	12975	10,57	61,50
		0,1	10458	13,47	62,09
	20°C	25	10727	15,23	63,22
		10	9091	17,79	62,95
		5	7811	19,29	63,47
		1	5426	23,36	63,13
		0,5	4427	25,88	62,54
		0,1	2528	31,54	63,36
	40°C	25	2957	31,73	60,74
		10	1945	34,94	62,95
		5	1382	36,61	63,57
		1	640	35,12	64,48
		0,5	460	34,66	62,69
		0,1	228	30,04	65,64

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam os resultados obtidos em função da temperatura de ensaio.

Pode se observar na Figura 32 que os maiores valores encontrados foram para as misturas com o ligante TLA e os menores valores para as misturas com o CAP 60/85, comprovando os resultados obtidos no ensaio de MR a 10°C, em que estas misturas tiveram o mesmo comportamento. Corroborando que para baixas temperaturas o CAP 60/85 tem um comportamento mais elásticos, distribuindo melhor os esforços solicitados. A diferença de valores de MD foi de 50% entre as misturas.

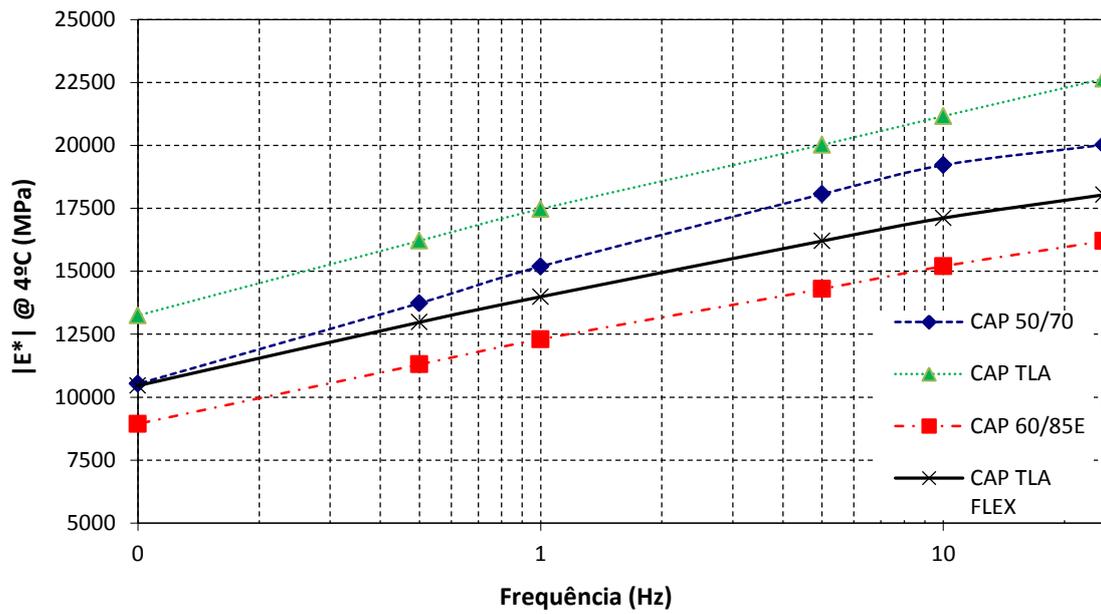


Figura 32: Resultados de E* a 4°C

Para as misturas ensaiadas na temperatura de 20°C (Figura 33) ambas as misturas que contém ligante TLA garantiram os maiores valores, ficando a misturas com ligante 60/85 com os valores mais baixos, essa diferença de valores foi de 45%.

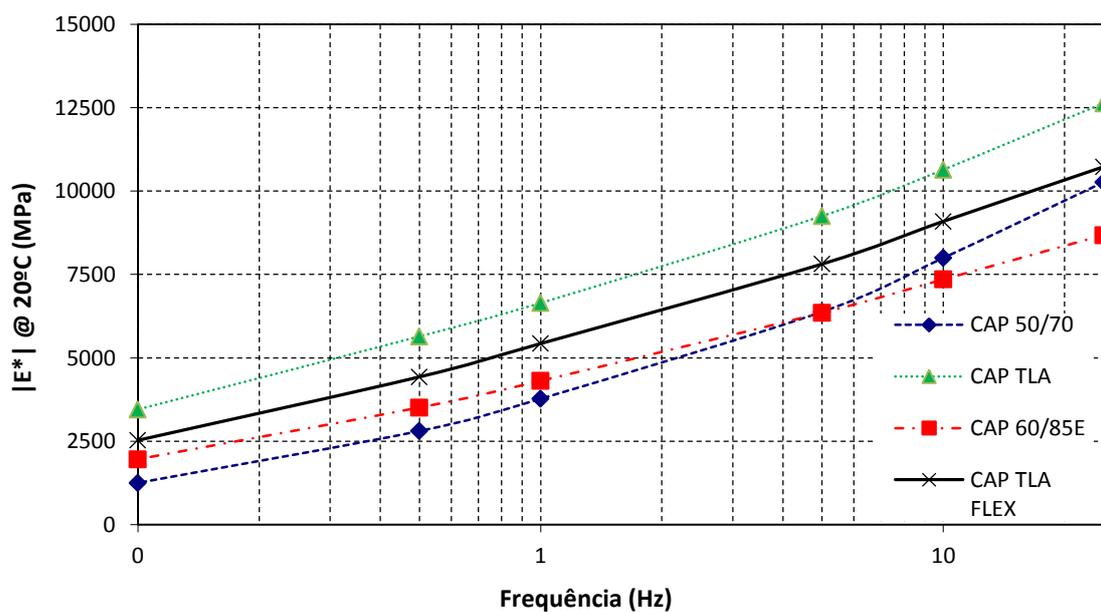


Figura 33: Resultados de E* a 20°C

Para as misturas ensaiadas a 40°C (Figura 34) os maiores valores ficaram com as misturas de TLA Flex. Os valores mais baixos foram para as misturas com CAP 50/70. A diferença de valores foi de 53%.

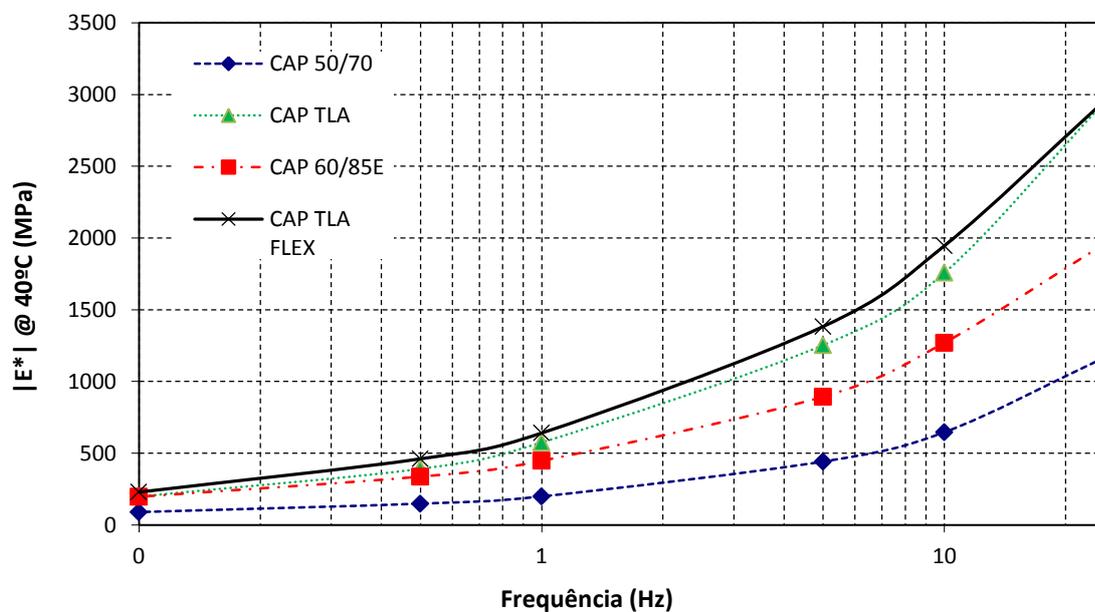


Figura 34: Resultados de E* a 40°C

Nas Figuras 35, 36 e 37 estão apresentadas as curvas da relação ângulo de fase por frequência para cada frequência estudada.

