



# RELATÓRIO DE PESQUISA RDT - CONCEPA / ANTT

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES  
VISCOELÁSTICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
QUENTES E MORNAS

JUNHO | 2017

RELATÓRIO FINAL DE PESQUISA - CONCEPA/ANTT

**ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES VISCOELÁSTICAS DE  
MISTURAS ASFÁLTICAS QUENTES E MORNAS**



**PROJETO DE PESQUISA:**

ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES VISCOELÁSTICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS QUENTES E MORNAS

**UNIDADE PROPONENTE:**

LABORATÓRIO DE PAVIMENTAÇÃO – LAPAV/UFRGS  
FUNDAÇÃO LUIZ ENGLERT

**COORDENADORES DO PROJETO:**

PROF. WASHINGTON PÉRES NÚÑEZ  
PROF. DSc. JORGE AUGUSTO PEREIRA CERATTI

**EQUIPE EXECUTORA:**

Dr. LÉLIO ANTÔNIO TEIXEIRA BRITO  
Dra MARLOVA GRAZZIOTIN JOHNSTON  
ENG<sup>a</sup> MSc NATÁLIA MENSCH

**EQUIPE DE APOIO:**

ENG<sup>a</sup> Esp. KELI MALLMANN (CONCEPA)  
ENG<sup>o</sup> EDUARDO MEIRELLES (CONCEPA)  
ENG<sup>o</sup> FELIPE LUZZI (CONCEPA)  
ENG. MSc. FÁBIO HIRSCH (CONCEPA)  
ENG. MSc. THIAGO VITORELLO (CONCEPA)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA .....	11
1.2. OBJETIVO GERAL .....	12
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
2.1. VISCOELASTICIDADE EM MATERIAIS ASFÁLTICOS .....	14
2.2. MÓDULO COMPLEXO .....	18
2.2.1. Conceptualização .....	19
2.2.2. Normatização do ensaio de módulo dinâmico .....	22
2.2.3. Análise dos dados do ensaio de módulo dinâmico .....	26
2.3. MISTURAS MORNAS .....	31
2.3.1. Aditivo surfactante .....	34
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
3.1. EQUIPAMENTO UTILIZADO .....	36
3.1.1. Sensores de deslocamento .....	37
3.2. MATERIAIS .....	39
3.2.1. Agregados minerais .....	39
3.2.2. Cimentos asfálticos de petróleo .....	41
3.2.3. Aditivo surfactante .....	42
3.3. MÉTODOS .....	43
3.3.1. Temperaturas de mistura e compactação .....	43
3.3.2. Composição granulométrica .....	43
3.3.3. Dosagem Marshall .....	43
3.3.4. Resistência a tração por compressão diametral .....	44
3.3.5. Módulo de resiliência .....	46
3.3.6. Ensaio de módulo dinâmico .....	47
<b>4. RESULTADOS E ANÁLISES PARA AS MISTURAS QUENTE E MORNAS .....</b>	<b>55</b>
4.1. TEMPERATURAS DE MISTURA E COMPACTAÇÃO .....	55
4.2. LIGANTES ASFÁLTICOS .....	55
4.3. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA .....	56

<b>4.4. DOSAGEM MARSHALL .....</b>	56
<b>4.5. RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....</b>	58
<b>4.6. MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....</b>	59
<b>4.7. ENSAIO DE MÓDULO DINÂMICO.....</b>	59
<b>4.7.1. Propriedades volumétricas das amostras .....</b>	59
<b>4.7.2. Módulo dinâmico e ângulo de fase .....</b>	60
<b>5. RESULTADOS E ANÁLISES ADICIONAIS.....</b>	70
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	75
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	78

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma das misturas asfálticas utilizadas na pesquisa .....	12
Figura 2: Fluxograma de ensaios para a pesquisa .....	13
Figura 3: Fenômeno da fluênci a de um material viscoelástico .....	14
Figura 4: Fenômeno da relaxação de um material viscoelástico .....	14
Figura 5: Comportamento típico de materiais viscoelásticos sob cargas senoidais.....	15
Figura 6: Reposta de um material viscoelástico sob tensão controlada .....	15
Figura 7: Domínio típico do comportamento observado em misturas asfálticas.....	16
Figura 8: Elementos físico-matemáticos .....	16
Figura 9: Líquido de Maxwell.....	17
Figura 10: Sólido de Kelvin.....	17
Figura 11: Curva de fluênci a e recuperação dos elementos de Maxwell e Kevin .....	17
Figura 12: Carregamento senoidal .....	19
Figura 13: Representação esquemática do módulo complexo no plano complexo.....	21
Figura 14: Obtenção dos parâmetros para curva mestra. ....	28
Figura 15: Translação gráfica das curvas isotérmicas .....	29
Figura 16: Curva do Espaço de Black.....	30
Figura 17: Representação do módulo complexo no plano cole-cole.....	31
Figura 18: Classificação do asfalto pela temperatura de mistura .....	33
Figura 19: Curva mestra das misturas asfálticas preparadas em laboratório.....	34
Figura 20: Curvas mestras do módulo dinâmico, St. Louis, Missouri .....	35
Figura 21: Componentes do equipamento .....	38
Figura 22: Sensores de deslocamento.....	38
Figura 23: Curva granulométrica dos agregados basálticos .....	40
Figura 24: Curva granulométrica dos agregados graníticos .....	41
Figura 25: Procedimento de adição do aditivo surfactante. ....	42
Figura 26: Compactador Marshall .....	44
Figura 27: Esquema de carregamento e plano de ruptura típica no ensaio de RT .....	45
Figura 28: Prensa para ensaio de RT .....	45

Figura 29: Equipamento para ensaio de MR.....	46
Figura 30: Compactador giratório Superpave .....	48
Figura 31: Condicionamento do corpo de prova .....	50
Figura 32: Amostra instalada.....	51
Figura 33: Sinal de força e deslocamento antes do ajuste PID .....	52
Figura 34: Sinal de força e erro da força após do ajuste PID .....	52
Figura 35: Espaço de Black comparativo para as duas metodologias de análise .....	53
Figura 36: Plano Cole-Cole para as duas metodologias de análise .....	53
Figura 37: FaixaS granulométricaS.....	56
Figura 38: Resultados da dosagem da Composição 1 .....	57
Figura 39: Resistência à tração por compressão diametral das misturas no teor de projeto .....	58
Figura 40: Módulo de resiliência das misturas no teor de projeto .....	59
Figura 41: Espaço de Black para as misturas da composição 1 .....	61
Figura 42: Espaço de Black para as misturas da composição 2 .....	61
Figura 43: Espaço de Black para todas as misturas .....	62
Figura 44: Plano Cole-cole para as misturas da composição 1 .....	63
Figura 45: Plano Cole-cole para as misturas da composição 2.....	63
Figura 46: Plano Cole-cole para as todas as misturas .....	64
Figura 47: Curva mestra para todas as misturas .....	65
Figura 48: Curva mestra para todas as misturas nas altas frequências .....	65
Figura 49: Curva mestra para todas as misturas nas médias frequências .....	66
Figura 50: Curva mestra para todas as misturas nas baixas frequências .....	66
Figura 51: Curva mestra do ângulo de fase para todas as misturas .....	67
Figura 52: Inferência a fadiga para todas as misturas na temperatura de 20°C .....	68
Figura 53: Inferência a deformação permanente para todas as misturas na temperatura de 54°C .....	68
Figura 54: Resistência à tração por compressão diametral das misturas .....	70
Figura 55: Módulo de resiliência das misturas no teor de projeto .....	71
Figura 56: Espaço de Black.....	71
Figura 57: Plano Cole-Cole .....	72
Figura 58: Curva mestra do módulo dinâmico .....	72

Figura 59: Curva mestra do ângulo de fase .....	73
Figura 60: Inferência a fadiga na temperatura de 20°C .....	73
Figura 61: Inferência a deformação permanente na temperatura de 54°C .....	74

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Comparativo entre as normas para o ensaio de módulo complexo.....	23
Tabela 2: Tempo de equilíbrio recomendado. ....	24
Tabela 3: Níveis de tensão típicos. ....	25
Tabela 4: Número de ciclos para a sequência de ensaios. ....	25
Tabela 6: Propriedades dos agregados .....	39
Tabela 6: Valores médios das análises granulométricas do agregado basáltico .....	40
Tabela 7: Valores médios das análises granulométricas do agregado granítico.....	41
Tabela 8: Normativas utilizadas na determinação das propriedades dos cimentos asfálticos .....	42
Tabela 9: Calibração da estufa em Dezembro de 2016.....	50
Tabela 10: Temperatura do agregado, ligante e compactação .....	55
Tabela 11: Propriedades dos cimentos asfálticos.....	55
Tabela 12: Porcentagem de agregado em cada mistura .....	56
Tabela 13: Resultados da dosagem da composição 1 .....	58
Tabela 14: Propriedades volumétricas das amostras .....	60
Tabela 15: Propriedades volumétricas das amostras .....	70

## 1. INTRODUÇÃO

No cenário atual brasileiro as rodovias são de suma importância para a economia nacional, pois é o principal responsável por movimentar a cadeia produtiva do nacional, além de facilitar o escoamento das produções tanto da pecuária, agricultura, indústria de bens e serviços, entre outros. Apesar disto, as rodovias brasileiras são em sua grande maioria de baixo conforto ao rolamento, conforme pesquisas recorrentes da Confederação Nacional de Transportes (CNT).

O pavimento é formado por um sistema de multicamadas de espessuras finitas, que tem como função resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, bem como, proporcionar condições adequadas de trafegabilidade aos seus usuários. O revestimento asfáltico é formado por uma mistura de ligante asfáltico e agregados, e tem como objetivo resistir diretamente à ação do tráfego e de transferir o carregamento de forma atenuada as camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de conforto e segurança.

Com a crescente preocupação ambiental o setor rodoviário observou a necessidade de atividades que visem diminuir a temperatura de usinagem e compactação das misturas asfálticas, de forma que haja a redução de emissões de poluentes e de consumo energético. Por estes motivos surgiram as misturas asfálticas mornas (ou, *warm mix asphalt* - WMA), cuja compactação é realizada com redução de temperatura da ordem de 30°C ou mais em relação às misturas quentes. Desta maneira, com o uso de misturas mornas visa-se ter comportamento similar ou superior ao das misturas a quente, sem poluir e com redução do consumo energético (Klinsky et al., 2014).

O aditivo químico do tipo surfactante possui tecnologia específica para misturas asfálticas mornas sem adição de água. Este aditivo permite reduzir a temperatura de mistura e de compactação das misturas asfálticas convencionais de 10°C até 30°C e é especialmente formulado pelos fabricantes para ser compatível com ligantes asfálticos convencionais e modificados por polímero ou pó de borracha de pneu.

A resistência é um importante parâmetro de dimensionamento dos pavimentos. Estudar a resistência das misturas asfálticas é um desafio baseado na dependência do clima (temperatura) e do tráfego (frequência de carregamento). Para caracterização de uma mistura asfáltica com características parte elástica e parte viscosa é necessária uma análise em diferentes frequências e temperaturas que sejam representativas das condições encontradas em campo.

O material viscoelástico apresenta maior rigidez para carregamentos com menor duração de aplicação de pulso de carga e menor rigidez para carregamentos dinâmicos com maior duração, sendo a duração do pulso relacionada com a velocidade dos veículos. A temperatura possui uma grande influência na rigidez da mistura asfáltica, sendo que com o aumento da temperatura a rigidez diminui.

O dimensionamento dos pavimentos é baseado no estado de tensão e deformações aplicadas no pavimento pelo tráfego, para se obter um parâmetro de transformação entre ambos é necessário o conhecimento do módulo das camadas do pavimento. Atualmente no Brasil a prática normatizada é a obtenção do módulo de misturas asfálticas através do ensaio de módulo de resiliência (DNER-ME

135/10 e NBR 16018/11), sendo este um módulo elástico que contabiliza as deformações recuperáveis. Este ensaio é realizado aplicando-se carga em um corpo de prova circular de modo que o mesmo gera uma tensão de tração transversal ao plano de aplicação da carga. As medidas de deformações recuperáveis são realizadas diametralmente na direção horizontal. O ensaio deve ser realizado na frequência de 1 Hz, caso não haja especificação da temperatura a norma recomenda a utilização de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

O módulo complexo pode ser usado para determinar as propriedades elásticas bem como as propriedades viscoelásticas do material. O ensaio consiste em realizar uma varredura dos valores de módulo dinâmico e ângulo de fase determinado em diferentes temperaturas e frequências.

O módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) é o valor absoluto do módulo complexo, sendo este a relação entre as amplitudes de tensão e deformação. O módulo dinâmico visa contabilizar os efeitos da variação de temperatura e frequência. O mesmo pode ser obtido por meio de um carregamento senoidal uniaxial de compressão em corpos de prova cilíndricos (ASTM D 3497/79 e AASHTO T 342/11). O mesmo é largamente utilizado no exterior no dimensionamento de pavimentos, sendo o mesmo utilizado como parâmetro para cálculo de tensões e deformações no método *2002 Desing guide for new and rehabilitated pavements da American Association of State Highway Transportation Officials (AASTHO)*.

O ângulo de fase, é um indicador das propriedades viscosa do material. Para um material puramente viscoso seu ângulo de fase é de  $90^{\circ}$  e para um material puramente elástico o ângulo de fase é de  $0^{\circ}$ .

### **1.1. RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA**

O modal rodoviário possui grande importância para a economia nacional. A maioria das rodovias com médio e alto volume de tráfego são pavimentadas com revestimento asfáltico. Diante disso a qualidade dos revestimentos asfálticos é de suma importância para a economia e para a sociedade brasileira.

O método atual de dimensionamento do pavimento no Brasil realiza uma previsão de comportamento elástica linear. Sobre tudo, sabe-se que o comportamento das misturas asfálticas é bem mais complexo, contando com parcelas viscosas e elásticas. A evolução do conhecimento do comportamento das misturas asfálticas em outros países já conta com análises viscoelásticas, e no Brasil esta vertente de pesquisa vem se fixando no ambiente acadêmico com rápida aplicação nas obras do âmbito privado, a exemplo das concessionárias rodoviárias.

As misturas mornas se apresentam como uma solução de redução de emissão de poluentes e do consumo enérgico durante o processo de produção da mistura asfáltica. O estudo de suas propriedades viscoelásticas é importante para uma melhor compreensão do comportamento mecânico e performance do pavimento. Outros estudos com misturas mornas já foram realizados no Brasil, porém com relação a modificação do ligante asfáltico nas misturas mornas ainda há poucos estudos.

Este trabalho visa, com isto, avançar no conhecimento da determinação de propriedades viscoelástica, através do ensaio de módulo dinâmico, realizado em uma prensa de ensaio universal servo-hidráulica para obtenção dos parâmetros das curvas mestres de caracterização de duas misturas: uma quente e

outra morna. Será possível com isto, ampliar o debate do comportamento esperado destas misturas em função do seu desempenho funcional com base em análises racionais dos resultados.