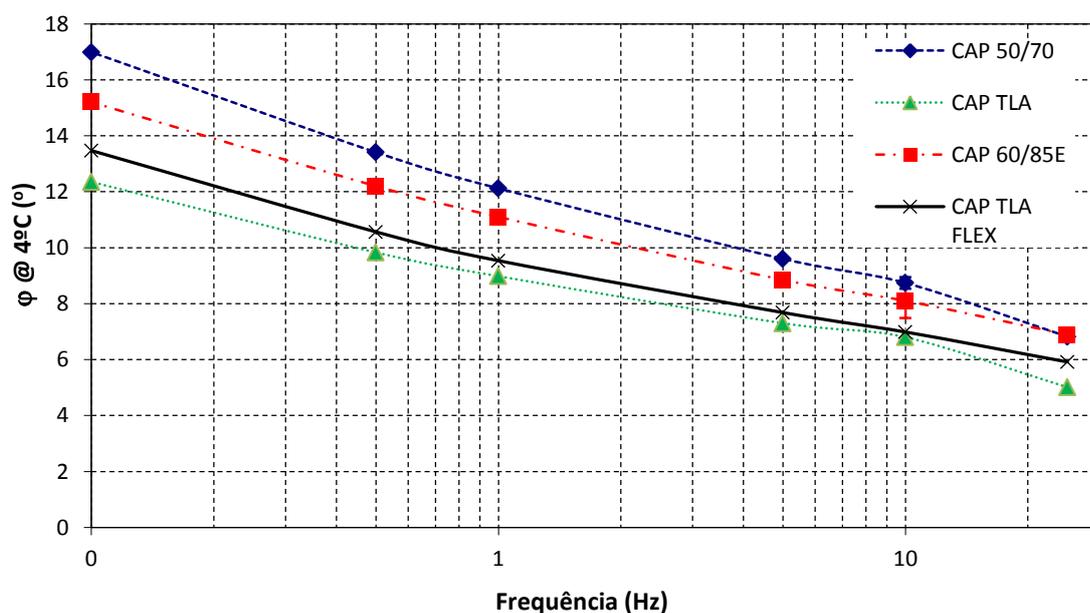


Figura 35: Ângulo de fase das misturas a 4°C

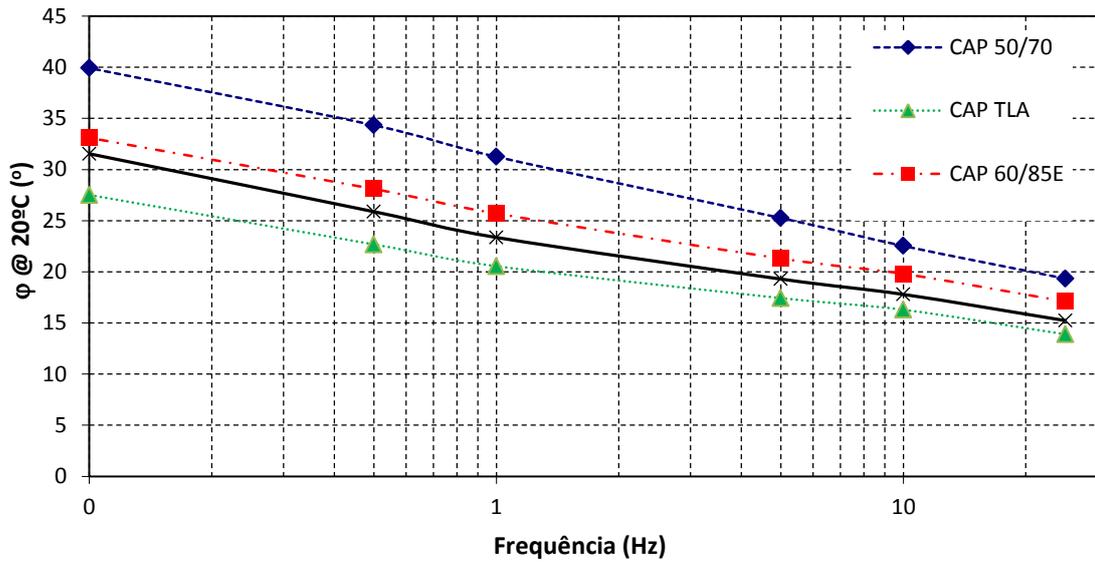


Figura 36: Ângulo de fase das misturas a 20°C

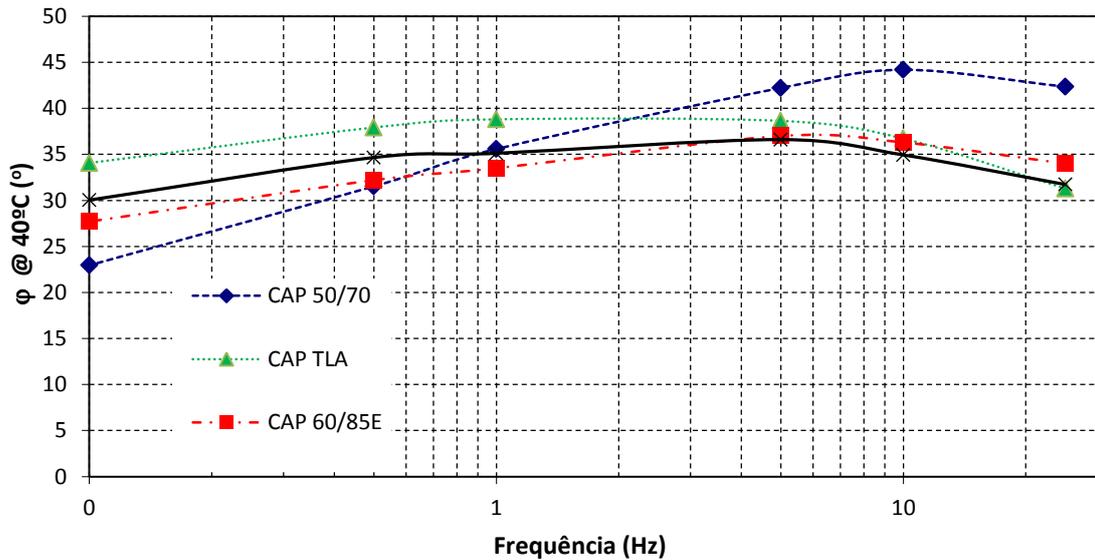


Figura 37: Ângulo de fase das misturas a 40°C

Com base nas figuras anteriores, o ângulo de fase diminui à medida que se aumenta a frequência do carregamento, mantendo-se a temperatura constante. Ainda em relação aos ângulos de fase, as misturas mais rígidas apresentaram os menores valores, o que era esperado, já que dissipam menos energia viscosa ao longo dos carregamentos.

Os resultados dos ensaios de módulo complexo mostram que à medida que se diminui a temperatura e aumenta a frequência, o módulo dinâmico se eleva. Através da análise comparativa das misturas asfálticas estudadas, os resultados deram o que já se esperava.

As Figuras 38 e 39 apresentam a representação gráfica dos resultados no espaço Cole-Cole e no Diagrama de Black. Na Cole-Cole é representada, em escala aritmética a parte real (E1) e imaginária ou de perda (E2). Nota-se, em geral, que os dados formam curvas de formato de semicírculo, como era de se esperar, e que a mistura convencional apresenta os maiores valores de E2 indicando mobilização do esqueleto mineral e dissipação de energia. As misturas com polímero SBS ficam no outro extremo, indicando maior capacidade de atenuação dos esforços pelo ligante.

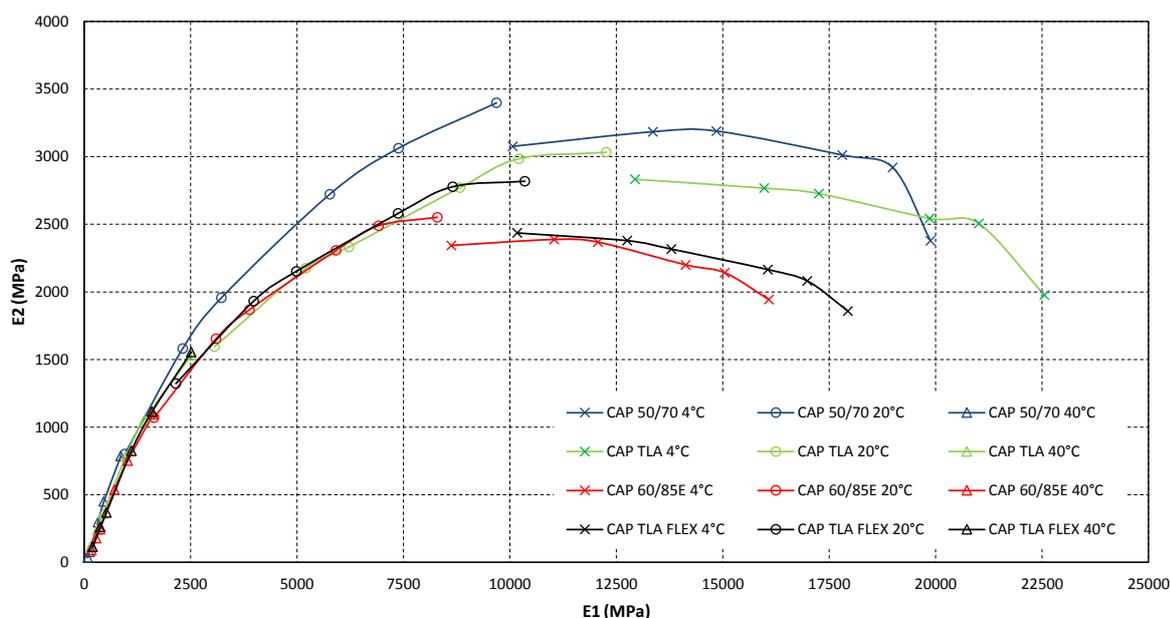


Figura 38: Espaço Cole-Cole para todas as misturas

A Figura 39 apresenta, para todas as misturas, a relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase, para diferentes temperaturas. Através desta representação é possível visualizar a região dos módulos onde ocorre o acréscimo do ângulo de fase para condições de temperatura elevada (neste caso em 40°C). Pode ser observado que a mistura com ligante convencional apresenta os maiores valores de ângulo de fase, ou seja, apresenta um parcela viscosa mais importante, em detrimento da parcela elástica. Pode-se, a partir daí, inferir (em relação aos demais

misturas estudadas) que este ligante apresentará em campo, mais deformações plásticas que os demais

Novamente, no outro extremo, aparecem as misturas com ligante SBS que apresentam menores ângulos de fase para o mesmo módulo dinâmico. A mistura com ligante TLA apresenta comportamento intermediário.