## 1.2. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é caracterizar as propriedades viscoelásticas de pelo menos duas misturas asfálticas quentes e mornas comumente utilizadas no Rio Grande do Sul, usando um aditivo surfactante para as misturas mornas. Serão realizados ensaios de módulo complexo, em adição a ensaios convencionais para as misturas asfálticas apresentadas na Figura 1, conforme ensaios do organograma da Figura 2.

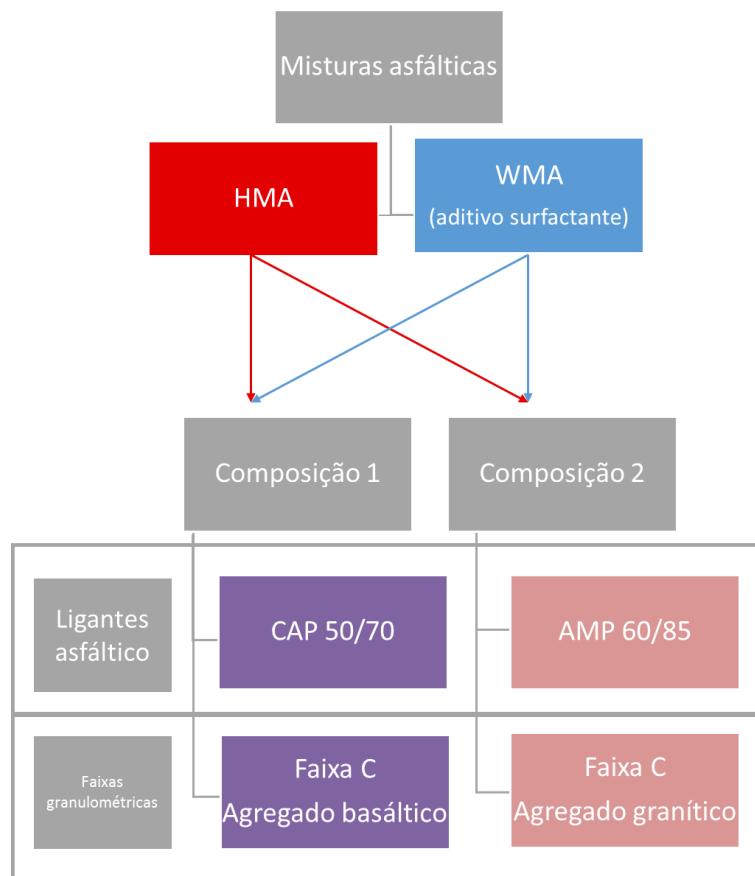


Figura 1: Fluxograma das misturas asfálticas utilizadas na pesquisa

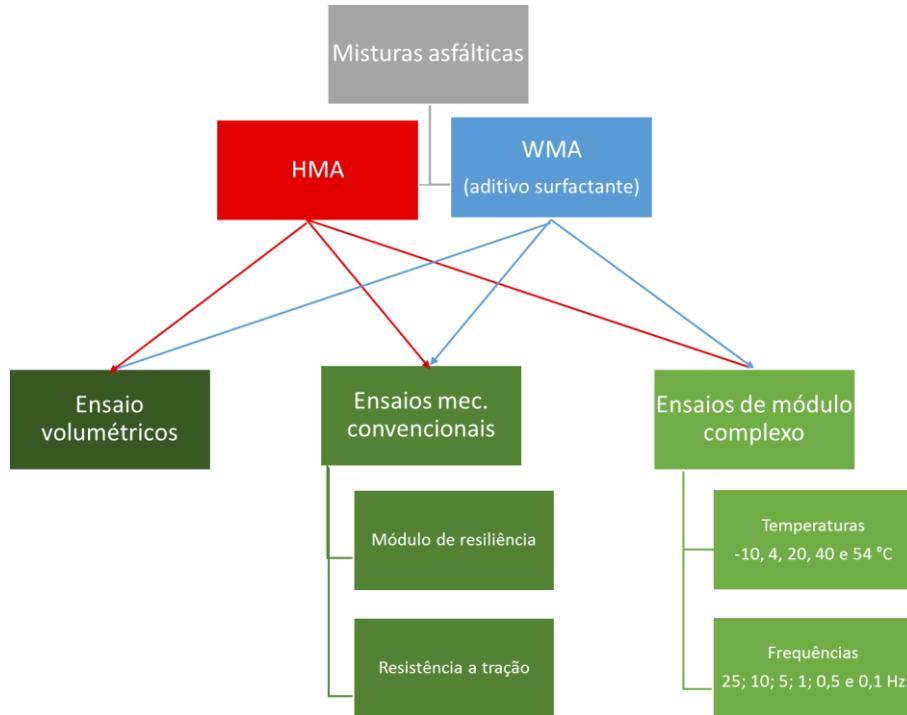


Figura 2: Fluxograma de ensaios para a pesquisa

### 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos propostos para esta pesquisa são:

1. Realizar uma breve revisão bibliográfica sobre os ensaios de módulo complexo.
2. Realizar uma breve revisão bibliográfica sobre as misturas mornas no Brasil.
3. Escolher metodologia adequada para a realização do ensaio de módulo complexo, tendo em vista diferentes normativas.
4. Realizar a dosagem de uma mistura asfáltica densa convencional e paralelamente fazer o uso do aditivo surfactante para composição de uma segunda mistura com as mesmas características, porém tipo morna.
5. Obter os parâmetros mecânicos convencionais como módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral de ambas misturas.
6. Realizar ensaios de módulo dinâmico em pelo menos três diferentes temperaturas em ambas as misturas.
7. Determinar o módulo dinâmico e o ângulo de fase das misturas ensaiadas.
8. Analisar os dados produzindo como respostas: curva mestra do módulo dinâmico; curva mestra do ângulo de fase; espaço de Black; plano Cole-Cole.
9. Realizar a análise de inferência a fadiga e deformação permanente.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados assuntos relevantes sobre o tema da pesquisa. É apresentado um assunto chave para o desenvolvimento desta pesquisa, que é a viscoelasticidade. São apresentados conceitos básicos utilizados para a caracterização de qualquer material viscoelástico, bem como, modelos bases utilizados na previsão do comportamento viscoelástico de misturas asfálticas.

Posteriormente é apresentado um item sobre módulo dinâmico, onde é dissertado sobre os conceitos envolvidos no ensaio, normativas e práticas de execução do ensaio, fatores relevantes no desenvolvimento do ensaio e análise de dados pertinente ao módulo dinâmico e ângulo de fase.

Por último o item de misturas mornas traz um resumo dos conceitos e importâncias dessa prática.

### 2.1. VISCOELASTICIDADE EM MATERIAIS ASFÁLTICOS

Os materiais asfálticos apresentam um comportamento mecânico dependente do tempo. Em outras palavras, eles exibem características tanto viscosas quanto elásticas quando submetido a pequenas deformações. O comportamento dependente do tempo de materiais asfálticos é manifestado através da fluência e relaxamento. Esses fenômenos são comuns a todos os materiais dependentes do tempo. Enquanto o termo fluência, também conhecido como *creep*, representa um aumento da deformação com o tempo sob uma carga constante (Figura 3), o relaxamento é a diminuição da tensão com o tempo, sob uma deformação constante (Figura 4) (Dongmo-Engeland, 2005; Jung, 2006 e Woldekiran, 2011 *apud* Melo, 2014).

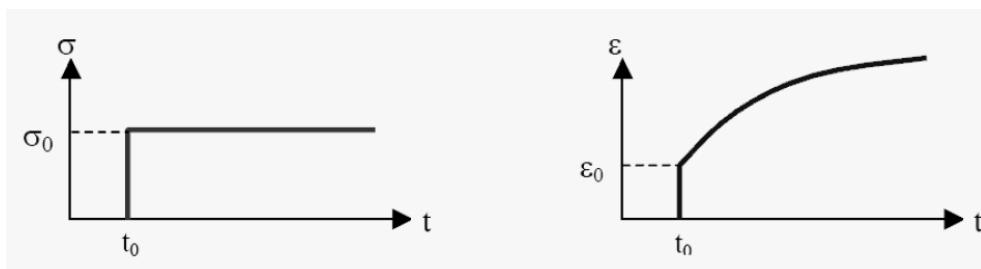


Figura 3: Fenômeno da fluência de um material viscoelástico

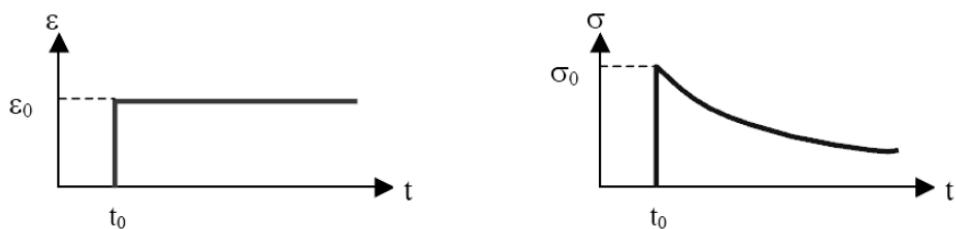


Figura 4: Fenômeno da relaxação de um material viscoelástico

Outra propriedade dos materiais viscoelásticos lineares é a defasagem de pico. Quando um material viscoelástico linear é submetido a uma carga senoidal, a resposta do material também será senoidal, porém com pico de deformação defasado com relação ao pico de tensão por um período de tempo,

conforme Figura 5. A relação entre essa defasagem e a frequência de carregamento é conhecido como ângulo de fase.

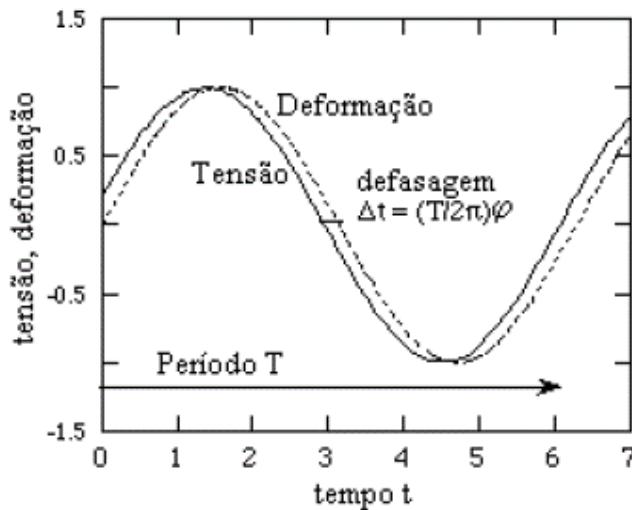


Figura 5: Comportamento típico de materiais viscoelásticos sob cargas senoidais.

FONTE: Theisen (2011)

Segundo Vinson e Hilton (2006), um material viscoelástico é definido como um material que não armazena totalmente a energia externa fornecida em forma de energia potencial interna (caso dos materiais elásticos), nem dissipava toda a energia fornecida (caso dos fluidos viscosos). Um material viscoelástico é um patamar intermediário entre um sólido elástico e um fluído viscoso, armazenando parcialmente a energia externa fornecida ou dissipando parcialmente a mesma, fazendo tais materiais terem um comportamento intermediário entre um sólido e um fluído (Theisen, 2011).

Quando um material viscoelástico é submetido a uma tensão constante ( $\sigma_0$ ), uma resposta instantânea da deformação ( $\varepsilon_0$ ) é observada (Figura 6). Em seguida é verificado um aumento contínuo da deformação. Logo, se a carga for mantida durante um período mais longo, é observado que a deformação aumenta linearmente com o tempo. Quando a carga é removida ocorre uma recuperação instantânea elástica seguida de uma recuperação tardia. A deformação não recuperável é chamada de viscosa (Olard, 2003 e Woldekiran, 2011 *apud* Melo, 2014).

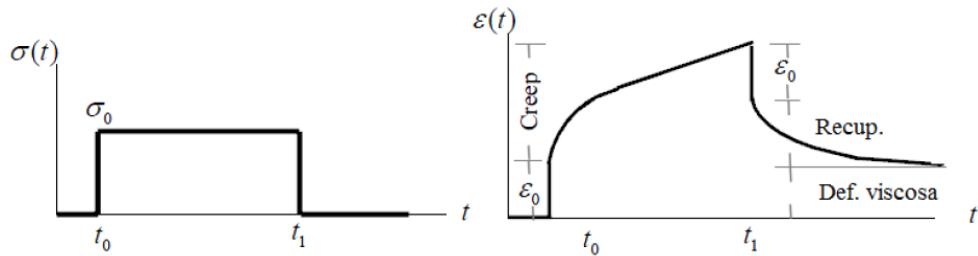


Figura 6: Resposta de um material viscoelástico sob tensão controlada

A Figura 7 apresenta o comportamento dos concretos asfálticos com diferentes níveis de solicitação de deformação ( $\epsilon$ ) e números de ciclos (N). É possível observar que carregamentos caracterizados por uma centena de ciclos e por deformações pequenas, o comportamento observado é viscoelástico linear.

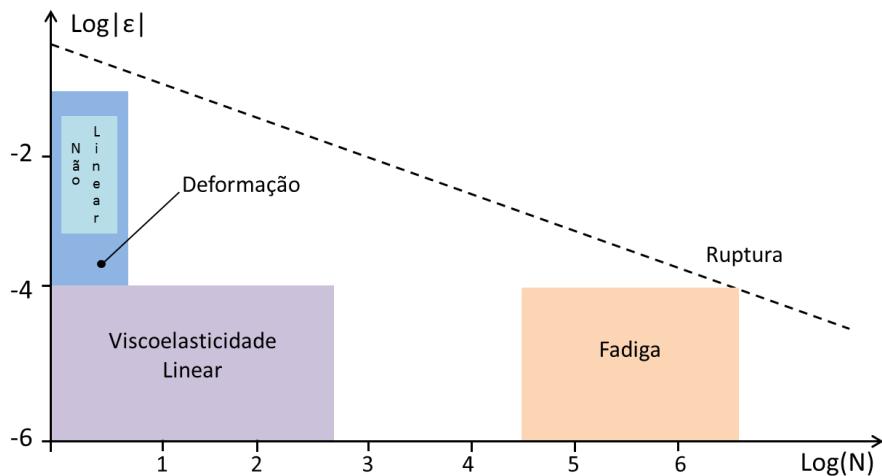


Figura 7: Domínio típico do comportamento observado em misturas asfálticas.

FONTE: Adaptado de Di Benedetto *et al.* (2001)

Os modelos físico-matemáticos para materiais viscoelásticos são a mola ou elemento de Hooke (representa a parcela elástica) e o amortecedor ou elemento de Newton (representa a parcela viscosa). Na Figura 8 estão apresentados os elementos mola e amortecedor, onde  $\sigma$  é uma tensão normal aplicada.

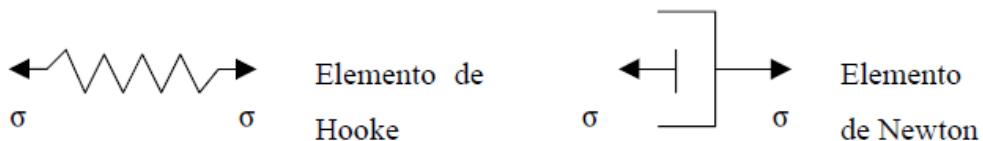
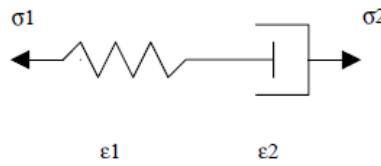


Figura 8: Elementos físico-matemáticos

Associando estes elementos em série ou paralelo é possível criar modelos mais complexos, que visam reproduzir a dependência da deformação em relação ao tempo. Cada um deles visa reproduzir propriedades como, fluênci, relação, elasticidade, escoamento, entre outros. Segundo Monteiro (1984) *apud* Amaral (2000), um elemento de Hooke e um elemento de Newton, associados em série constituem o líquido de Maxwell ou elemento de Maxwell (Figura 9), criado para explicar a elasticidade dos líquidos. Também é possível associar em série de n elementos de Maxwell, formando o chamado modelo generalizado de Maxwell.



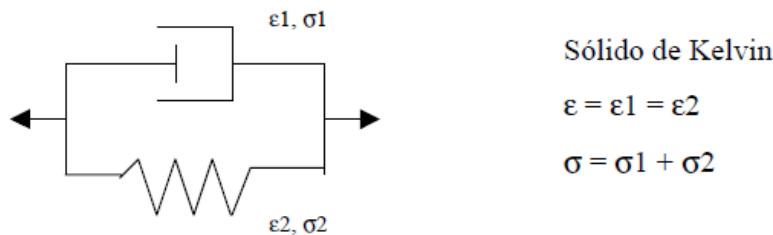
Líquido de Maxwell

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$$

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2$$

Figura 9: Líquido de Maxwell

Já o mesmo autor relata como uma associação em paralelo produz o sólido de Kelvin ou elemento de Kelvin (Figura 10), criado para explicar o fenômeno do amortecimento das oscilações devido ao chamado atrito interno nos sólidos. Assim como no elemento de Maxwell também é possível associar em série de n elementos de Kelvin, formando o modelo generalizado de Kelvin.



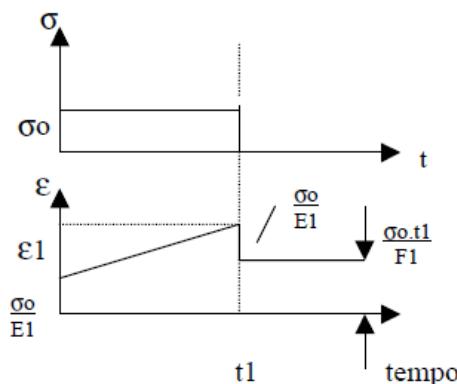
Sólido de Kelvin

$$\epsilon = \epsilon_1 = \epsilon_2$$

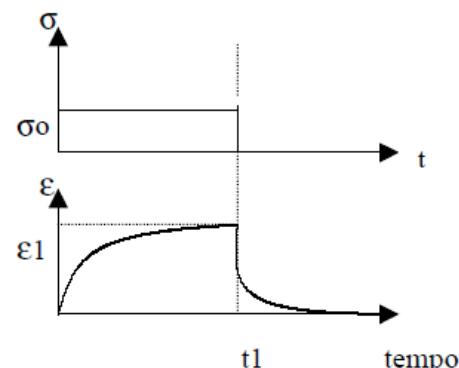
$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2$$

Figura 10: Sólido de Kelvin

A Figura 11 apresenta as curvas de fluência e de recuperação do elemento de Maxwell e do elemento de Kelvin, onde  $E$  é o módulo de elasticidade e  $F$  é o coeficiente de viscosidade.



Líquido de Maxwell



Sólido de Kelvin

Figura 11: Curva de fluência e recuperação dos elementos de Maxwell e Kevin

Segundo Theisen (2004) e outros autores citados pelo mesmo (Barbosa, 1976; Gilson *et al.*, 2003; Abbas, 2004; Sousa, 2005), o modelo generalizado de Kelvin é o mais adequado para descrição da resposta de deformação de materiais viscoelásticos quando são submetidos a tensões, devido a resposta se assemelhar ao comportamento de fluência observado experimentalmente nesses materiais. Segundo o mesmo autor, algumas pesquisas têm caracterizado misturas asfálticas ou o mastique como uma série de elementos de Kelvin e/ou Maxwell ligados em série e/ou paralelo.

## 2.2. MÓDULO COMPLEXO

O módulo complexo para misturas asfálticas não é um conceito novo. Em 1962, Papazian foi um dos primeiros a descrever ensaios viscoelásticos realizados em misturas asfálticas. Ele aplicou uma tensão senoidal a uma amostra cilíndrica em uma determinada frequência, e realizou medições da deformação na mesma frequência. Os testes foram realizados sob condições controladas de temperaturas em diferentes amplitudes de carga e frequência. Ele conclui que os conceitos de viscoelasticidade podem ser aplicados para dimensionamento e previsão de performance dos pavimentos (Clyne *et al.*, 2003).

O Programa Nacional de Pesquisa Rodoviária Cooperativa (em inglês *National Cooperative Highway Research Program*, sigla NCHRP) no projeto 1-37<sup>a</sup> (Desenvolvimento do Guia de 2002 para projeto de novos e reabilitação de estruturas pavimentadas: Parte II) é o responsável pelo desenvolvimento do Guia de AASHTO 2002 para a projeto de estruturas de pavimentos. Este guia recomenda a utilização do módulo dinâmico como um parâmetro de rigidez no processo de dimensionamento mecanístico.

Witczak e Fonseca propuseram um modelo empírico para prever o módulo complexo de uma mistura asfáltica. O modelo foi gerado a partir de uma base de dados que consiste em 1429 pontos de 149 misturas a partir das curvas mestras das mesmas. Posteriormente o modelo passou por algumas recalibrações com novos dados de ensaios, ficando conforme Equação 1.

$$\begin{aligned}
 \log |E^*| = & -1,249937 + 0,029293(p_{200}) - 0,001767(p_{200})^2 - 0,002841(p_4) \\
 & - 0,058097(V_v) - 0,0802208 \times \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_v} \\
 & + \frac{3,871977 - 0,0021 \times p_4 + 0,003958 \times p_{38} - 0,000017(p_{38})^2 + 0,005470p_{34}}{1 + e^{(-0,603313 - 0,313351\log(f) - 0,393532\log(\eta))}}
 \end{aligned} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$p_{200}$  = porcentagem passante na peneira nº 200;

$p_4$  = porcentagem passante na peneira nº 4;

$p_{34}$  = porcentagem passante na peneira 3/4";

$p_{38}$  = porcentagem passante na peneira 3/8";

$f$  = frequência de carregamento;

$V_{b\text{eff}}$  = porcentagem de ligante em volume efetivo;

$V_v$  = volume de vazios;

$\eta$  = viscosidade em  $10^6$  poise;

$|E^*|$  = módulo dinâmico em psi.

Uma das principais vantagens dessa equação é a possibilidade de prever o valor do módulo dinâmico em situações extremas, ou seja, em temperaturas muito altas ou muito baixas. Essa capacidade está ligada ao formato sigmoidal da formulação (Mello, 2008).

No estudo de Clyne *et al.* (2003) foram analisadas misturas asfálticas do banco de dados Departamento de Transportes de Minnesota (*Minnesota Department of Transportation - Mn/DOT*) através de resultados reais de módulos complexos e dos obtidos pela Equação 1. Foi possível observar que para algumas misturas o ajuste de dados foi relativamente bem-sucedido para as temperaturas intermediárias e baixas, já nas temperaturas altas os resultados obtidos pelas equações de previsões tendem a se afastar dos dados do teste. Já, para as outras misturas as equações de previsão tendem a se afastar dos dados do teste. Em geral, os autores observaram que os resultados da equação possuem valores superiores dos obtidos em ensaios de módulo dinâmico.

### 2.2.1. Conceptualização

As misturas asfálticas possuem propriedades elásticas, viscosas e plásticas, sendo que no campo das pequenas deformações são apresentadas somente as propriedades viscoelásticas. O módulo complexo visa caracterizar as propriedades viscoelásticas lineares do material, bem como contabilizar os efeitos de diferentes climas e tráfegos, através da variação de temperatura e frequência do ensaio.

O ensaio para obtenção do módulo complexo é realizado para um carregamento senoidal uniaxial de compressão com frequências que podem variar de 0,1 Hz a 25 Hz e com temperaturas de -10°C a 54°C segundo a norma da AASHTO 342/11. No ensaio se obtém como resposta a deformação em forma senoidal, conforme Figura 12.

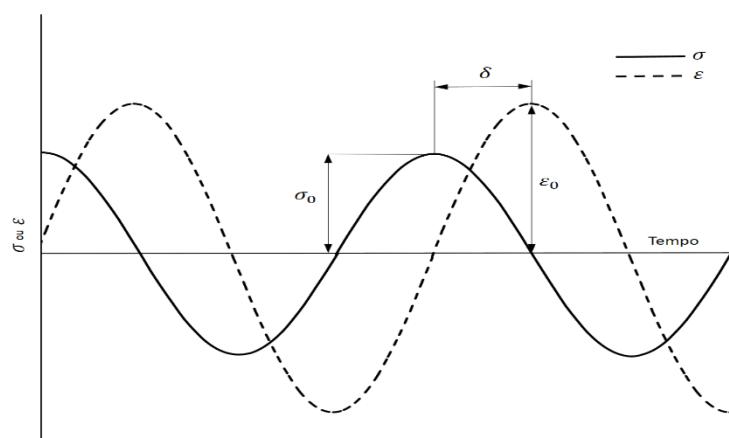


Figura 12: Carregamento senoidal

Como o comportamento das misturas asfálticas são dependentes do tempo é comum aplicar a teoria da viscoelasticidade para a análise em sistemas de camadas. A matemática complexa proporciona uma ferramenta matemática que auxilia na resolução do comportamento viscoelástico das misturas asfálticas em carregamentos cíclicos. O carregamento senoidal uniaxial (Equação 2) pode ser representada da forma complexa (Kim, 2009):

$$\sigma^* = \sigma_0 \cos(\omega t) + i \sigma_0 \sin(\omega t) = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$\sigma_0$  = amplitude da tensão

$\omega$  = velocidade angular, a qual é relacionada com a frequência pela Equação 3.

$$f = 2\pi\omega \quad \text{Equação 3}$$

Sendo a resposta a deformação conforme Equação 4.

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$\varepsilon_0$  = amplitude da deformação

$\varphi$  = ângulo de fase.

$i$  = número imaginário ( $= \sqrt{-1}$ )

O valor absoluto do módulo complexo é conhecido como módulo dinâmico  $|E^*|$ , que pode ser definido como a relação entre a amplitude de tensão e a amplitude de deformação conforme Equação 5.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 5}$$

O módulo complexo pode ser dividido em duas partes, sendo uma delas a parte real que representa o módulo elástico ou de armazenamento ( $E_1$  ou  $E'$ ), e a parte imaginária que corresponde ao módulo viscoso ou módulo de perda ( $E_2$  ou  $E''$ ), os dois podem ser representados no plano complexo conforme Figura 13. Os módulos  $E_1$  e  $E_2$  podem ser representados como uma função do ângulo de fase conforme a Equação 6 e Equação 7.

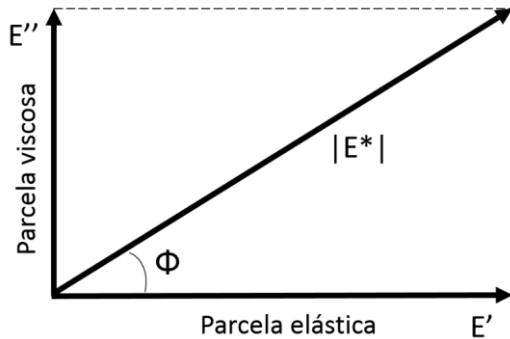


Figura 13: Representação esquemática do módulo complexo no plano complexo

$$E_1 = \frac{\sigma_0 \cos \varphi}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 6}$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0 \sin \varphi}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação 7}$$

O ângulo de fase pode ser definido como um indicador das propriedades viscosas do material ensaiado, podendo ser representado como o ângulo de defasagem de  $\varepsilon_0$  em relação a  $\sigma_0$  (Centofante, 2016), conforme Equação 8.

$$\varphi = \frac{t_i}{t_p} \times 360 = \omega \times \Delta t \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

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

$t_p$  = tempo de um ciclo de carga.

$\omega$  = frequência angular

$\Delta t$  = diferença de tempo entre os picos de tensão e deformação

O ângulo de fase pode ser determinado também como a tangente dos módulos de armazenamento e perda (Equação 9). Segundo Lakes (1998) *apud* Theisen (2011) a  $\tan(\varphi)$  pode ser definida como a relação do atrito interno ou amortecimento mecânico.

$$\tan \varphi = \frac{E_2}{E_1} \quad \text{Equação 9}$$

Se o material é puramente elástico o ângulo de fase é igual a zero, pois não há dissipação da energia. Já se o mesmo for igual a  $90^\circ$  o material é puramente viscoso, não existe armazenamento de energia.

## 2.2.2. Normatização do ensaio de módulo dinâmico

Neste item são apresentadas três normativas utilizadas para determinação do módulo dinâmico em amostras cilíndricas sobre carregamento uniaxial, sendo elas a ASTM D 3497 – *Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*, AASHTO T 342/11 - *Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)* - e a EN 12697 26/2004 - *Bituminous mixtures -Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*. Salienta-se que no Brasil ainda não há uma norma que regulamente este ensaio, sendo necessário a busca em procedimentos especificados em outros países. A Tabela 1 apresenta um resumo dos principais critérios estabelecidos para ensaio de módulo complexo pelas diferentes normas utilizadas.

Tabela 1: Comparativo entre as normas para o ensaio de módulo complexo.

Parâmetro/Norma	ASTM D - 3497	AASHTO T 342/11	EN 12697-26/2004
Tipo de carregamento	Senoidal ( <i>Haversine</i> )	Senoidal ( <i>Haversine</i> )	Senoidal
Diâmetro da amostra (mm)	101,6	moldada a 150 e extraída do centro 100	50 a 160 com extração
Relação altura/diâmetro da amostra	2/1	altura = 170mm	1,8/1 a 3/1
Relação mínima com diâmetro máximo nominal do agregado	4	-	4
Número mínimo de amostras	3	2	-
Temperaturas (°C)	5, 25 e 40	-10; 4,4; 21,1; 37,8 e 54	10, 20, 30 e 40
Frequências (Hz)	1, 4 e 16	0,1; 0,5; 1,0; 5; 10 e 25	0,1; 0,3; 1,0; 3,0; 10 e 20
Tempo de condicionamento	Não estabelecido	entre 6 a 1 hora	4 horas
Número máximo de ciclos	Prevê um tempo mínimo de 30 a 45s	200	Não estabelecido
Método de ensaio	Tensão controlada	-	Deformação controlada
Parâmetro	0 a 241kPa	50 a 150 $\mu$ e	$\leq$ 50 $\mu$ e

### a) ASTM D 3497

A normativa ASTM D 3497 (*Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*) propõe que o ensaio seja realizado aplicando um carregamento axial senoidal (*Haversine*) que deve variar de 0 a 241 kPa por um tempo mínimo de 30 segundos, não excedendo 45 segundos. O ensaio deve ser realizado no mínimo nas temperaturas de 5, 25 e 40°C nas frequências de 1, 4 e 16 Hz para cada temperatura.