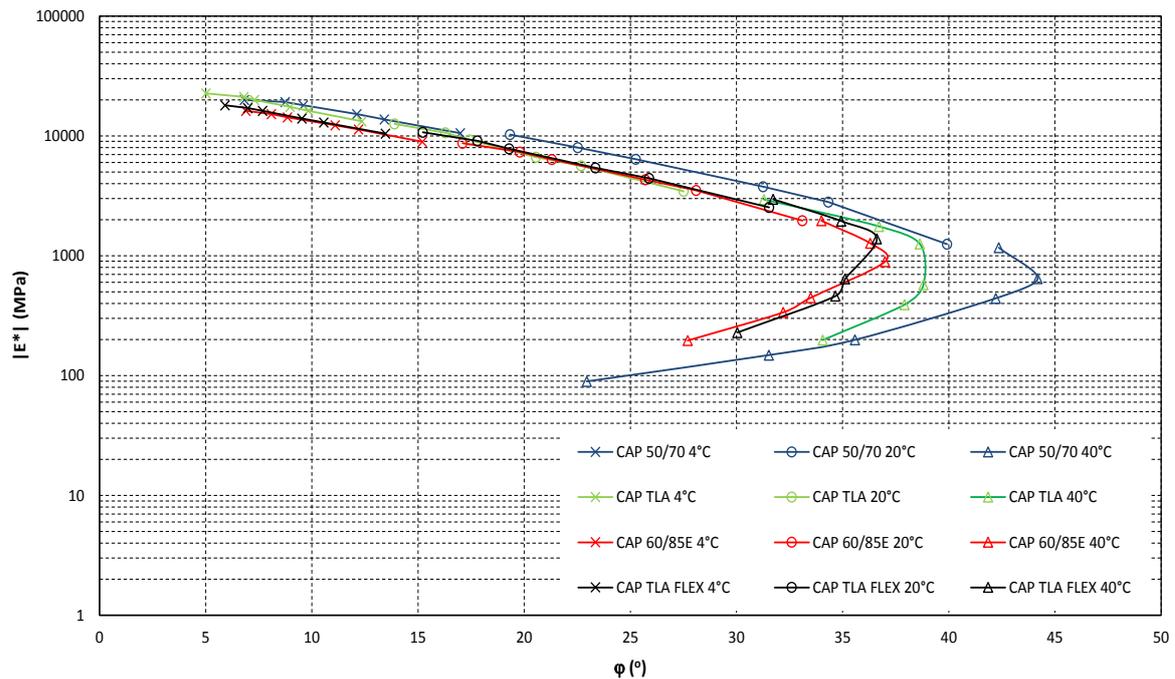


Figura 399: Diagrama de Black para todas as misturas

Tendo-se em vista o comportamento termoreologicamente simples das misturas asfálticas, a partir dos resultados dos ensaios de módulo dinâmico (módulo e ângulo de fase) foram construídas curvas mestras utilizando-se o princípio da superposição tempo-temperatura (t-TS). Tais curvas foram ajustadas ao modelo sigmoidal e os fatores de deslocamento (*shift factors*) em função da temperatura foram ajustados a um polinômio de segunda ordem.

Uma das grandes vantagens das curvas-mestras é possibilitarem a previsão dos valores de uma determinada propriedade reológica ao longo de uma gama de frequências mais ampla do que aquela que foi inicialmente utilizada nos ensaios, o que é desejável, não só porque a realização de ensaios numa gama alargada de frequências é um procedimento moroso, como

também pelo fato de poderem existir algumas limitações nos equipamentos de medida (limites superiores e inferiores de frequência).

A Figura 40 apresenta o comparativo das curvas $\log a(T)$ nota-se que quanto mais próximos de zero forem os valores de cada mistura, menos suscetível a temperatura esta mistura é, pois tendem ter maior estabilidade. A mistura TLA Flex é a que aparece menos íngreme comprovando que este ligante melhora a suscetibilidade térmica da mistura.

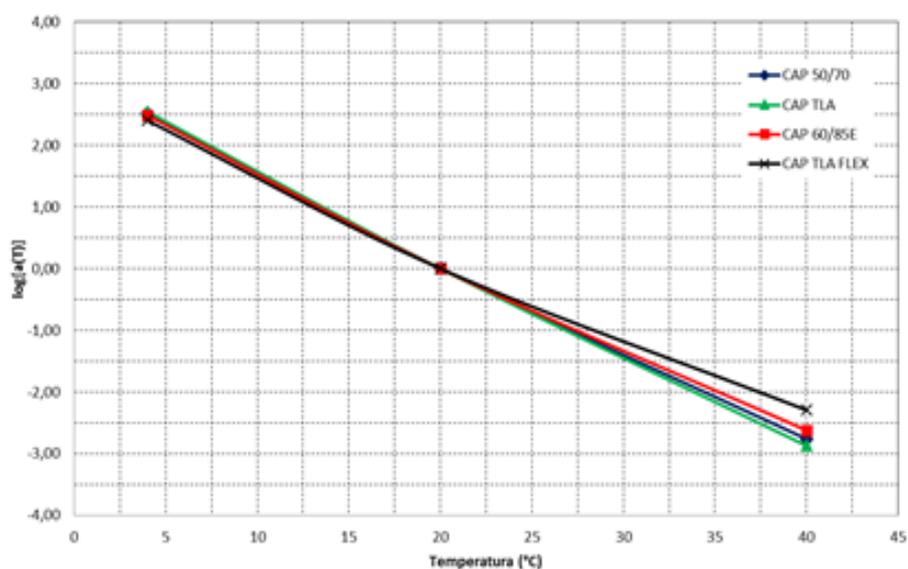


Figura 40: Comparação curva $\log a(T)$ para todas as misturas

A Figura 41 traz a comparação de todas as curvas mestras das misturas estudadas. As misturas 60/85 trabalham bem a altas frequências, mas seu desempenho piora nas frequências baixas, ou seja, seu maior potencial é para carregamentos altos ou temperaturas mais baixas, tendo bom potencial para fadiga.

Como pode ser visto na Figura 41, o MD cresce em função da frequência e este crescimento deve-se ao fato de que quando a frequência é aumentada existe um tempo menor em carga, não havendo tempo para manifestações de deformações viscoelásticas. Quando a frequência é muito alta, o MD atinge seu maior valor, pois só existem praticamente deformações elásticas no material. Quando a frequência é baixa, o tempo de carregamento é longo e as deformações viscoelásticas podem se manifestar em sua totalidade, provocando

assim MD baixo. Para frequências muito baixas, o MD atinge seu menor valor, assim explicando o formato da curva mestra.

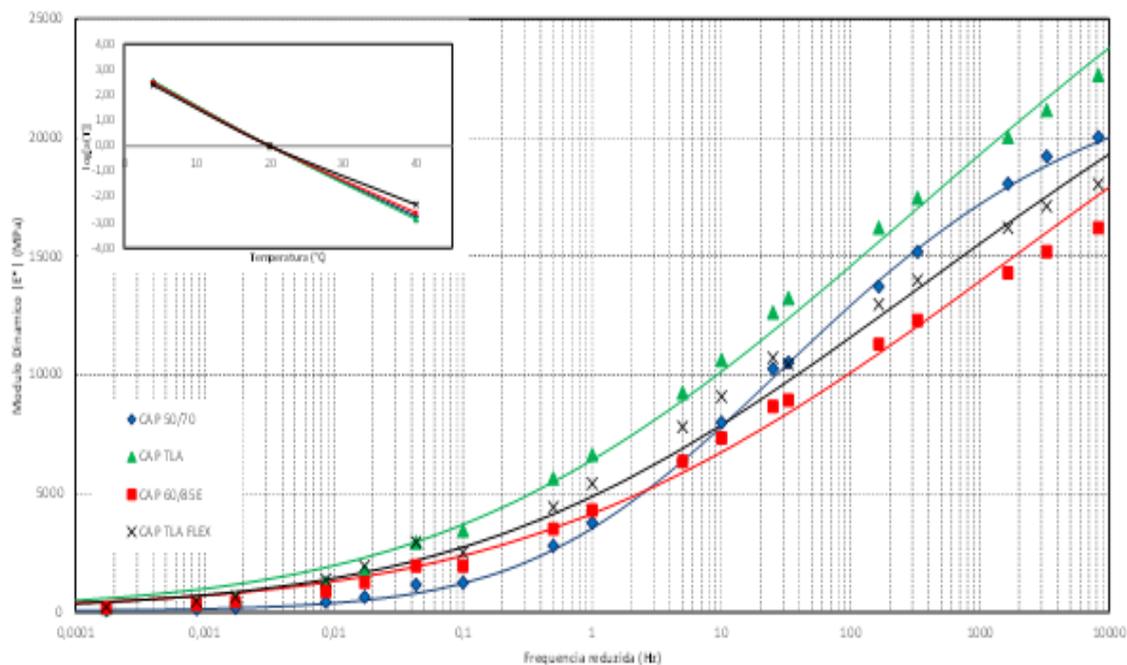


Figura 41: Comparação curva mestra para todas as misturas

Conforme esperado, o ligante asfáltico exerce forte efeito na rigidez das misturas. Nas temperaturas intermediárias, por exemplo, a diferença chega a ser maior do que 70% entre amostras nos extremos de rigidez. A mistura menos rígida – 60/85, tem módulo dinâmico de aproximadamente 7350 MPa a 10 Hz e 20°C, enquanto que a mistura TLA – a mais rígida, tem módulo de 12632 MPa na mesma condição.