As amostras devem ser moldadas conforme ASTM D 3496 (*Method for Preparation of Bituminous Mixtures Specimens for Dynamic Modulus Testing*), devendo apresentar uma relação de

altura/diâmetro de 2 para 1, sendo o diâmetro mínimo de 101,6 mm e quatro vezes maior que o tamanho máximo nominal do agregado. A norma requer no mínimo três amostras para o ensaio.

Durante o ensaio a frequência em cada temperatura deve ser testada duas vezes, sendo duplicada depois que todas as frequências foram realizadas naquela temperatura.

b) AASHTO T 342/11

Segundo esta norma a amostra para o ensaio de módulo dinâmico deve ser compactada no compactador giratório utilizando um molde de diâmetro de 150 mm obtendo-se uma altura de 170 mm. Posteriormente deve ser extraída do centro uma amostra de aproximadamente 100 mm de diâmetro. Observar que o volume de vazios no centro da amostra é 1,5 a 2,5% menor que o volume de vazios total da amostra. Para se obter um erro estimado de  $\pm 15\%$  utilizando 2 LVDTs são necessárias 3 amostras, caso o erro assumido por de  $\pm 18\%$  são necessárias 2 amostras.

A série de ensaios necessários para desenvolver a curva mestra segundo a normativa, deve ser conduzido nas temperaturas de -10; 4,4; 21,1; 37,8 e 54,4°C nas frequências de 0,1; 0,5; 1,0; 5; 10 e 25 Hz para cada temperatura. A mesma recomenda que se inicie pela temperatura mais baixa (de -10 a 54°C) e pela frequência mais alta (de 25 a 0,1Hz). O tempo de condicionamento para cada temperatura está especificado na Tabela 2. A normativa salienta que a temperatura deve ser controlada por uma amostra com sensor de temperatura instalado.

Tabela 2: Tempo de equilíbrio recomendado.

Temperatura (°C)	Tempo para temperatura da estufa a partir de 25°C	Tempo da temperatura do ensaio anterior
-10	de um dia para o outro	de um dia para o outro
4	de um dia para o outro	4 horas ou de um dia para o outro
21	1 hora	3 horas
37	2 horas	2 horas
54	3 horas	1 hora

Fonte: Adaptado da AASHTO T 342/11

A aplicação do carregamento senoidal (*Haversine*) deve ser aplicado de maneira cíclica de modo a obter deformações de 50 a 150  $\mu\epsilon$ . A Tabela 3 apresenta os valores típicos de tensão aplicados para obtenção do módulo dinâmico.

Tabela 3: Níveis de tensão típicos.

Temperatura (°C)	Variação (kPa)
-10	1400 a 2800
4	700 a 1400
21	350 a 700
37	140 a 250
54	35 a 70

Fonte: Adaptado da AASHTO T 342/11

No início do teste a norma recomenda aplicar na amostra 200 ciclos a 25 Hz nos níveis de tensão apresentados na Tabela 3. Posteriormente o carregamento deve seguir o número de ciclos especificado na Tabela 4. Um período de descanso entre cada frequência de 2 minutos deve ser observado, não excedendo 30 minutos.

Tabela 4: Número de ciclos para a sequência de ensaios.

Frequência (Hz)	Número de ciclos
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

Fonte: Adaptado da AASHTO T 342/11

A AASHTO T-342/11 recomenda que sejam obtidos para os cálculos de módulo complexo e ângulo de fase 50 pontos por ciclo nos últimos 5 ciclos de cada carregamento, totalizando 250 pontos de análise. Na análise da tensão o primeiro passo é a analisar os dados na matriz de tensão. A análise de dados é realizada nos pontos centrados que são calculados a partir dos dados de tensão por ponto subtraindo a tensão média.

c) EN 12697-26/2004

A norma europeia apresenta diferentes métodos de caracterização da rigidez de misturas asfálticas. Em seu Anexo D [*Direct tension-compression test on cylindrical specimens*] exibe os requisitos

necessários para o ensaio em amostras cilíndricas em compressão axial sobre um carregamento senoidal.

A amostra compactada deve ter entre 50 e 160 mm, e ser igual ou maior que 4 vezes o tamanho nominal máximo do agregado utilizado na mistura. A altura da amostra deve ser entre 1,8 e 3 vezes o tamanho da amostra. As amostras devem ser armazenadas entre duas semanas e dois meses antes do teste. A norma recomenda que as extremidades das amostras sejam coladas a plataforma de carga.

A deformação controlada deve se manter menor que  $25 \mu\epsilon$  para se manter no âmbito linear das misturas asfálticas. Mas a mesma ressalta que experiências com um grande número de testes mostraram que a maioria das misturas asfálticas devem se manter abaixo de  $50 \mu\epsilon$  para prevenir danos de fadiga.

Para cada temperatura de ensaio, a normativa prevê que as amostras devem ser mantidas a temperatura do ensaio durante um período de no mínimo quatro horas na câmara de ensaio sendo o mesmo iniciado com a temperatura mais baixa. O módulo de complexo deve ser determinado a não menos do que quatro temperaturas e para cada temperatura não inferior a 6 frequências. Em nota a normativa recomenda utilização das temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C e as frequências de 0,1;0,3; 1,0; 3,0; 10 e 20 Hz.

### 2.2.3. Análise dos dados do ensaio de módulo dinâmico

A análise dos dados obtidos no ensaio de módulo dinâmico envolve a geração de diferentes representações gráficas, incluindo curvas mestras, espaço de Black, curvas isotérmicas, curvas isócronas, representação Cole-Cole. Uma explicação sobre as mesmas está apresentada nos itens a seguir.

#### a) Curva Mestra

A completa caracterização de uma mistura asfáltica requer a geração de curvas mestras, pois definem as propriedades viscoelásticas do material como uma função da temperatura e do tempo. Sendo uma curva horizontal caracteriza um material com comportamento puramente elástico e uma curva próxima a vertical um material muito sensível as variações de temperatura e de frequência. A formação de uma curva mestra possibilita a interpretação dos dados para qualquer combinação de temperatura e frequência, dentro da análise realizada no ensaio.

A curva de equivalência frequência-temperatura ou curva mestra pode ser determinada pela transformação da relação  $E^*(\omega, T)$  na relação  $E^*(\omega f(T))$ . Nesta relação é possível construir uma curva  $(\log |E^*|, \log F)$  para uma temperatura de referência ( $T_R$ ) escolhida arbitrariamente, com a translação paralela dos eixos das frequências de cada isotérmica relacionada com a isotérmica correspondente e a temperatura de referência, até que haja uma superposição de pontos de mesma ordenada (Otto, 2009).

Os dados coletados em diferentes temperaturas podem ser deslocados relativos ao tempo de carregamento ou frequência, para isso as várias curvas devem ser alinhadas para formar uma única curva mestra. O fator de deslocamento  $\alpha(T)$  define o deslocamento necessário para uma dada

temperatura, que é constante no tempo mas deve ser dividida para chegar a um tempo reduzido para a curva mestra (Kim, 2009).

Para se obter a frequência reduzida ( $f_R$ ) é necessário multiplicar pelo fator de deslocamento  $\alpha(T)$  conforme Equação 10.

$$f_R = f \cdot \alpha(T) \quad \text{Equação 10}$$

A curva mestra deve ser obtida levando em consideração um temperatura de referência, sendo geralmente 20°C. Nessa temperatura de referência, o fator de deslocamento pode ser igual a 1 ou a zero.

Um estudo de Pellinen, Witczak & Bonaquist (2002) e Pellinen (2002) desenvolveram um método para um construir uma curva mestra utilizando uma técnica experimental de deslocamento para uma função de ajuste sigmoidal. Entre vários modelos de previsão, o modelo sigmoidal é usado pelo MEPDG e pode ser considerado um dos mais populares (Yusoff et al., 2011). O modelo está apresentado na Equação 11 e está validado para temperaturas de -18°C até 55°C (Kim, 2009)

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log(\xi)}} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

$\delta$  = valor mínimo do módulo;

$\alpha$  = intervalo do valor do módulo; igual a  $\delta$

$\beta, \gamma$  = parâmetros de forma.

A Figura 14 apresenta a obtenção dos parâmetros graficamente. É possível observar que o parâmetro  $\gamma$  é função da inclinação da função. Mello (2008) observa que os coeficiente  $\delta$  e  $\alpha$  dependem da granulometria da mistura, da quantidade de ligante e de vazios na amostra. Já os coeficientes  $\beta$  e  $\gamma$  estão relacionados com as características do ligante e com a magnitude de  $\delta$  e  $\alpha$ .

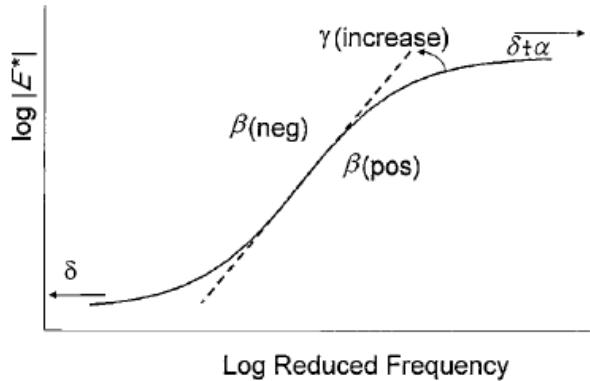


Figura 14: Obtenção dos parâmetros para curva mestra.

Fonte: Kim, 2009

O modelo da interpolação, conhecido como curva mestra, consiste em dois submodelos:

- Um modelo que utiliza o princípio de sobreposição do tempo-temperatura e determina para cada temperatura os deslocamentos necessários no domínio da frequência para obter os mesmos valores a uma temperatura de referência (normalmente 20°C), mas com uma frequência deslocada. Essas mudanças resultam em frequências à temperatura de referência referidos como frequências reduzidas.
- Um segundo modelo (geralmente uma curva sigmoidal) que é ajustada aos pontos deslocados à temperatura de referência.

Modelos de sobreposição das curvas para materiais viscoelásticos podem ser usados, como por exemplo, Arrhenius, e Williams, Landel e Ferry (WLF) e a translação gráfica.

Para a fórmula de Williams, Landel e Ferry (WLF) e a equação de Arrhenius, o coeficiente de translação ( $\alpha_T$ ) da isotérmica  $T$  em relação à isotérmica  $T_R$  da referente escolhida é  $\log(a_T)$ , tal que  $E^*(\omega, a_T)$  com  $a_T=1$  (Otto, 2009). A representação  $\log(a_T)$  para WLF está apresentada na Equação 12 e para Arrhenius na Equação 13.

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_R)}{(T - T_R) + C_2} \quad \text{Equação 12}$$

$$\log(a_T) = \frac{\delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

$C_1$  e  $C_2$  = constantes dependentes do material;

$\delta H$  = energia aparente de ativação característica do material;

R = constante universal dos gases (8,31J/mole/°K);

T e  $T_R$  = temperatura expressão em °K.

Na translação gráfica, um ponto de referência é escolhido ( $F_{ref}$ ,  $E_{ref}$ ) sobre a curva que se quer transferir (Figura 15). Sobre a outra curva, três pontos são escolhidos ( $F1, E1$ ;  $F2, E2$  e  $F3, E3$ ) de maneira que o valor do módulo do ponto de referência seja próximo do valor do módulo no ponto ( $F2, E2$ ). As retas que passam pelos pontos são então determinadas. Dois pontos onde o valor de módulo é igual ao valor do módulo de referência são obtidos. A frequência média destes dois pontos é utilizada para a translação, que é realizada em escala logarítmica (Otto, 2009).

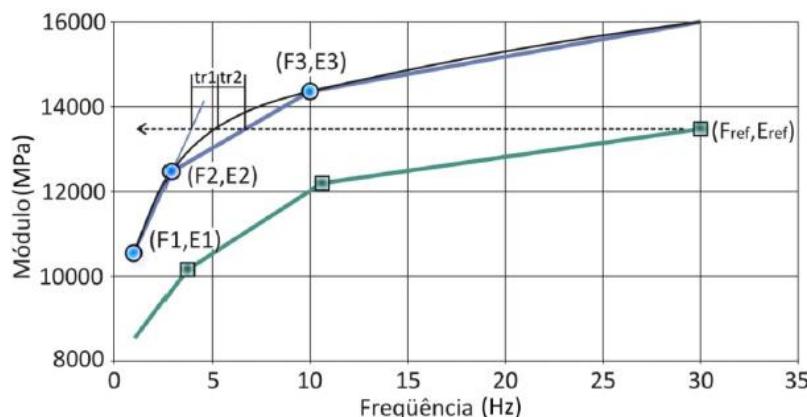


Figura 15: Translação gráfica das curvas isotérmicas

Fonte: Otto, 2009

Conforme Di Benedetto et al. (2001) a validação do princípio da superposição da temperatura-frequência é geralmente verificado com uma boa acurácia para misturas com betume puro. A equação de Arrhenius, que tem apenas um parâmetro é fácil de ser utilizada. Para o correto ajuste de uma série de temperaturas mais elevadas que 10°C a formulação de WLF é uma outra alternativa. A mesma precisa de 3 constantes e parece ser mais precisa em uma faixa de temperaturas maior.

A utilização da função sigmoidal traz uma previsão mais aproximada do comportamento das misturas asfálticas dentro nos ensaios cílicos de compressão dentro de um intervalo de temperaturas. O mesmo prevê com acurácia o módulo frágil da misturas em baixas temperaturas, bem como, a influência da graduação dos agregados que fica mais evidente nas altas temperaturas. Outra facilidade de utilizar a função sigmoidal é a possibilidade de obter os fatores de deslocamento através da função do Excel utilizando o “Solver Function”.

b) Espaço de Black

O espaço de Black é a representação do valor do módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) em função do ângulo de fase ( $\phi$ ) para cada temperatura ensaios, sendo os mesmos apresentados na escala logarítmica, conforme

exemplo da Figura 16. No eixo das abscissas que contém o ângulo de fase apresenta-se invertido, ou seja, os valores crescem da direita para a esquerda. O mesmo também pode ser apresentado com o módulo dinâmico em escala logarítmica no eixo x.