Por fim, a Figura 42 apresenta, para todas as misturas, a curva mestra do ângulo de fase, novamente pode ser observado que a mistura convencional possui maiores ângulos de fase e uma inversão de comportamento em uma frequência próxima de 0,02Hz enquanto que para as misturas modificadas esta inversão acontece mais à esquerda, indicando que o ligante consegue suportar as tensões e deformações até temperaturas mais elevadas. Na região a esquerda do pico o comportamento da mistura recebe forte influência do esqueleto mineral, pois para estas frequências (ou altas temperaturas) o ligante já não tem capacidade elástica.

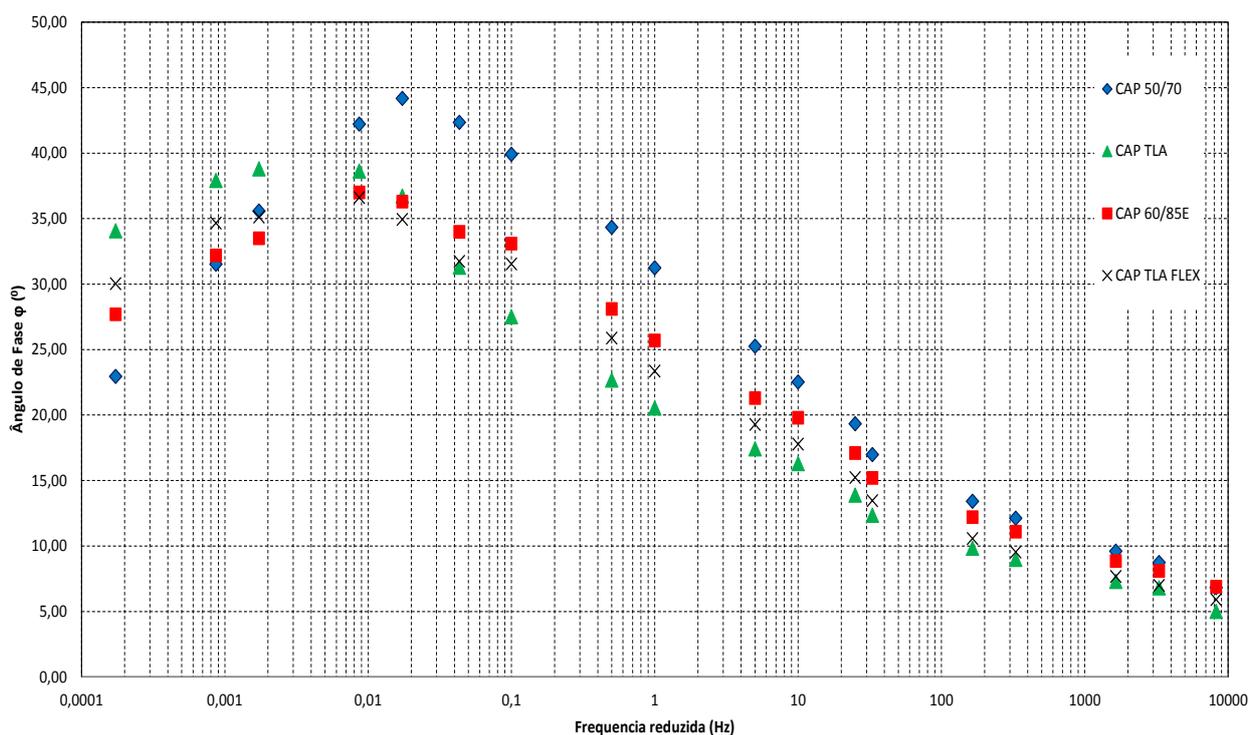


Figura 42: Comparação curva mestra do ângulo de fase para todas as misturas

4.3. Análise de Desempenho

As análises de desempenho foram executadas conforme descrito no capítulo 3 e realizadas nos três níveis de análise que o software permite, como pode ser visto a seguir.

4.3.1 Nível de análise 3

Realiza os cálculos de maneira totalmente empírica a partir da informação do PG do ligante.

Nas Tabelas 26, 27, 28 e 29 estão apresentados os valores obtidos para os parâmetros avaliados na análise de desempenho para as três espessuras admitidas.

Tabela 26: Resultados da análise de desempenho nível 3 para revestimento com 10 cm de espessura

Espessura Revestimento 10 cm					
CAP 50/70					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	2,38	50,00	69,75	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	32,21	50,00	0,24	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	51,20	50,00	3,19	Não satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1912,88	50,00	0,06	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	14,41	50,00	1,53	Não satisfeito
CAP TLA					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	2,24	50,00	78,19	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	27,28	50,00	1,62	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	48,40	50,00	4,89	Não satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1912,88	50,00	0,06	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	10,04	50,00	8,31	Não satisfeito
CAP 60/85E					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	2,25	50,00	77,79	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	28,14	50,00	1,15	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	46,10	50,00	6,77	Não satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1912,88	50,00	0,06	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	10,89	50,00	5,79	Não satisfeito
CAP TLA Flex					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	2,22	50,00	79,79	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	25,50	50,00	3,36	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	50,80	50,00	3,39	Não satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1931,82	50,00	0,05	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	8,13	50,00	19,34	Não satisfeito

Tabela 27: Resultados análise de desempenho nível 3 para revestimento com 14 cm de espessura

Espessura Revestimento 14 cm					
CAP 50/70					
<i>Crítérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Crítério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	2,04	50	88,71	Satisfeito
Deformação Permanente	19	26,29	50	3,4	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25	19,9	50	64,09	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	1842,8	50	0,09	Não satisfeito
Deformação revestimento	6	11,33	50	4,84	Não satisfeito
CAP TLA					
<i>Crítérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Crítério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	1,91	50	93,43	Satisfeito
Deformação Permanente	19	22,27	50	16,53	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25	16,4	50	72,86	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	1780,3	50	0,14	Não satisfeito
Deformação revestimento	6	7,99	50	20,59	Não satisfeito
CAP 60/85E					
<i>Crítérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Crítério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	1,92	50	93,09	Satisfeito
Deformação Permanente	19	23,05	50	12,31	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25	14,9	50	76,26	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	1789,77	50	0,13	Não satisfeito
Deformação revestimento	6	8,72	50	14,84	Não satisfeito
CAP TLA Flex					
<i>Defeitos Crítérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Crítério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	1,86	50	94,88	Satisfeito
Deformação Permanente	19	20,77	50	28,42	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25	15,2	50	75,6	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	1704,55	50	0,23	Não satisfeito
Deformação revestimento	6	6,54	50	35,59	Não satisfeito

Tabela 28: Resultados análise de desempenho nível 3 para revestimento com 18 cm de espessura

Espessura Revestimento 18 cm					
CAP 50/70					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	1,84	50	95,34	Satisfeito
Deformação Permanente	19	22,88	50	14,16	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25	6,35	50	90,68	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	1435,61	50	1,14	Não satisfeito
Deformação revestimento	6	9,77	50	9,3	Não satisfeito
CAP TLA					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	1,71	50	97,96	Satisfeito
Deformação Permanente	19	19,31	50	46,02	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25	4,11	50	93,37	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	956,44	50	10,29	Não satisfeito
Deformação revestimento	6	6,99	50	32,5	Não satisfeito
CAP 60/85E					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	1,75	50	97,38	Satisfeito
Deformação Permanente	19	20,3	50	34,31	Satisfeito
Trincamento por fadiga	25	4,42	50	92,86	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	1102,27	50	5,76	Não satisfeito
Deformação revestimento	6	7,73	50	23,17	Não satisfeito
CAP TLA Flex					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	1,69	50	98,33	Satisfeito
Deformação Permanente	19	18,72	50	53,72	Satisfeito
Trincamento por fadiga	25	4,15	50	93,31	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	721,59	50	22,36	Não satisfeito
Deformação revestimento	6	6,37	50	42,76	Não satisfeito

O nível de análise de desempenho 3 consiste de valores totalmente estimados e portanto tem o menor nível de confiança. Com base nestes seis critérios avaliados nenhuma das misturas seria considerada aceitável.

Na tabela 29, tem-se os resultados dos os 4 critérios de ruptura mais importantes no Brasil para verificação da vida de projeto dessas misturas e a sua durabilidade em anos.

Tabela 29: Resultados da vida útil do pavimento em anos

<i>Crítérios de Ruptura</i>	<i>Espessura Revestimento</i>											
	10 cm				14 cm				18 cm			
	CAP 50/70	CAP TLA	CAP 60/85 E	CAP TLA Flex	CAP 50/70	CAP TLA	CAP 60/85 E	CAP TLA Flex	CAP 50/70	CAP TLA	CAP 60/85 E	CAP TLA Flex
IRI	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Deformação Permanente Total	2	2,5	3,25	4	3	6	7	8	6	9	10	10
Trincamento por fadiga	3,75	4,25	5,5	5	10	10	10	10	10	10	10	10
Trincamento Térmico	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Com base nesta comparação verifica-se que para a espessura de 18 cm as misturas de TLA Flex e 60/85 seriam aceitáveis e durariam os 10 anos previstos no projeto.

4.3.2 Nível de análise 2

Para este nível os cálculos são realizados a partir das informações do PG do ligante, G* e ângulo de fase do ligante.

Nas tabelas 30, 31, 32 e 33 estão apresentados os valores obtidos para os parâmetros avaliados na análise de desempenho e se o critério é satisfeito.

Tabela 30: Resultados análise de desempenho nível 2 para revestimento com 10 cm de espessura

Espessura Revestimento 10 cm					
CAP 50/70					
<i>Crítérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Crítério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	2,38	50,00	69,76	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	30,71	50,00	0,39	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	56,80	50,00	1,22	Não satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1950,76	50,00	0,04	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	12,88	50,00	2,65	Não satisfeito
CAP TLA					
<i>Crítérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Crítério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	2,05	50	88,17	Satisfeito
Deformação Permanente	19	22,37	50	14,44	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25	37	50	19,79	Não satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	1893,94	50	0,06	Não satisfeito
Deformação revestimento	6	6,31	50	43,75	Não satisfeito
CAP 60/85E					
<i>Crítérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Crítério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	2,28	50,00	76,15	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	28,07	50,00	1,16	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	50,70	50,00	3,45	Não satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1931,82	50,00	0,05	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	10,71	50,00	6,26	Não satisfeito
CAP TLA Flex					
<i>Crítérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Crítério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	1,86	50,00	94,85	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	18,37	50,00	59,16	Satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	24,30	50,00	51,96	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1770,83	50,00	0,15	Satisfeito
Deformação revestimento	6,00	3,70	50,00	95,86	Não satisfeito

Tabela 31: Resultados análise de desempenho nível 2 para revestimento com 14 cm de espessura

Espessura Revestimento 14 cm					
CAP 50/70					
<i>Cr�terios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Crit�rio Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcan�ados</i>	
IRI	2,70	2,01	50,00	89,86	Satisfeito
Deforma�o Permanente	19,00	24,81	50,00	6,05	N�o satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	21,00	50,00	61,14	Satisfeito
Trincamento T�rmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1890,15	50,00	0,07	N�o satisfeito
Deforma�o revestimento	6,00	10,00	50,00	8,43	N�o satisfeito
CAP TLA					
<i>Cr�terios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Crit�rio Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcan�ados</i>	
IRI	2,70	1,76	50,00	97,19	Satisfeito
Deforma�o Permanente	19,00	18,68	50,00	54,47	Satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	9,12	50,00	85,95	Satisfeito
Trincamento T�rmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1513,26	50,00	0,74	N�o satisfeito
Deforma�o revestimento	6,00	5,55	50,00	59,68	N�o satisfeito
CAP 60/85E					
<i>Cr�terios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Crit�rio Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcan�ados</i>	
IRI	2,70	1,93	50,00	92,86	Satisfeito
Deforma�o Permanente	19,00	22,90	50,00	13,03	N�o satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	16,10	50,00	73,56	Satisfeito
Trincamento T�rmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1846,59	50,00	0,09	N�o satisfeito
Deforma�o revestimento	6,00	8,59	50,00	15,74	N�o satisfeito
CAP TLA Flex					
<i>Cr�terios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Crit�rio Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcan�ados</i>	
IRI	2,70	1,60	50,00	99,20	Satisfeito
Deforma�o Permanente	19,00	15,31	50,00	93,30	Satisfeito
Deforma�o por fadiga	25,00	4,55	50,00	92,70	Satisfeito
Deforma�o T�rmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Fadiga do topo para a base	378,80	653,41	50,00	27,03	N�o satisfeito
Deforma�o revestimento	6,00	3,45	50,00	97,87	N�o satisfeito

Tabela 32: Resultados análise de desempenho nível 2 para revestimento com 18 cm de espessura

Espessura Revestimento 18 cm					
CAP 50/70					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	1,82	50	96,04	Satisfeito
Deformação Permanente	19	21,64	50	21,93	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25	6,52	50	90,47	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	1462,12	50	0,99	Não satisfeito
Deformação revestimento	6	8,69	50	15,02	Não satisfeito
CAP TLA					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	1,6	50	99,28	Satisfeito
Deformação Permanente	19	16,57	50	81,63	Satisfeito
Trincamento por fadiga	25	2,33	50	99,50	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	285,96	50	58,58	Satisfeito
Deformação revestimento	6	5,16	50	68,63	Satisfeito
CAP 60/85E					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	1,75	50	97,38	Satisfeito
Deformação Permanente	19	20,08	50	36,69	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25	4,72	50	92,58	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	1179,92	50	4,10	Não satisfeito
Deformação revestimento	6	7,57	50	24,95	Não satisfeito
CAP TLA Flex					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,7	1,51	50	99,75	Satisfeito
Deformação Permanente	19	13,76	50	98,69	Satisfeito
Trincamento por fadiga	25	1,11	50	100,00	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,4	0,19	50	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,8	15,98	50	89,81	Satisfeito
Deformação revestimento	6	3,46	50	97,84	Satisfeito

Este nível de análise de desempenho requer valores de características dos ligantes utilizados, mas ainda permite o uso de correlações. Para as espessuras de revestimento de 10 e 14 cm nenhuma das misturas é adequada e suporta todos os defeitos para na vida de projeto. Para a espessura de 18 cm são aceitas as misturas de TLA e TLA Flex.

A Tabela 33, apresenta os resultados dos 4 critérios de ruptura mais importantes para no Brasil, quanto a verificação da vida útil de projeto dessas misturas em anos.

Tabela 33: Resultados da vida útil do pavimento em anos

<i>Critérios de Ruptura</i>	<i>Espessura Revestimento</i>											
	10 cm				14 cm				18 cm			
	<i>Ligante</i>											
	CAP 50/70	CAP TLA	CAP 60/85E	CAP TLA Flex	CAP 50/70	CAP TLA	CAP 60/85E	CAP TLA Flex	CAP 50/70	CAP TLA	CAP 60/85E	CAP TLA Flex
IRI	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Deformação Permanente	2	5	2,5	10	4	10	5	10	6	10	9	10
Deformação por fadiga	3,75	7	4,5	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Deformação Térmica	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	<i>duração do pavimento em anos</i>											

Nesta comparação admite-se que as misturas com TLA Flex seriam adequadas nas 3 espessuras estudadas e as misturas com TLA para as espessuras de 14 e 18 cm.

4.3.3 Nível de análise 1

Para este nível os cálculos são realizados a partir das informações do PG do ligante, G*, ângulo de fase e módulo dinâmico das misturas, não existem correlações empíricas e os dados são os mais fiéis.

Nas Tabelas 34, 35, 36 e 37 estão apresentados os valores obtidos para os parâmetros avaliados na análise de desempenho e se o critério é satisfeito.

Tabela 34: Resultados análise de desempenho nível 1 para revestimento com 10 cm de espessura

Espessura Revestimento 10 cm					
CAP 50/70					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	2,38	50,00	69,75	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	32,21	50,00	0,24	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	51,20	50,00	3,19	Não satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1912,88	50,00	0,06	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	14,41	50,00	1,53	Não satisfeito
CAP TLA					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	2,24	50,00	78,19	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	27,28	50,00	1,62	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	48,40	50,00	4,89	Não satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1912,88	50,00	0,06	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	10,04	50,00	8,31	Não satisfeito
CAP 60/85E					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	2,25	50,00	77,79	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	28,14	50,00	1,15	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	46,10	50,00	6,77	Não satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1912,88	50,00	0,06	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	10,89	50,00	5,79	Não satisfeito
CAP TLA Flex					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	2,22	50,00	79,79	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	25,50	50,00	3,36	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	50,80	50,00	3,39	Não satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1931,82	50,00	0,05	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	8,13	50,00	19,34	Não satisfeito

Tabela 35: Resultados análise de desempenho nível 1 para revestimento com 14 cm de espessura

Espessura Revestimento 14 cm					
CAP 50/70					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	2,03	50,00	89,10	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	25,31	50,00	4,93	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	21,90	50,00	58,68	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1892,05	50,00	0,07	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	10,38	50,00	7,19	Não satisfeito
CAP TLA					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Critérios de Ruptura		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	1,91	50,00	93,30	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	22,30	50,00	16,45	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	16,40	50,00	72,86	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1840,91	50,00	0,09	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	8,12	50,00	19,43	Não satisfeito
CAP 60/85E					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	1,86	50,00	94,94	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	21,21	50,00	24,63	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	12,60	50,00	80,99	Não satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1765,15	50,00	0,15	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	7,34	50,00	27,78	Não satisfeito
CAP TLA Flex					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	1,85	50,00	95,31	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	20,52	50,00	31,36	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	13,10	50,00	80,02	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1765,15	50,00	0,16	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	6,85	50,00	34,64	Não satisfeito

Tabela 36: Resultados análise de desempenho nível 1 para revestimento com 18 cm de espessura

Espessura Revestimento 18 cm					
CAP 50/70					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	1,83	50,00	95,73	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	22,02	50,00	19,21	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	6,84	50,00	90,08	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1492,42	50,00	0,83	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	8,96	50,00	13,32	Não satisfeito
CAP TLA					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	1,74	50,00	97,62	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	19,60	50,00	42,38	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	4,80	50,00	92,49	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	1128,79	50,00	5,14	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	7,21	50,00	29,39	Não satisfeito
CAP 60/85E					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	1,69	50,00	98,29	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	18,77	50,00	53,04	Não satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	3,62	50,00	94,20	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	827,65	50,00	16,12	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	6,63	50,00	38,03	Não satisfeito
CAP TLA Flex					
<i>Critérios de Ruptura</i>	Confiabilidade		% Confiabilidade		Critério Satisfeito?
	<i>Alvo</i>	<i>Previstos</i>	<i>Alvo</i>	<i>Alcançados</i>	
IRI	2,70	1,68	50,00	98,48	Satisfeito
Deformação Permanente	19,00	18,21	50,00	60,65	Satisfeito
Trincamento por fadiga	25,00	3,76	50,00	93,89	Satisfeito
Trincamento Térmica	189,40	0,19	50,00	100,00	Satisfeito
Trincamento de cima para baixo	378,80	778,41	50,00	18,86	Não satisfeito
Deformação revestimento	6,00	6,25	50,00	44,96	Não satisfeito

Este nível é o mais confiável, pois os cálculos são realizados com base nas informações dos ligantes e das misturas, reduzindo possíveis correlações ou cálculos empíricos. Nenhuma das amostras é considerada adequada para este nível de análise, quando levado em consideração os seis defeitos avaliados. Os critérios que menos são satisfeitos são os da deformação do revestimento e da fadiga de cima para baixo do revestimento.