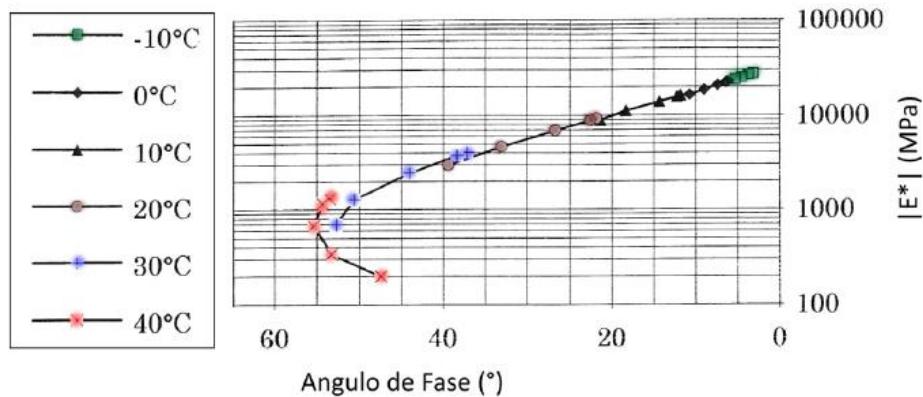


Figura 16: Curva do Espaço de Black

Fonte: De La Roche (1996) *apud* Otto (2009)

Essa curva permite visualizar a zona de valores com baixos módulos, onde os valores de ângulo de fase são maiores é possível notar a influência da temperatura nos valores de ângulo de fase. Para altas temperaturas ocorre uma diminuição do valor encontrado. Esse fenômeno está relacionado à presença dos granulares na mistura, ou seja, para o betume o ângulo de fase aumenta de maneira continua, porém com granulares próximos ao seu maior valor tende a ter uma assintótica com o aumento da temperatura (Otto, 2009).

### c) Representação Cole-Cole

O plano cole-cole é a representação gráfica dos valores do módulo de perda ( $E_2$ ) em função do módulo de armazenamento ( $E_1$ ) em escala aritmética, conforme Figura 17. Esta curva é semelhante a um arco de círculo, independente da frequência e da temperatura.

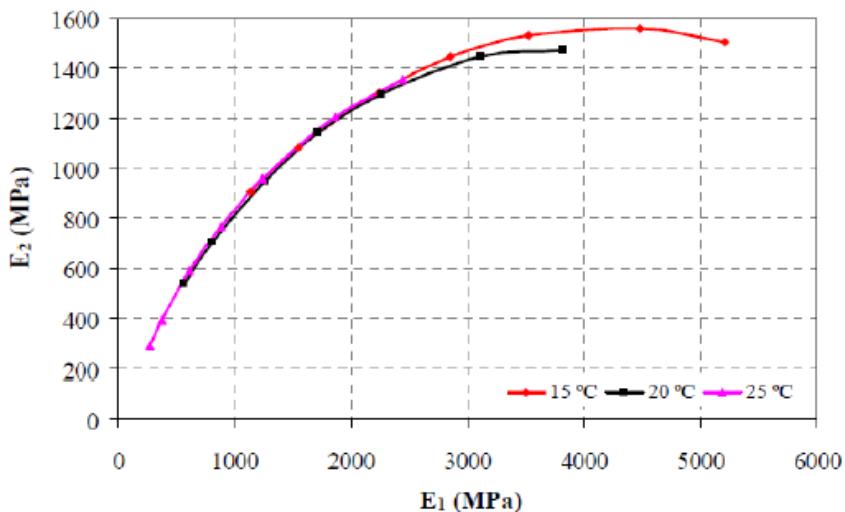


Figura 17: Representação do módulo complexo no plano cole-cole.

Fonte: Fontes (2009) *apud* Colpo (2014)

Esse tipo de representação permite avaliar em qual temperatura e frequência tem-se a maior energia dissipada em cada ciclo de carregamento. Para estas condições (ou regiões) é que deveriam ser conduzidos os ensaios de fadiga (Colpo, 2014).

#### d) Inferência a fadiga e deformação permanente

O fator de performance a fadiga da especificação Superpave para ligantes asfálticos é  $|G^*| \cdot \text{sen}\varphi$ , sendo  $|G^*|$  o módulo cisalhante do ligante asfáltico e  $\varphi$  o ângulo de fase, sendo o fator equivalente para misturas asfálticas  $|E^*| \cdot \text{sen}\varphi$  (Kim, 2009). A análise deve ser realizada nas temperaturas intermediárias, que é a temperatura mais próxima à qual é convencionalmente utilizada em ensaios de fadiga.

A especificação Superpave para ligantes asfálticos define requisitos para o fator de deformação permanente, sendo este  $|G^*|/\text{sen}\varphi$  calculado em altas temperaturas. De forma similar o fator de deformação permanente pode ser definido para as misturas asfálticas como sendo  $|E^*|/\text{sen}\varphi$ . Essa correlação apresentou um  $R^2$  igual a 0,91 com os resultados de deformação permanente (Kim, 2009).

### 2.3. MISTURAS MORNAS

Misturas asfálticas mornas é um termo genérico utilizado para uma variedade de tecnologias que permitem a produção de misturas asfálticas quentes com redução das temperaturas entre 10 e 40°C. Ao reduzir a viscosidade do betume, encorajar a adesão ativa e/ou aumentar a trabalhabilidade da mistura, tecnologias WMA tem o potencial de reduzir significativamente a temperatura, sem comprometer o desempenho do asfalto.

Com a crescente preocupação mundial com a emissão de gases na camada atmosférica, as misturas asfálticas mornas tem se apresentado como uma solução menos agressiva ao meio ambiente. Durante

os últimos cinco anos, o aumento dos custos de combustível e o desenvolvimento de normas ambientais mais rigorosas tem gerado interesse crescente em tecnologias WMA como um meio para diminuir o consumo de energia e as emissões associadas à produção de HMA convencional (Estakhri *et al.*, 2010). Essa redução é importante hoje em dia, uma vez que a utilização de modificadores de ligantes, tais como a borracha, aumentam as temperaturas da mistura, embora proporcionando a vantagem de melhorar a resistência à deformação permanente, fissuração por fadiga e de trincas térmicas (Motta *et al.*, 2014).

Fora das fronteiras brasileiras, principalmente na América do Norte e Europa, misturas asfálticas mais econômicas e com vantagens ambientais e operacionais avançaram significativamente na última década. Conforme NAPA 2014, em 2013 mais de 30% das misturas asfálticas fabricadas nos Estados Unidos da América apresentaram alguma tecnologia de mistura morna, sendo 87% das misturas mornas a partir do processo de espuma asfáltica produzida em usina de asfalto. Na França em 2012 as misturas mornas já representavam 7,5% de toda produção de misturas asfálticas no referido país. Na Noruega em 2012 as autoridades de inspeção dos trabalhadores do país procuraram acelerar o uso de misturas mornas. Para atingir este objetivo, a administradora das rodovias norueguesas promoveu uma recompensa de 4 euros por tonelada de mistura asfáltica quando produzida a temperatura inferior a 25°C em relação a uma mistura convencional, assumindo a mesma qualidade da referência. Na Suíça está a caminho a inclusão das tecnologias de misturas mornas nas normas locais. Outros países europeus como Suécia e Turquia vêm apostando forte nas misturas mornas (EAPA; 2014 *apud* Zubaran, *et al.*, 2015). Sobre as misturas mornas, não há ainda norma brasileira, ao que se saiba, que trate das várias tecnologias possíveis, muitas desenvolvidas nos anos 1990 na Europa e com aplicações em crescimento acelerado nos últimos anos (Zubaran, *et al.*, 2015).

Chowdhury *et al.* (2008) cita alguns dos mais importantes benefícios das misturas mornas sendo como:

- Temperaturas significativamente mais baixas na produção e compactação;
- Menor consumo de combustível/energia, reduzindo assim os custos;
- Menor envelhecimento do ligante durante a mistura e compactação, melhorando assim a vida útil do pavimento;
- Redução da segregação térmica na esteira;
- Diminuição das emissões e odores durante a mistura e compactação em campo;
- Diminuição da produção de fumaça devido as menores temperaturas e menor tempo de aquecimento;
- Temporada estendida de pavimentação (isto é, pavimentação durando as épocas mais frias);
- Distância estendida entre a usina e a pista (devido a menor diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura da mistura), proporcionando área de mercado expandida;
- Pavimentação em áreas não habitadas;
- Facilidade de compactação, que é um benefício para misturas mais rígidas, misturas com material fresado e reduzido esforço de compactação;
- Melhores condições de trabalho na usina e para a equipe que trabalha na pavimentação;

- Diminuição da consternação do público sobre as emissões; e
- Facilidade de licenciamento para central de usinagem em áreas urbanas.

Essa tecnologia também visa um ganho econômico, pois há uma redução significativa da temperatura de mistura e compactação da mistura asfáltica com poucas alterações nas propriedades, o que provoca uma redução do custo energético. A classificação de asfalto pela temperatura de produção é apresentada na Figura 18.

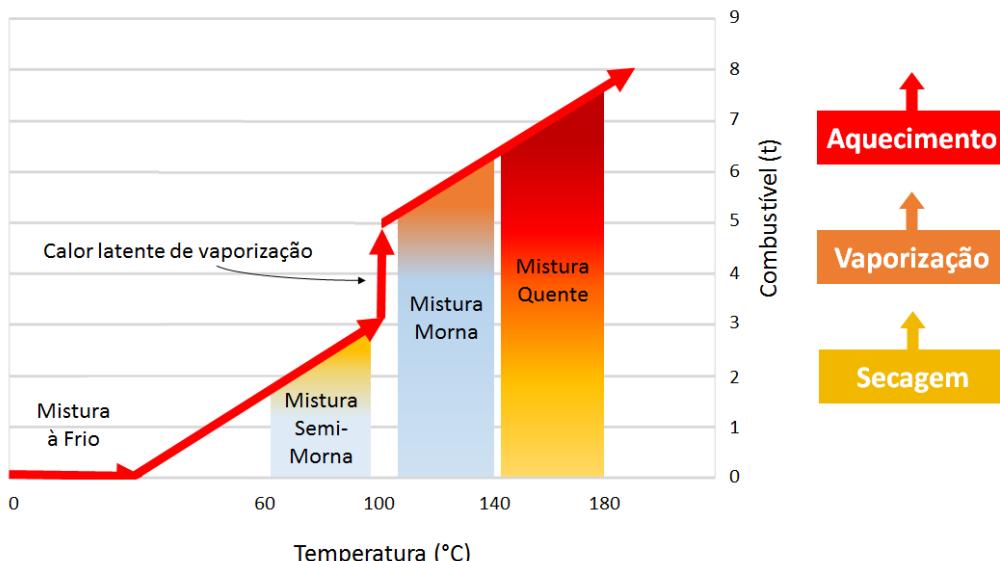


Figura 18: Classificação do asfalto pela temperatura de mistura

FONTE: Adaptado de Zaumanis et al. (2011)

Motta et al. (2014), apresenta uma experiência brasileira na utilização de um aditivo surfactante na produção de uma mistura grad-graded com asfalto borracha. A mesma conclui que a redução da temperatura não afetou significativamente a compactação (por meio dos volumes de vazios), bem como o módulo de resiliência e a resistência a tração por compressão diametral. Foi também realizado o ensaio no *French wheel tracking* para análise da susceptibilidade à deformação permanente, sendo que os autores concluíram que a mistura WMA não possui um potencial significativo a deformação permanente. As análises realizadas em campo após dois anos de construção não mostram diferenças no comportamento da mistura WMA em relação a HMA.

Buss et al. (2011) conduziu ensaios com 16 misturas asfálticas moldadas em campo e em laboratório com diferentes tecnologias WMA. O mesmo concluiu que os valores de módulo dinâmico são estatisticamente iguais comparados com os valores da mistura de controle.

Klinsky et al. (2014) realizou a análises de curvas mestras de misturas asfálticas mornas utilizando uma mistura de referencia (Q-1) e 3 misturados com aditivos para misturas mornas (M-1, M-2 e M-3). Os resultados do estudo mostraram uma tendência de redução de rigidez das misturas asfálticas mornas

no ensaio de módulo dinâmico (Figura 19), bem como no ensaio de módulo de resiliência em relação a mistura de referência.

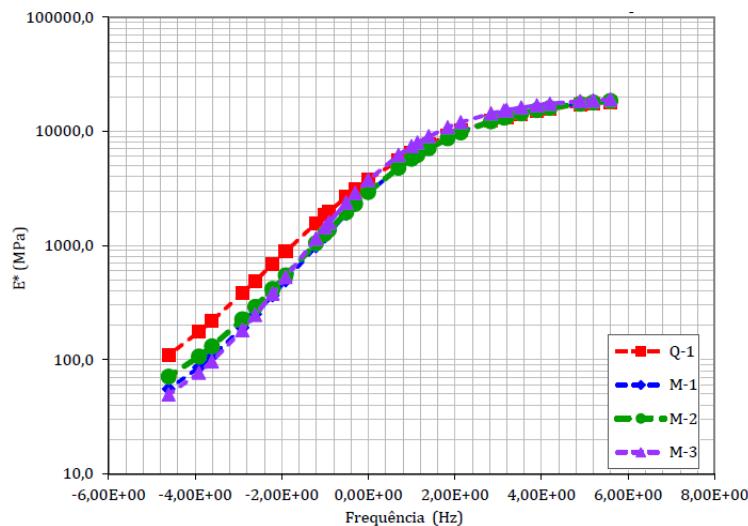


Figura 19: Curva mestra das misturas asfálticas preparadas em laboratório

FONTE: Klinsky *et al.* (2014)

### 2.3.1. Aditivo surfactante

O aditivo surfactante de nome comercial Evotherm foi desenvolvido pela empresa MeadWestvaco (MWV), sendo que no ano de 2015 o departamento de especialidades químicas foi separado da MWV denominando-se Ingevity.

O Evotherm 3G é a terceira geração do aditivo. Esta forma é livre de água, assim, sendo adequado para utilização em misturas asfálticas. Segundo o fabricante o aditivo pode ser utilizado com ou sem polímero modificador, não ocasionando restrições a utilização de ligantes modificados.

A tecnologia Evotherm® provoca a formação de micelas que desenvolvem “planos de deslizamento” o que permite que as partículas de asfalto se movimentem mais facilmente, exigindo menor energia mecânica durante a mistura e a compactação. Ou seja, é um verdadeiro promotor de compactação. A mistura morna com tecnologia Evotherm® apresenta as mesmas propriedades reológicas que o CBUQ convencional quando submetida a baixas forças de cisalhamento; mas quando submetida a alto cisalhamento (usinagem e rolagem) apresenta menor viscosidade mesmo em temperaturas mais baixas (UFRGS, 2015)

A adição de Evotherm 3G não modifica as propriedades de caracterização do ligante asfáltico, assim, o teor de ligante asfáltico de projeto determinado na mistura asfáltica convencional a quente é o mesmo valor que deve ser utilizado na mistura asfáltica morna (Klinsky *et al.*, 2014).

Hurley *et al.* (2008) observou que na mistura em estudo contendo Evotherm®, há uma redução de 22 para 82% nos vapores de asfalto em relação a mistura de controle. Bennert (2010) encontrou uma redução de 23% das partículas totais.

A MWV relata que testes em campo demonstraram uma redução de 38°C nas temperaturas de mistura e que a redução das temperaturas pode levar à economia de energia da usina de 55%; o que resulta numa redução de 45% em emissões de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, uma redução de 41% em material orgânico total e frações solúveis de benzeno abaixo dos limites detectáveis (Chowdhury *et al.*, 2008)

Na pesquisa de Hurley *et al.* (2008) foram realizadas análise do módulo dinâmico de três aditivos diferentes para WMA e uma mistura HMA para controle, em um projeto realizado em St. Louis, Missouri. A Figura 20 apresenta as curvas mestras encontradas pelo mesmo, pode-se constatar que para nenhum dos aditivos há uma mudança significativa nos valores de módulo dinâmico.