Quando se compara o resultado da vida útil dos pavimentos em anos, levando em conta apenas os 4 critérios de ruptura mais importantes no Brasil, identificados na Tabela 37, observa-se que somente na espessura de 18 cm de revestimento teríamos uma mistura considerada aceitável, a mistura com TLA Flex que duraria os 10 anos de projeto da rodovia. Pode-se observar que a mistura com TLA quase atingiu os 10 anos de duração quanto ao critério de deformação permanente, o que garante a sua eficácia e que corrobora os resultados obtidos nos ensaios de módulo dinâmico e módulo de resiliência.

Tabela 37: Resultados da vida útil do pavimento em anos

<i>Critérios de Ruptura</i>	<i>Espessura Revestimento</i>											
	10 cm				14 cm				18 cm			
	<i>Ligante</i>											
	CAP 50/70	CAP TLA	CAP 60/85E	CAP TLA Flex	CAP 50/70	CAP TLA	CAP 60/85E	CAP TLA Flex	CAP 50/70	CAP TLA	CAP 60/85E	CAP TLA Flex
IRI	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Deformação Permanente	1,75	3	2,5	4	3	6	5	7,5	5	9,75	8	10
Deformação por fadiga	4	5	5,25	5	10	10	10	10	10	10	10	10
Deformação Térmica	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	<i>duração do pavimento em anos</i>											

Comparando os resultados desse nível que é o mais confiável com os outros dois níveis avaliados, nota-se que somente a mistura com TLA Flex consegue a duração de projeto da rodovia para os 10 anos, ao contrário do nível 2 onde cinco estruturas/misturas eram consideradas aceitáveis, três delas sendo de TLA Flex nas diferentes espessuras e duas de TLA nas espessuras de 14 e 18 cm de revestimento.

Estes resultados corroboram os resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica, a mistura que obteve os melhores resultados e que foi considerada menos suscetível a influencia da temperatura e frequência foi a mistura de TLA Flex.

Nas Figuras 43, 44, 45 e 46 os dados da tabela 37 estão apresentados para melhor visualização em forma de gráficos. O IRI e o trincamento térmico foram atendidos em todos os casos enquanto que o trincamento por fadiga é atendido para todas as misturas com 14cm e a deformação permanente é o parâmetro crítico, só atendida com 18cm de revestimento. Vale mencionar que toda esta análise foi feita no intuito de comparar as misturas para um cenário de tráfego, um contexto estrutural e a luz dos modelos e calibrações da metodologia utilizada.

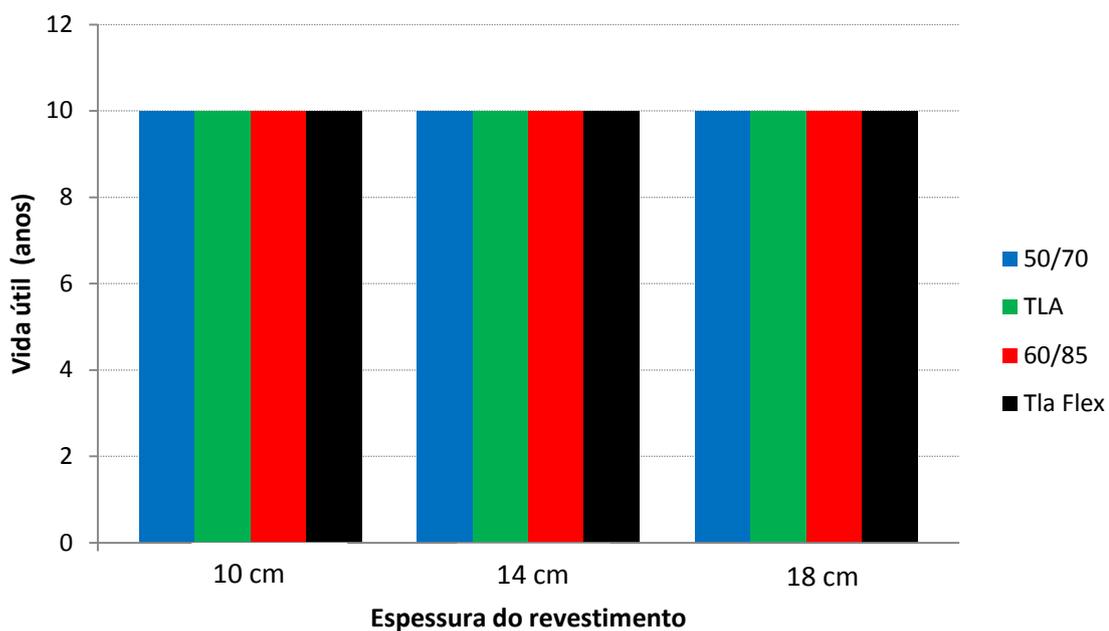


Figura 43: Duração do pavimento em anos tendo com critério o IRI

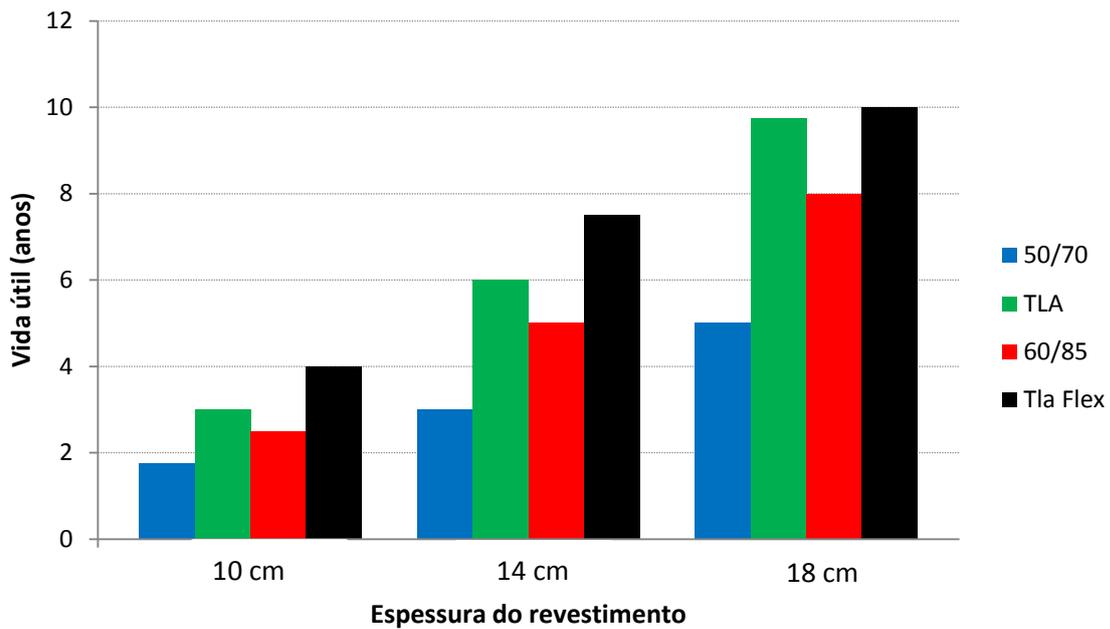


Figura 44: Resultados da Deformação Permanente Total em função da durabilidade do revestimento em anos

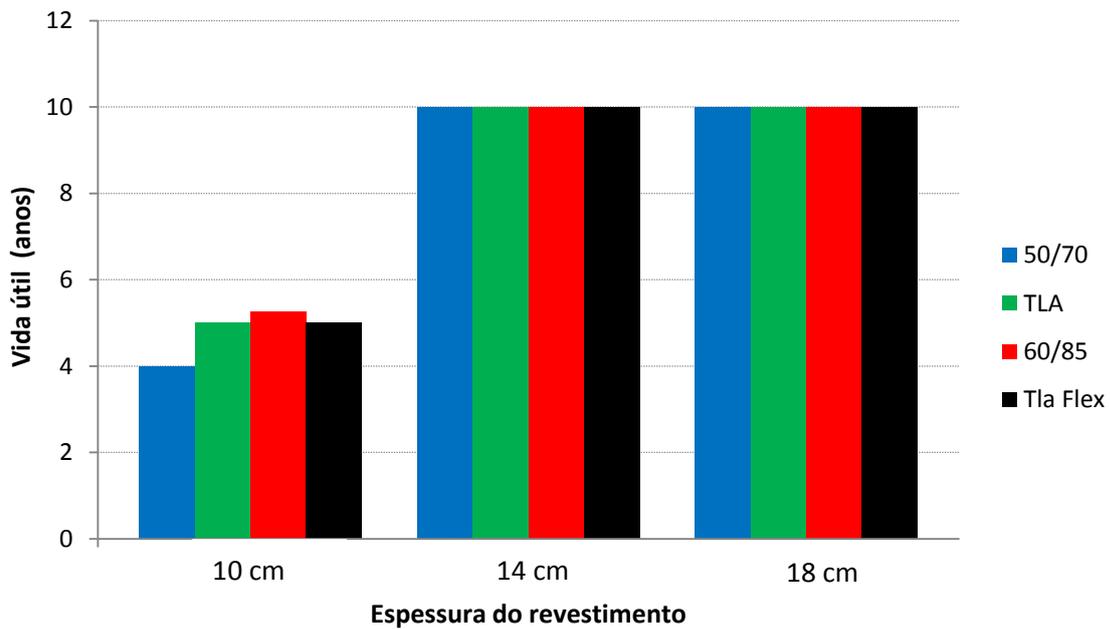


Figura 45: Resultados do Trincamento por Fadiga em função da durabilidade do revestimento em anos

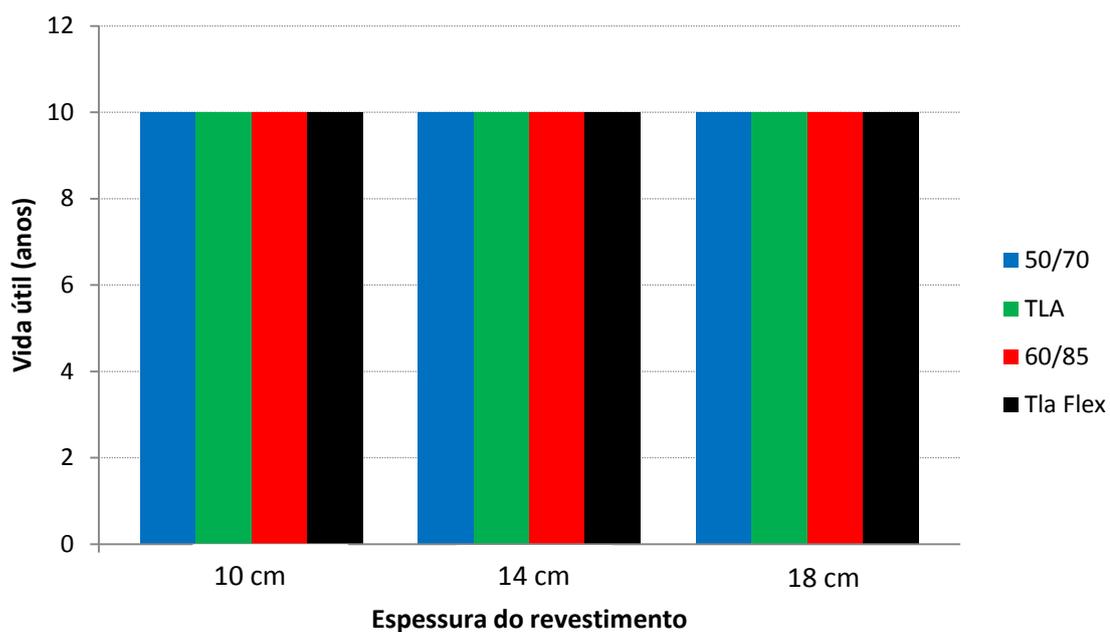


Figura 46: Resultados do Trincamento Térmico em função da durabilidade do revestimento em anos

Estes resultados demonstram o péssimo desempenho que as misturas com CAP 50/70, que é o ligante mais utilizado no país tiveram. No Brasil, a prática corrente utiliza na camada de revestimento a espessura de 12,5 cm e conforme observado nessas análises, na larga maioria dos casos, os melhores desempenhos foram obtidos com espessuras maiores que essa, comprovando assim a ineficácia de uma camada de revestimento mais esbelta.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões da pesquisa que teve como objetivo geral avaliar o comportamento de misturas asfálticas convencionais e modificadas através da realização de ensaios mecânicos para a avaliação do comportamento quanto à rigidez e resistência das misturas.

5.1 Conclusões

O estudo teve por característica a avaliação dos parâmetros de dosagem (volumétrico e de densificação), das propriedades mecânica das misturas (Resistência à Tração, Módulo de Resiliência, Módulo Dinâmico e relação E^*/MR) e análise de desempenho das misturas.

I. DOSAGEM

- Quanto aos teores de ligante de projeto, as misturas modificadas tiveram teores maiores, que o da mistura convencional 50/70.
- Misturas que continham o TLA na composição tiveram o mesmo teor de ligante.
- A diferença entre os teores de ligante nas misturas ficou em torno de 0,5%
- Quanto aos parâmetros de densificação:
 - a) Para o CDI, todas as misturas moldadas com o teor de ligante de projeto obtiveram valores que se enquadram na faixa de 50 a 100, garantindo misturas com boa compactabilidade.
 - b) Como nenhuma mistura conseguiu compactação de 98%, o TDI não pode ser calculado, sendo então utilizado o TDIm.
 - c) Para o TDIm, as misturas avaliadas conseguiram valores maiores que o mínimo aceitável que é 400, sendo que o valor mais elevado foi para as misturas com CAP 60/85 e TLA Flex com valores acima de 600.

II. PROPRIEDADES MECÂNICAS

- Para a Resistência à Tração:
 - a) Os maiores valores de RT encontrados foram para as misturas com TLA Flex e os menores valores para as misturas com CAP 50/70 em todas as temperaturas estudadas.
 - b) Existe uma queda nos valores de RT com os ligantes convencionais quando há aumento no volume de vazios, independente da temperatura de ensaio.
 - c) Nos ensaios a 10°C, a diferença entre os valores mais elevados e mais baixos foi de 30%, onde se presume que a diferença foi menor pela ação da temperatura.
 - d) Para os ensaios realizados a 25°C, os maiores valores encontrados foram para as misturas de TLA Flex e os menores para o CAP 50/70, com uma diferença de valores de 200%.
 - e) Através de análise estatística ficou comprovado que a temperatura é a variável mais relevante para o RT.

- Para o Módulo de Resiliência
 - a) Os maiores valores foram encontrados nas maiores frequências e com misturas menos rígidas, devido ao maior volume de vazios dessas misturas. Os valores mais elevados na frequência de 25 Hz são devidos as maiores deformações elásticas.
 - b) Para 10°C: os valores mais altos para misturas com CAP TLA com 4% de vazios.
 - c) Para 25°C: o valor mais elevado é para a mistura com TLA Flex com 5,5% de volume de vazios, para as demais misturas os valores mais elevados foram encontrados com 4% de volume de vazios.
 - d) Para 35°C: a mistura de TLA Flex teve os maiores valores e o CAP 50/70 os menores valores, sendo os valores de TLA Flex o dobro que os do 50/70 para mesma frequência.
 - e) A análise estatística comprovou que entre temperatura, frequência e volume de vazios, o fator de maior influência para os valores de MR é a temperatura.

- Módulo Dinâmico

- a) Nos ensaios a 4°C, os maiores valores encontrados foram para o CAP TLA e os menores para o 60/85, com uma diferença de valores entre ambos de 50%.
- b) Para o ensaio a 20°C, o comportamento continuou semelhante ao do ensaio a 4°C, com TLA com maiores valores e 60/85 com menores, mas a diferença cai pra 45%.
- c) No ensaio a 40°C as misturas de TLA Flex conseguem os maiores valores e os menores valores são para as misturas com CAP 50/70, diferença em torno de 50%.
- d) Os resultados mostram que à medida que se diminui a temperatura e aumenta a frequência, o módulo dinâmico se eleva.
- e) O ângulo de fase diminui à medida que se aumenta a frequência do carregamento, mantendo-se a temperatura constante.
- f) O ligante asfáltico exerce forte efeito na rigidez das misturas. Nas temperaturas intermediárias, por exemplo, a diferença chega a ser maior do que 70% entre amostras nos extremos de rigidez. A mistura menos rígida – 60/85, tem módulo dinâmico de aproximadamente 7350 MPa a 10 Hz e 20°C, enquanto que a mistura TLA – a mais rígida, tem módulo de 12632 MPa na mesma condição.

III. ANÁLISE DE DESEMPENHO

- Nível de análise 3
 - a) Valores determinados empiricamente a partir da informação do PG do ligante. É o nível menos confiável de análise e deve servir apenas como parâmetro de auxílio.
 - b) Considerando a duração do pavimento a uma vida de projeto de 10 anos, para este nível seriam adequados as misturas de TLA Flex e 60/85 com 18 cm de espessura de revestimento.

- Nível de análise 2
 - a) Este nível de análise de desempenho requer valores de características dos ligantes utilizados PG, G* e ângulo de fase, mas ainda permite o uso de correlações.