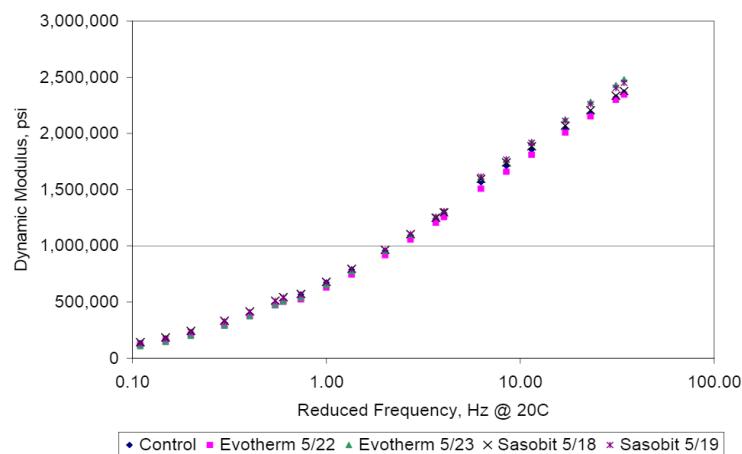


Figura 20: Curvas mestras do módulo dinâmico, St. Louis, Missouri

FONTE: Hurley *et al.* (2008)

### 3. METODOLOGIA

A presente pesquisa foi realizada no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) com apoio da Concessionária Triunfo|Concepa.

O início desta pesquisa contemplou uma pesquisa bibliográfica, nacional e internacional, focada de sobremaneira nas propriedades viscoelásticas de materiais asfáltico, como realizar sua interpretação para avaliação do desempenho futuro, e as rotinas de ensaio necessárias, haja visto que este ensaio ainda não é normatizado no Brasil no âmbito estadual é a ainda restrito a apenas uma outra instituição de pesquisa.

Para a composição das misturas foram utilizados traços já aplicados no laboratório ou na Concessionária para análise dos parâmetros volumétricos e determinação das características necessárias à realização dos ensaios. Após foram realizados os ensaios convencionais mecânicos e também de módulo complexo para que se possa dentro do prazo proposto concluir o trabalho com a determinação dos parâmetros viscoelásticos, aqui retratados pelas curvas obtidas no item 8 da relação acima.

#### 3.1. EQUIPAMENTO UTILIZADO

Para viabilizar o estudo foi necessária a adaptação de um equipamento existente no Laboratório de Pavimentação da UFRGS. Desta forma foi possível adequar o equipamento para a realização dos ensaios dentro da metodologia proposta.

O texto correspondente ao equipamento MTS 810 foi baseado nos manuais de seus componentes. Os manuais estão citados nas referências bibliográficas.

A MTS 810 proporciona uma ampla capacidade de ensaios estáticos e dinâmicos, com baixa ou alta tensão. A partir de uma variedade de carregamentos, classificações de fluxo da servovalve, capacidade da bomba, software e acessórios a MTS 810 pode ser configurada para atender as necessidades do ensaio a ser realizado.

A unidade de carregamento utilizada é o Modelo 318.25 da MTS. A unidade possui como força nominal até 250 kN. A unidade de carregamento conta com vários componentes, sendo alguns deles a Servovalve (controla a taxa de fluxo e a direção de fluido que entra nos atuadores, determinando o quanto rápido o atuador se estende e retrai), LVDT (mede o deslocamento de viagens do atuador, localizado no interior do atuador), atuador linear e transdutor de força (mede as forças axiais aplicadas a amostra).

O controlador digital utilizado é a FlexTest GT. O mesmo possui a capacidade de fornecer em alta velocidade, em tempo real do controle de malha fechada, aquisição de dados, geração de função e transdutor condicionado para multicanal, aplicações múltiplas, permitindo que vários sistemas de teste possam ser conduzido a partir de um controlador. O controlador FlexTest GT é executado com software MTS 793 e um computador com sistema operacional do Windows™.

A estação de controle remota (em inglês *Remote Station Control* - RSC) fornece uma interface de controle conveniente, portátil para a realização de operações simples, como a manipulação de amostras e configuração de teste. O FlexTest GT requer uma RSC para cumprir as normas de segurança para aplicações de teste de materiais. A RSC simplifica várias operações, incluindo o acionamento dos controles hidráulicos, movendo o atuador para montar espécimes, e iniciar e parar os testes.

Como mencionado anteriormente, a MTS 810 utiliza o software Modelo 793.10 *MultiPurpose TestWare®* (MPT). Com ele é possível criar rotinas de ensaios complexos que incluem comandos, aquisição de dados, detecção de eventos, e instruções de controle externo.

A unidade hidráulica utilizada é do modelo SilentFlo™ 505.07. Esta unidade tem como objetivo fornecer fluido hidráulico de alta pressão para a operação do sistema de ensaio. Como componente adicional da unidade hidráulica é utilizado um sistema com bomba e ventilador para auxiliar no resfriamento do sistema.

A câmara de condicionamento utilizado é do modelo 651 da MTS. A mesma possibilita uma variação da temperatura de -150°C até 540°C. O aquecimento é realizado por convecção forçada, já o resfriamento é realizado com nitrogênio líquido. Todas as paredes da câmaras dispõem de isolamento com fibra de vidro, e na parte frontal uma abertura em vidro temperado que permite a visualização da amostra durante o ensaio.

A Figura 21 mostra a disposição dos componentes do equipamento no Laboratório de pavimentação da UFRGS.

### **3.1.1. Sensores de deslocamento**

Os sensores de deslocamento utilizados são extensômetros axiais do modelo 632.11F-90 da MTS (Figura 22). Os extensômetros possuem um comprimento de curso de 2mm, e haste com comprimento útil de 115mm. Nas extremidades das hastas são encontrados garras metálicas que auxiliam na fixação junto a amostra.

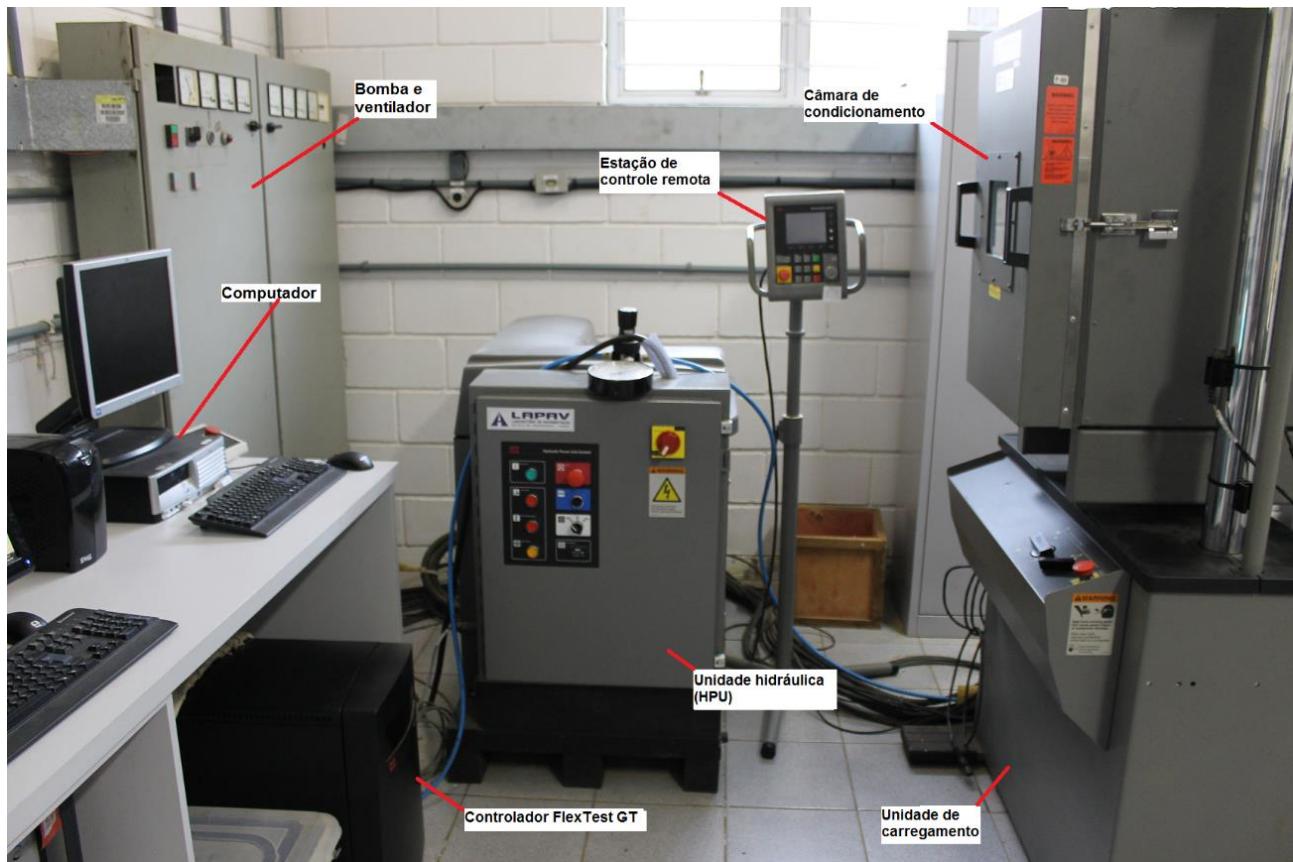


Figura 21: Componentes do equipamento



Figura 22: Sensores de deslocamento

### 3.2. MATERIAIS

A seguir estão apresentados os materiais empregados no estudo. Foram utilizados dois agregados e origem distintas e dois tipos de ligantes asfálticos.

#### 3.2.1. Agregados minerais

Os agregados utilizados nesta pesquisa são provenientes da pedreira da Construtora Triunfo. O material de origem basáltica é proveniente na pedreira localizada no km 30 da BR-290/RS, sendo o mesmo de origem basáltica da formação Serra Geral. Já os agregados de origem granítica são provenientes da usina de Eldorado também pertencente a concessionaria.

Todos os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Estado do Rio Grande do Sul (LAPAV/UFRGS). Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados estão apresentados nas Tabela 5.

Tabela 5: Propriedades dos agregados

Propriedade	Método	Resultado	
		Basalto	Granito
Abrasão "Los Angeles"	DNER-ME 035/98	12%	21%
Equivalente de areia	DNER-ME 054/97	88,2	63%
Índice de forma	DNER-ME 086/94	0,8	0,71
Durabilidade	DNER-ME 089/94	5,30%	8,67%

Foi utilizada na composição da mistura com CAP 50/70 cal dolomítica hidratada do tipo CH – I da marca Fibracal. A mesma possui uma porcentagem de hidróxido de cálcio entre 65 a 78% e de hidróxido de magnésio de 15 a 25%.

Os resultados das análises granulométricas do agregado basáltico encontra-se na Tabela 6, sendo que as granulometrias foram obtidas através do processo de lavagem na peneira número 200. A Figura 23 presenta a curva granulométricas desses agregados.

Tabela 6: Valores médios das análises granulométricas do agregado basáltico

Peneira	Abertura (mm)	3/4"	3/8"	Pó de pedra	Fíller (Cal)
1 1/2"	38,1	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	25,4	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,1	97,02	100,00	100,00	100,00
1/2"	12,7	41,87	100,00	100,00	100,00
3/8"	9,5	8,96	97,12	100,00	100,00
4	4,76	1,25	6,81	93,53	100,00
10	2,00	1,24	1,43	47,85	100,00
40	0,42	1,23	1,41	19,28	100,00
80	0,180	1,21	1,40	12,72	97,00
200	0,074	1,09	1,35	8,53	84,14

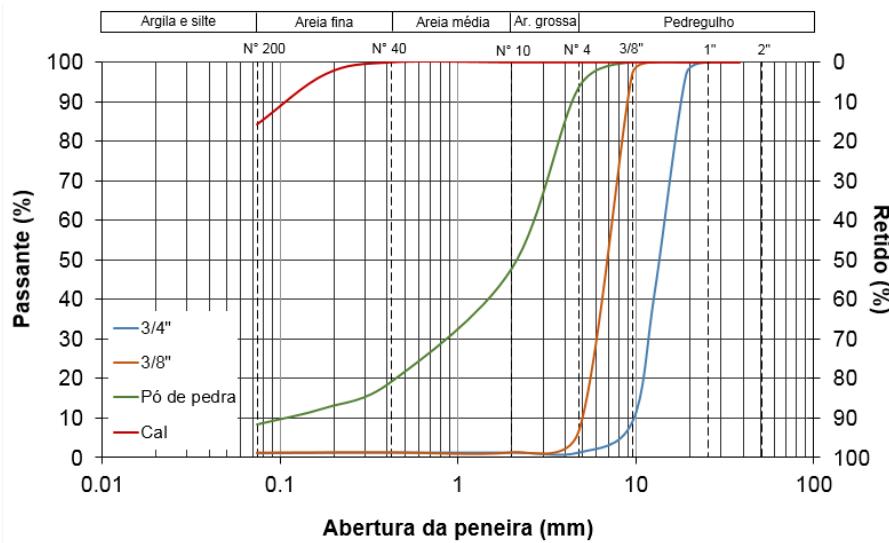


Figura 23: Curva granulométrica dos agregados basálticos

Já a análise granulométrica do agregado granítico está apresentado na Tabela 7 e na Figura 24.

Tabela 7: Valores médios das análises granulométricas do agregado granítico

Peneira	Abertura (mm)	3/4"	3/8"	Pó de pedra
1 1/2"	38,1	100	100	100
1"	25,4	100	100	100
3/4"	19,1	100	100	100
1/2"	12,7	35,66	100	100
3/8"	9,5	5,97	95	100
4	4,76	0,77	3,74	97,81
10	2	0,61	0,74	66,55
40	0,42	0,49	0,65	23,43
80	0,18	0,42	0,58	14,76
200	0,074	0,38	0,56	9,3

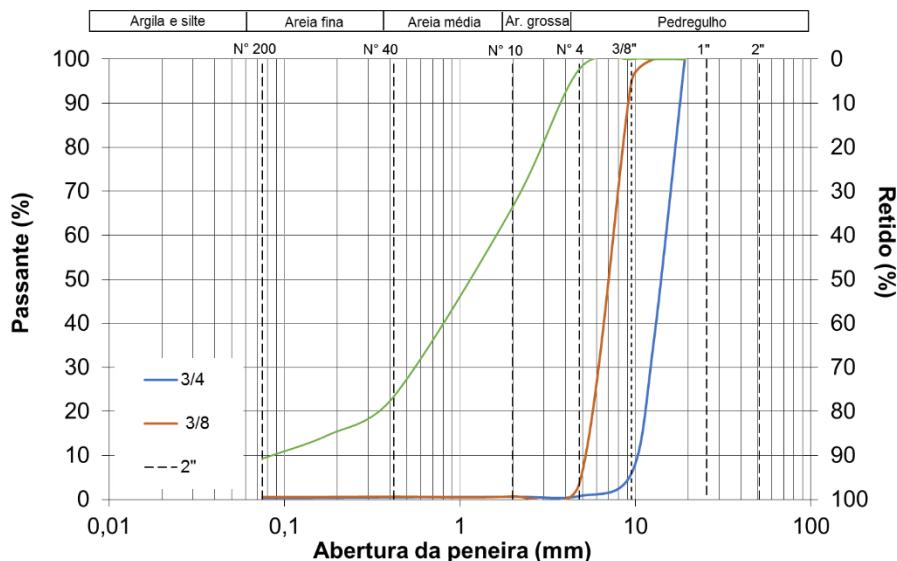


Figura 24: Curva granulométrica dos agregados graníticos

### 3.2.2. Cimentos asfálticos de petróleo

Foram utilizados dois tipos de ligantes asfálticos na composição das misturas, sendo eles:

- Ligante convencional CAP 50/70 da REFAP – Refinaria Alberto Pasqualini;

- Ligante modificado por polímero AMP 60/85 de nome comercial Stylink comercializado pela Betunel;

A caracterização desses ligantes foram realizados conforme normativas presentes na Tabela 8.