- b) Considerando a duração do pavimento a uma vida de projeto de 10 anos, para este nível é aceito as misturas de TLA e TLA Flex nas espessuras de 14 e 18 cm de revestimento.
- Nível de análise 1
 - a) Para este nível os cálculos são realizados a partir das informações do PG do ligante, G^* , ângulo de fase e módulo dinâmico das misturas, não existem correlações empíricas e os dados são os mais fiéis.
 - b) Quando comparamos o resultado da duração dos pavimentos em anos, a mistura com TLA Flex que duraria os 10 anos de projeto da rodovia.
 - c) Pode-se observar que a mistura com TLA quase atingiu os 10 anos de duração quanto ao critério de deformação permanente.

Por fim pode-se afirmar que as análises de MR e E^* possuem a mesma tendência. O uso do software *AASHTOWare*, corroborou com os resultados da análise mecânica, demonstrando que as misturas com TLA Flex tiveram melhor desempenho, principalmente se empregada numa camada de 18 cm de espessura. O software ainda indicou que os parâmetros mais críticos de ruptura de um pavimento são a deformação do revestimento e o trincamento de cima para baixo, parâmetros esses que foram satisfatórios apenas para a espessura de 18 cm, no nível de análise 2, que ainda utilizava correlações. A análise de desempenho deixou claro que uma maior espessura do revestimento garante a eficácia e vida útil do pavimento

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Em função das observações realizadas durante este trabalho sugere-se:

- Avaliar as características e o comportamento de diferentes agregados em misturas asfálticas com os ligantes estudados numa mesma faixa granulométrica de trabalho;
- Realizar ensaio de *Flow Number* para avaliar o comportamento das misturas asfálticas com relação a sua resistência a deformação permanente.

- Realizar ensaios de Módulo Dinâmico nestas novas misturas com agregados diferentes para conhecer e formar um banco de dados com valores de módulo complexo para materiais utilizados na pavimentação no estado do Rio Grande do Sul.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO, 2001, **Standard Specifications for SUPERPAVE Volumetric Mix Design**. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO MP2, Washington, D. C.

AASHTO, 2002, **Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt**. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO R 30, Washington, D. C.

AASHTO, 2005. **AASHTOWare Pavement ME Design**. Informativo Software. Disponível em: <http://www.aashtoware.org/Pavement/Pages/default.aspx>. Acessado em 27/07/2015.

AASHTO, 2005. **Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixtures Using Saturated Surface – Dry Specimens**. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 166, Washington, D. C.

AASHTO, 2005, **Determining Dynamic Modulus of Hot-mix Asphalt Concrete Mixtures**. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 311, Washington, D. C.

AASHTO, 2005. **Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures**. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 209, Washington, D. C .

ASPHALT INSTITUTE. **The asphalt handbook**. Manual Series, n. 4 (MS-4), College Park, 1956. P. 46-8

ASPHALT INSTITUTE. **SUPERPAVE: Level 1 Mix Design**. Superpave Series N° 2 (SP-2). Lexington, 1995.

ASTM, 1979, **Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures**. American Society for Testing and Materials, ASTM D 3497-79, USA.

ASTM, 1982, **Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures**. American Society for Testing and Materials, ASTM D 4123-82.

BAHIA, H.; FAHEEM, A. F., **Using the Superpave gyratory compactor to estimate rutting resistance of hot-mix asphalt**. In: Transportation Research Circular EC124 – Practical approaches to hot-mix asphalt mix design and production quality control testing, pp. 45-61, Washington, D. C., EUA, 2007.

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

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, Petrobras: ABEDA, 2008.

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

BALBO, J.T. **Pavimentação Asfáltica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

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

CNT, Confederação Nacional dos Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2012**. Disponível em:

<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Documents/Arquivos%202012/resumo_pd_2410.pdf>.

Acesso em: 29 de abr. 2013.

CORBETT, L. W. e PETROVSKI U., **Research & Development** v. 17, p. 342, 1978.

COSTA, C.; NOGUEIRA, L.; GIOIA, J.; 2008, **Mistura asfáltica com o uso do modificador TLA (Trinidad Lake Asphalt)**. In: 39ª Reunião Anual de Pavimentação - RAPv e 13º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária - ENACOR, Recife, Pernambuco, Brasil, 16 a 19 de setembro. 2008.

DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. **Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero**. DNER – ES 385/1999. Rio de Janeiro, 1999, 15p.

DI BENEDETTO, H.; PARTL, M. N.; FRANCKEN L.; DE LA ROCHE, C. **Stiffnes testing for bituminous mixtures**. Materials and Structures/Matériaux et Constructions, v. 34, p.66-70, 2001.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Pavimentos Flexíveis: Concreto Asfáltico: Especificação de Serviço**. DNIT 031/2006 - ES. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Pavimentação Flexível - Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material**. DNIT 095/2006 - EM. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Pavimentação Flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de material**. DNIT 111/2009 - EM. Rio de Janeiro, 2009.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio**. DNIT 135/2010-ME. Rio de Janeiro/RJ: IPR/DNER, 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio**. DNIT 136/2010-ME. Rio de Janeiro/RJ: IPR/DNER, 2010.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto-borracha, via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de serviço.** . DNIT 112/2011 - ES. Rio de Janeiro, 2011.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material.** DNIT 129/2011 - EM. Rio de Janeiro, 2011.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Cimento asfáltico de petróleo modificado por asfalto natural do tipo TLA (Trinidad Lake Asphalt)– Especificação de serviço.** DNIT 168/2013 - ES. Rio de Janeiro, 2013.

Departamento Nacional de Trânsito (Brasil). **Frota.** Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>. Acesso em: 29 abr. 2013.

LASTRAN (Laboratório de Sistemas de Transporte, do Departamento de Engenharia de Produção e Transportes da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul). **A Influência do Tráfego de Composição de Veículos de Carga – CVC's sobre os Pavimentos das Rodovias do Rio Grande do Sul.** Relatório, v.1. DAER (Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem). 2003.

LEITE, F.L.M.; MOTTA, L.M.G.; CONSTANTINO, R.S.; TONIAL, I.A. **Curso sobre o programa SHRP: Aplicação a ligantes, agregados e misturas betuminosas.** Instituto Brasileiro de Petróleo. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

LEITE, L.F.M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros.** 1999. 266 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LOPES, M. M., LINHARES, M., VASCONCELOS, K. L., BERNUCCI, L. L. .B. **Estudo do processo de densificação e da deformação permanente de misturas asfálticas.** Rio de Janeiro, 2010.

LUCENA, M.C.C. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros**. 2005, 163 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2005.

MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. **Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures**. Wisconsin highway research program 0092-01-02 , Madison, Wisconsin, EUA, 2004.

MANO, E. B. e MENDES L. C. **Introdução à Polímeros**. Editora Edgard Blücher Ltda, 2001.

MARQUES, G. L. O.; Leite, L. M.; MOTTA, L. M. G., *et al*, 2001-b, “**Estudos de dosagem de misturas betuminosas Superpave versus métodos tradicionais**“. In: *11º Congresso Del Asfalto*, Lima, Peru. 2001.

MARQUES, G.L.O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; Efeito da compactação por impacto e giratória**. Tese (Doutorado). 2004, 461 p. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004.

MATTOS, J.R.G.; **Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS – A implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul**. 2014. 250f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MEDINA, J. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1997, 380 p.

MEDINA, J.; MOTTA, L.G. **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: 2ª Edição, 2005.

MOTTA, L. M. G. “**Contribuição para a Estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas**“. In: *14º Encontro de Asfalto*, Instituto Brasileiro do Petróleo. Rio de Janeiro, 1998.

NASCIMENTO, L.A. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente.** Rio de Janeiro, 2008, 204 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NÚÑEZ, Washington Peres et al. **Produzindo Misturas Asfálticas de Elevado Desempenho com Emprego de Cal Hidratada.** In: 38a REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - 12º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA - 38a RAPv / 12º ENACOR, 2007, Manaus-AM. Anais. 2007.

PELISSON, Nayara Donelli; *et. al.* **Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis.** The Journal of Transport Literature. 20-24, 2015.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D-Y; KENNEDY, T.W. **Hot mix asphalt materials, mixture, design and construction.** 2 ed. Laham: Napa Education Foundation, 1996.

ROHDE, L. **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos.** 2007. 250 F. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SENÇO, Wlastermir de. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** Volume 2, Ed. Pini, São Paulo, 2001.

SHELL. **The Shell bitumen handbook.** 5. ed. Cambridge, 2003.

SHRP, **Strategic Highway Research Program A-410, Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The Product of SHRP Asphalt Research Program.** 1National Research Council. Washington, DC. 1994.

SPECHT, Luciano Pivoto. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus.** 2004. 279f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

THEISEN, K. M.; **Estudo de parâmetros constitutivos extraídos de dados experimentais no comportamento de misturas asfálticas.** 2011. 312f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

VALKERING, C.P.; LANCON, D.J.L.; HILSTER, E.D.; STOKER, D.A. 1990, **Rutting resistance of asphalt mixes containing non-conventional and polymer modified binders.** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 59, p. 590-609.

YEN T. F., **Asphaltene/Resin plus oil interconversion: an investigation into colloidal modelo f asphaltenes** – Proceedings of Workshop – The chemical components and structure of asphaltic materials. 1991. Rome.

WITCZAK, M. W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T. et al. **Simple performance test for Superpave mix design.** National Cooperative Highway Research Program – NCHRP Report 465, Washington, D. C., EUA. 2002.