Tabela 8: Normativas utilizadas na determinação das propriedades dos cimentos asfálticos

Ensaio	Método
Viscosidade Brookfield	NBR 15184
Densidade de materiais betuminosos	NBR6296
Ponto de amolecimento	NBR 6560
Penetração, 25°C, 100g	NBR 6576
Recuperação elástica, 25°C, 20 cm	NBR 15086

### 3.2.3. Aditivo surfactante

O aditivo surfactante Evotherm® 3G foi adicionado ao ligante após ele já estar aquecido em uma porcentagem de 0,4 sobre o peso de ligante. Após a adição foi necessário homogeneizar com o aditivo e colocar novamente na estufa para garantir que no momento da mistura ele estivesse na temperatura adequada. A Figura 25 apresenta a realização do procedimento de adição do aditivo.



Figura 25: Procedimento de adição do aditivo surfactante.

### 3.3. MÉTODOS

Neste item são descritos os métodos utilizados para composição e dosagem das misturas asfálticas, bem como os procedimentos utilizados para execução do ensaio.

#### 3.3.1. Temperaturas de mistura e compactação

A viscosidade de um fluído é a relação entre a tensão cisalhante aplicada e a taxa de deformação sofrida. Para materiais termosensíveis, como os ligantes asfálticos, a viscosidade altera-se em função da temperatura. A viscosidade do ligante asfáltico é facilmente obtida através do ensaio com viscosímetro rotacional, também conhecido como viscosímetro Brookfield.

Durante o processo de mistura e compactação é necessário que o ligante possua uma viscosidade ideal. Segundo DNIT 031/2006 - ES (Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço) estabelece que a viscosidade do ligante aquecido seja  $170 \pm 20$ cP e compactado com viscosidade de  $280 \pm 30$ cP, sendo que a temperatura não pode ser superior a 175°C. Para as misturas mornas utilizou-se uma redução de 30°C na temperatura de compactação e dos agregados.

#### 3.3.2. Composição granulométrica

As faixas granulométricas utilizadas na pesquisa são aquelas previstas pelas especificações brasileiras, sendo que estas são as mais utilizadas nos projetos de capa de rolamento. Foram utilizadas as especificações do DNIT 031/2006 e DNIT 112/2009.

#### 3.3.3. Dosagem Marshall

O teor de projeto de ligante asfáltico é função da energia de compactação, tipo de mistura, temperatura, entre outros. O método Marshall é largamente empregado no Brasil para dosagem de mistura asfálticas, uma vez que a análise realizada garante adequada proporção volumétrica.

Nesta metodologia as amostras são compactadas por impacto. A DNER ME 043/95 recomenda que o esforço de compactação seja de 75 golpes para uma pressão de 7kgf/cm<sup>2</sup> a 14kgf/cm<sup>2</sup>, sendo que não faz recomendações sobre a frequências dos golpes. O compactador utilizado na pesquisa está apresentado na Figura 26.



Figura 26: Compactador Marshall

A determinação do teor ótimo foi realizada conforme cada uma das especificações, sendo para a faixa C uma porcentagem de volume de vazios aproximadamente 4%. As características volumétricas da mistura projetada, teor de ligante, volume de vazios, vazios do agregado mineral, relação betume/vazios, densidade máxima medida foram comparadas com as exigidas pelas especificações da faixa. A determinação da densidade máxima medida foi realizada pelo método Rice conforme NBR 15619/12.

Segundo a Ingevity, fabricante do aditivo surfactante, não é necessário que as misturas sejam dosadas utilizando o aditivo, sendo possível a utilização da mesma curva granulométrica e teor de projeto de ligante asfáltico.

Durante o processo de dosagem foi utilizado um tempo de cura de duas horas com o intuito de simular um envelhecimento durante a usinagem e também para uniformizar a temperatura da mistura. Essa prática já era corriqueira no procedimento de dosagem no LAPAV/UFRGS.

### 3.3.4. Resistência a tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral (RT) consiste em aplicar duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse plano (Figura 27). O ensaio é normatizado pela NBR 15087/12 e DNIT 136/2010.

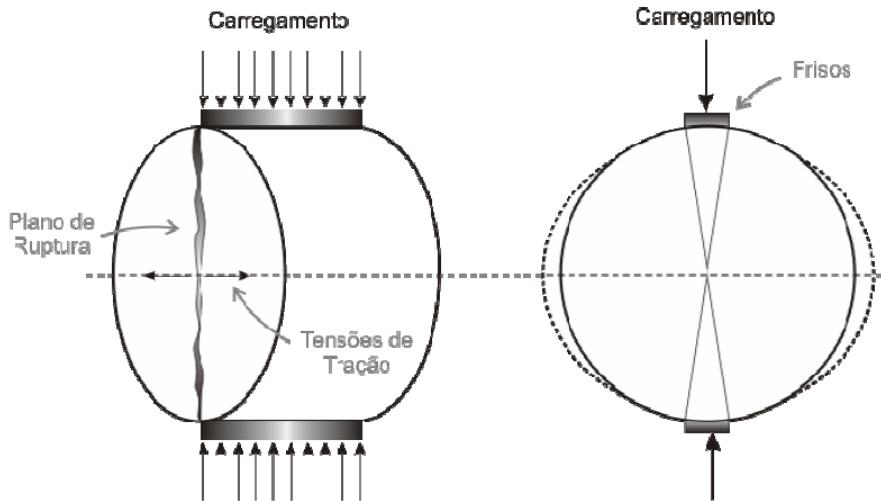


Figura 27: Esquema de carregamento e plano de ruptura típica no ensaio de RT

FONTE: Brito, 2006.

Os corpos de provas utilizados foram moldados no compactador Marshall com diâmetro de 102mm, e altura próxima a 63,5mm. As amostras foram primeiramente condicionadas a 25°C por 4 horas e posteriormente ensaiadas na prensa da Figura 28.



Figura 28: Prensa para ensaio de RT

Após o ensaio, a resistência à tração é determinada pela Equação 14.

$$\sigma_R = \frac{2P_{rup}}{100\pi DH}$$

Equação 14

Onde:

$\sigma_R$  = tensão de tração (Mpa);

$P_{rup}$  = Carga de compressão de ruptura (N);

D = diâmetro do CP (cm);

H = altura do CP (cm).

### 3.3.5. Módulo de resiliência

O módulo de resiliência (MR) de misturas asfálticas é uma relação entre a tensão aplicada repetidamente no plano diametral vertical de uma amostra cilíndrica e a deformação recuperável (resiliente), em dada temperatura.

O ensaio seguiu o procedimento da NBR 16018/11 e DNER – ME 135/10. O mesmo foi realizado aplicando-se uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico de 102mm de diâmetro, moldado no compactador Marshall. A carga aplicada é um pulso com 0,1s de aplicação de carga e 0,9s de repouso, a amostra sofre uma deformação horizontal, a qual é medida através de LVDTs. A amostra foi previamente condicionada na temperatura de 25°C por no mínimo 4 horas, e os carregamentos foram aplicados com 15% da resistência à tração. A Figura 29 apresenta o equipamento utilizado nos ensaios. A aquisição dos dados foi realizada pelo sistema SeePav8200.



Figura 29: Equipamento para ensaio de MR

Após o ensaio o valor do módulo de resiliência foi determinado pela Equação 15.

$$MR = \frac{P}{\Delta H} (0,27 + \mu)$$

Equação 15

Onde:

MR = módulo de resiliência (MPa);

P = carga vertical aplicada (N);

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente (cm);

H = altura do corpo de prova (cm);

$\mu$  = coeficiente de Poisson

### 3.3.6. Ensaio de módulo dinâmico

Os resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase foram determinados a partir de um carregamento senoidal, em diferentes temperaturas e frequências de ensaio. Os itens a seguir apresentamos procedimentos utilizados para moldagem da amostra, metodologia de execução do ensaio e análise dos dados para formação de curva mestra.

#### a) Moldagem das Amostras

As amostras foram moldadas no compactador giratório Superpave (Figura 30). Para moldagens das amostras foram utilizados moldes de 100mm de diâmetro e 200mm de altura, e utilizados como parâmetros de compactação:

- Ângulo de rotação externo de  $1,25 \pm 0,02^\circ$ ;
- Taxa de 30 rotações por minuto;
- Tensão de compressão vertical durante a rotação de 600 kPa;



Figura 30: Compactador giratório Superpave

No final da compactação procurava-se obter uma amostra com 150mm de altura e 100mm de diâmetro, sem nenhum tipo de corte, mesmo procedimento utilizado por Nascimento (2015). O método mais preciso encontrado pela autora para obtenção da correta densidade aparente, foi a utilização do controle de densidade no compactador, utilizando fatores de correção entre as densidade obtidas no compactador e as determinadas pela NBR 15573/12.

Como propõe a especificação do DNIT 031/06, o grau de compactação da mistura espalhada e compactada em pista deve estar entre 97 a 101%. Como busca-se obter um parâmetro para dimensionamento de pavimentos, realizaram-se os ensaios em corpos de prova com volumes de vazios entre 5 e 6% (grau de compactação de 98 a 99%). A densidade aparente foi determinada pela NBR 15573/12 e a densidade máxima medida é a mesma obtida durante a dosagem.

#### b) Procedimento de ensaio

A metodologia utilizada para a realização dos ensaios de módulo dinâmico uniaxial seguiu os procedimentos preconizados na AASHTO T 342/11. Os ensaios foram realizados em corpos de prova de 100mm de diâmetro por 150mm de altura, sem nenhum tipo de corte, e com no mínimo menos de um mês da data da moldagem.

Os ensaios foram realizados nas temperaturas de -10, 4, 21, 37 e 54°C para as amostras da composição 1 e nas temperaturas de -10; 4; 20; 40 e 54°C para as misturas da composição e ainda nas frequências de 25, 10, 5, 1, 0,5 e 0,1 Hz, sendo utilizadas de 2 a 3 amostras para cada mistura. A

alterações da temperatura da composição 1 para a 2 foi devido as temperaturas não se adequarem as utilizadas na análise do software AASHTO WARE, o qual será assunto de pesquisas futuras.

O carregamento foi realizado a partir de tensão controlada, sendo que as deformações lidas nos extensômetros deveriam estar na ordem de  $50$  a  $100\mu\epsilon$ , conforme a recomendação dos pesquisadores citados na revisão bibliográfica. Após vários testes, o controle de tensão foi escolhido por apresentar maior precisão na formação da senoide do carregamento, e também pela norma determinar níveis de carregamentos máximos e mínimos, facilitando assim o ajuste da tensão/deformação. Não foi possível realizar o carregamento controlado pelos extensômetros pois eles não possuíam uma resposta suficientemente rápida para o equipamento executar o carregamento, e também por questões de segurança do equipamento e do operador.

O procedimento de ensaio é um tanto complexo, devido a mudança da rigidez do material em cada nova temperatura de ensaio, eram necessários ajustes no equipamento. Posteriormente era necessário o ajuste da tensão para atingir a deformação desejada nos extensômetros. Por fim foi realizado o ensaio, e feitas as leituras de amplitude de tensão e deformação.

O procedimento se divide em partes fundamentais, sendo elas:

- Verificação mecânica: consiste em verificar se todos os elementos estão bem presos ao equipamento para evitar vibrações, bem como, se a câmara de condicionamento está bem instalada.
- Condicionamento do corpo de prova: para caracterização completa da mistura asfáltica é necessário realizar o ensaio em diferentes temperaturas. Seguindo recomendações de Dougan et al. (2003) foi instalada uma amostra com sensores de temperatura para o monitoramento da temperatura da amostra (Figura 31). As amostras foram condicionadas até chegar na temperatura desejada, sendo que a variação máxima da temperatura interna era de  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  conforme recomendações da AASHTO T 342/10.

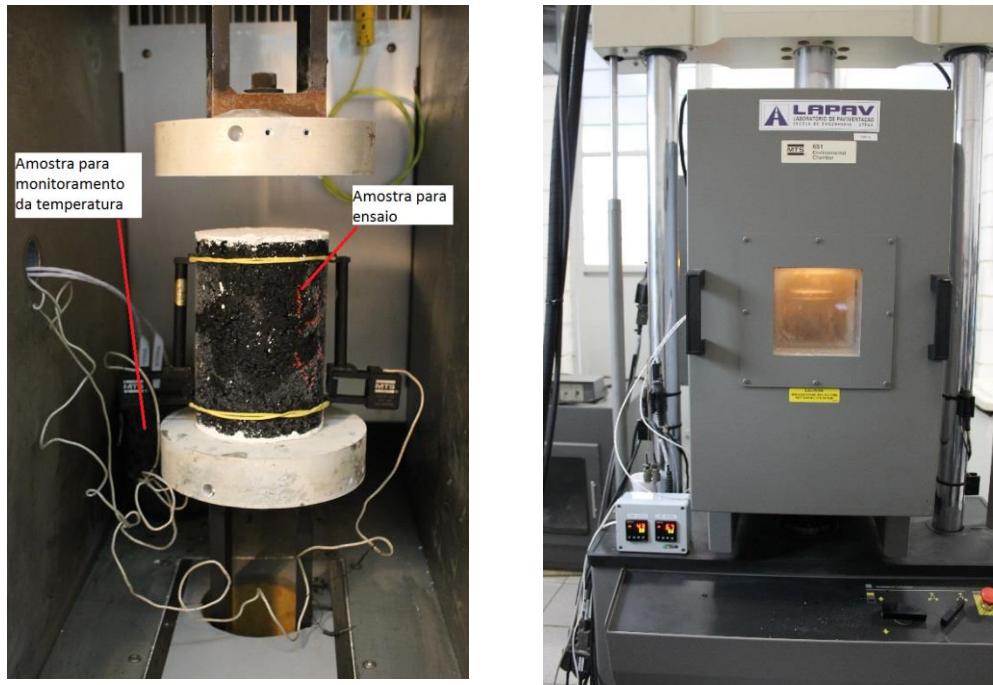


Figura 31: Condicionamento do corpo de prova

Foram realizados testes de calibração da estufa, para aferir se a temperatura do controlador era a mesma encontrada na amostra. As mesmas foram condicionadas até atingirem a estabilização da temperatura. A Tabela 9 apresenta a calibração realizada em Dez/16 a qual foi utilizada na pesquisa.

Tabela 9: Calibração da estufa em Dezembro de 2016

Temperatura controlador (°C)	Temperatura da amostra (°C)
-13	-10
1	4
20	20
37	37
54	54

- Inicialização do equipamento;
- Instalação da amostra: Após a moldagem é necessário instalar os extensômetros. Os mesmos foram instalados com a utilização de elásticos (Figura 32). Segundo Nascimento (2015), apesar do elevado custo dos extensômetros MTS, esta abordagem simples dispensa o uso de peças coladas, e tem sido usado facilmente e com sucesso pela Petrobras e na Universidade do Estado da Carolina do Norte, para este tipo de caracterização da mistura.



Figura 32: Amostra instalada

- “Tuning” (ajuste PID): O “Tuning” é um ajuste do seu sistema de teste para que o equipamento responda com precisão o sinal de comando. O ajuste PID, é uma técnica de controle de processos que une as ações derivativa, integral e proporcional, fazendo assim com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e obtido com uma velocidade antecipativa pela ação derivativa. Este processo tornou-se necessário pois o ensaio foi realizado por controle de força, sendo que este modo exige um novo ajuste caso haja uma alteração na amostra, ou que sejam realizadas mudanças no embolo. Entre a Figura 33 a Figura 34 apresentam as imagens do sinal antes e após o ajuste PID.

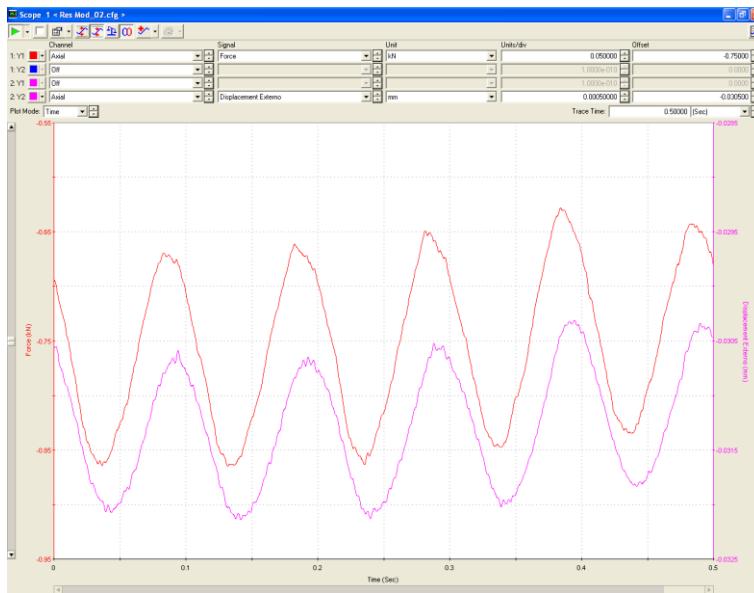


Figura 33: Sinal de força e deslocamento antes do ajuste PID

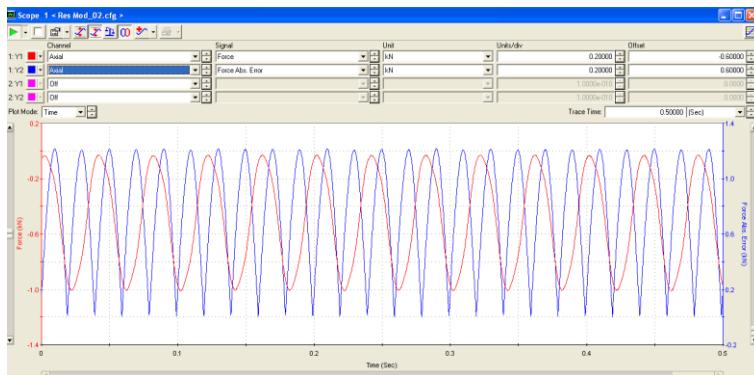


Figura 34: Sinal de força e erro da força após do ajuste PID

O ajuste PID é realizado com carga reduzidas que foram determinadas após testes, sendo que as mesmas não podem ser tão pequenas, pois pode ocorrer interferências do ruído do equipamento.

- Procedimento teste: este procedimento é necessário para seja alcançadas as leituras de deformações de 50 a  $100\mu\epsilon$  nos extensômetros. Para isso a amostra é testada com um número inferior de ciclos nas tensões recomendadas pela AASHTO T 342/10. Este tipo de teste também foi relatado por Clyne *et al.* (2003).
- Realização do ensaio: após o procedimento teste são determinadas as cargas a serem utilizadas no ensaio. As mesmas devem ser inseridas dentro da rotina no MPT, e a aquisição de dados dos últimos 5 ciclos é realizada. Foram armazenados em média 200 pontos na frequência de 25 Hz, por limitação do equipamento, e 500 pontos por ciclo nas outras frequências.

### c) Análise dos dados

As análises foram realizadas de duas forma. Para a composição 1 foi utilizada a metodologia desenvolvida por Mensch (2017) em sua dissertação de mestrado. Já para a composição 2 foi realizada através do aplicativo *Dynamic Property Monitor* (DPM), presente no software controlador da MTS 810. Apesar desta mudança ambas as análises realizam regressão linear para um sinal senoidal real da tensão e da deformação. Para validação de ambos os métodos, os gráficos apresentados na Figura 35 e Figura 36 apresentam o espaço de Black e Plano Cole-cole de uma das misturas da dissertação de Mensch (2017).

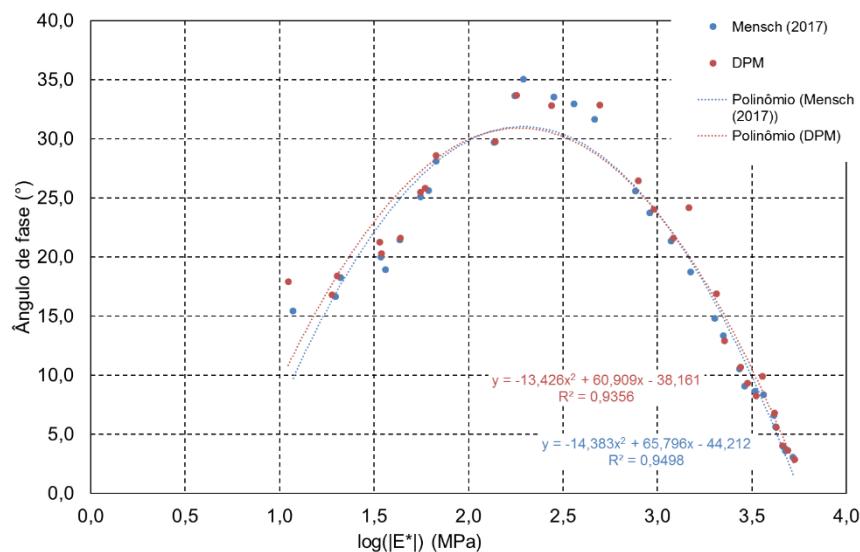


Figura 35: Espaço de Black comparativo para as duas metodologias de análise

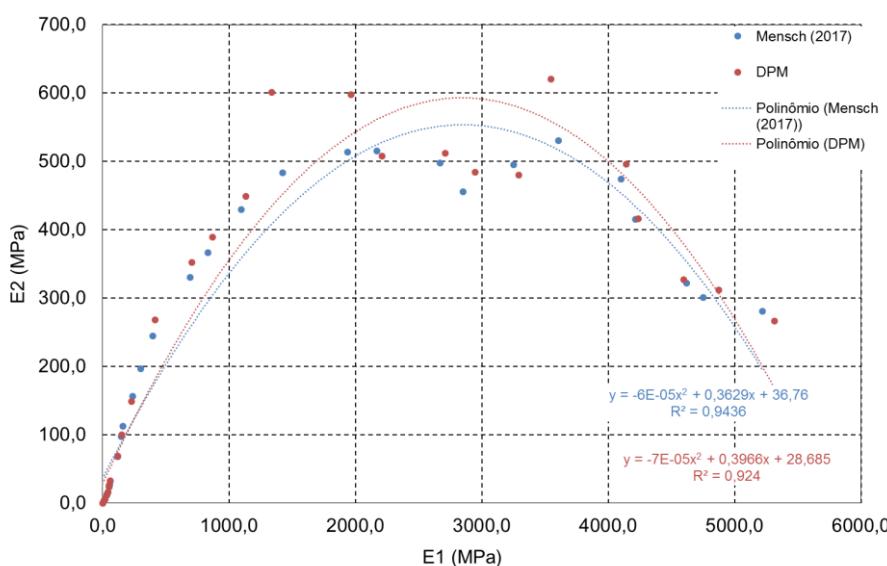


Figura 36: Plano Cole-Cole para as duas metodologias de análise

É possível constatar que os valores tanto de módulo dinâmico, como de ângulo de fase são muitos próximos, mostrando assim que os dados podem ser analisados por ambas metodologias.

Para verificação final da qualidade dos dados o espaço de Black foi traçado uma curva polinomial de segundo com o objetivo de encontrar um  $R^2$  mínimo de 0,90 na média dos resultados dos ensaios. O ajuste do plano Cole-cole também foi utilizado uma polinomial de segundo grau.

Para formação de curva mestra foi utilizado como modelo de sobreposição tempo-temperatura o princípio de WLF na temperatura de referência de 21°C ou 20°C. Como modelo de ajuste dos pontos da curva mestra para o módulo dinâmico foi utilizada uma ajuste sigmoidal (Equação 16), a qual foi modelada com o auxílio da ferramenta Solver do Microsoft Office Excel até encontrar a menor soma dos erros quadráticos obtido pela Equação 17, conforme recomendações de Yusoff et al. (2011). Já a curva mestra do ângulo de fase foi ajustada utilizando uma polinomial de sexto grau.

$$SSE = \sum \frac{(\log |E^*|_{\text{exp}} - \log |E^*|_{\text{calc}})^2}{(\log |E^*|_{\text{exp}})^2} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

SSE = somatório dos erros quadráticos;

$|E^*|_{\text{exp}}$  = módulo dinâmico obtido experimentalmente;

$|E^*|_{\text{calc}}$  = módulo dinâmico calculado pelo ajuste do modelo sigmoidal.

Também foi realizado a inferência a fadiga e deformação permanente das misturas estudadas com base nos dados experimentais. A correlação com a fadiga foi realizada com o parâmetro  $|E^*| \cdot \text{sen}\varphi$  na temperatura de ensaio de 21°C ou 20°C. Já, para a análise de deformação permanente foi utilizada a correlação  $|E^*| \cdot \text{sen}\varphi$  nas temperaturas de 37 ou 40 e 54°C.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES PARA AS MISTURAS QUENTE E MORNAS

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, seguindo os procedimentos definidos na metodologia apresentada no capítulo anterior. Foram utilizadas duas composições com e sem adição de aditivo surfactante.

### 4.1. TEMPERATURAS DE MISTURA E COMPACTAÇÃO

As temperaturas foram obtidas conforme a viscosidade do ligante e seguindo a metodologia apresentada anteriormente. A Tabela 10 apresenta as temperaturas utilizadas.

Tabela 10: Temperatura do agregado, ligante e compactação

	Composição 1		Composição 2	
	Quente	Quente	Quente	Morno
Agregados	163°C	163°C	180°C	150°C
Ligante	153°C	153°C	170°C	170°C
Compactação	140°C	140°C	152°C	122°C

### 4.2. LIGANTES ASFÁLTICOS

Foram realizados ensaios de adesividade pelo método visual através da norma DNER – ME 78/94. Para o ligante convencional 50/70 foi necessária a adição de 2% de cal para garantir a adesividade.

O resumo da caracterizações desses ligantes encontra-se na

Tabela 11.

Tabela 11: Propriedades dos cimentos asfálticos

Ensaio	Método	CAP 50/70	AMP 60/85	Unidade
Viscosidade Brookfield a 135°C	NBR 15184	327,5	1717	cP
Viscosidade Brookfield a 150°C	NBR 15184	165	722	cP
Viscosidade Brookfield a 177°C	NBR 15184	61,5	303,5	cP
Densidade de materiais betuminosos	NBR 6296	1,0091	1,013	g/cm <sup>3</sup>
Ponto de amolecimento	NBR 6560	48	66	°C
Penetração, 25°C, 100g	NBR 6576	61	53	0,1mm
Recuperação elástica, 25°C, 20 cm	NBR 15086	-	92	%

#### 4.3. COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A faixa granulométrica utilizada é a faixa C do DNIT ES 031/2006. Para a composição 1 a dosagem foi realizada em laboratório, por não ser um traço em uso pela concessionária, mas por ser de grande interesse no estudo de misturas usuais no Rio Grande do Sul. Já a composição 2 é a mesma utilizado na usina da Triunfo/Concepá localizada no município de Eldorado, sendo o projeto de dosagem realizado pela Solotest em Maio/2016.

A faixa granulométrica utilizada nas duas misturas asfálticas está apresentada na Figura 37. O resumo das porcentagens de cada agregado na curva granulométrica está apresentado na Tabela 12.

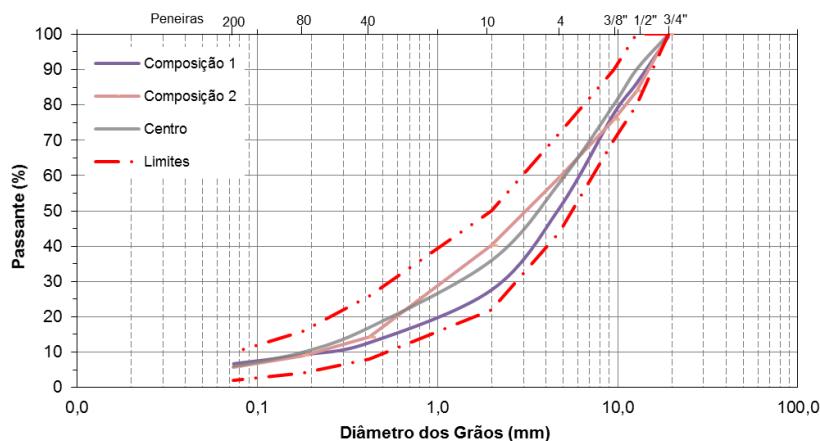


Figura 37: FaixaS granulométricaS

Tabela 12: Porcentagem de agregado em cada mistura

	Brita 3/4	Brita 3/8	Pó de pedra	Fíller (Cal)
Composição 1	24%	24%	50%	2%
Composição 2	25%	15%	60%	0%

#### 4.4. DOSAGEM MARSHALL

A composição 1 foi dosada a partir da metodologia Marshall. Os resultados referentes à dosagem estão apresentados na **Figura 38**.

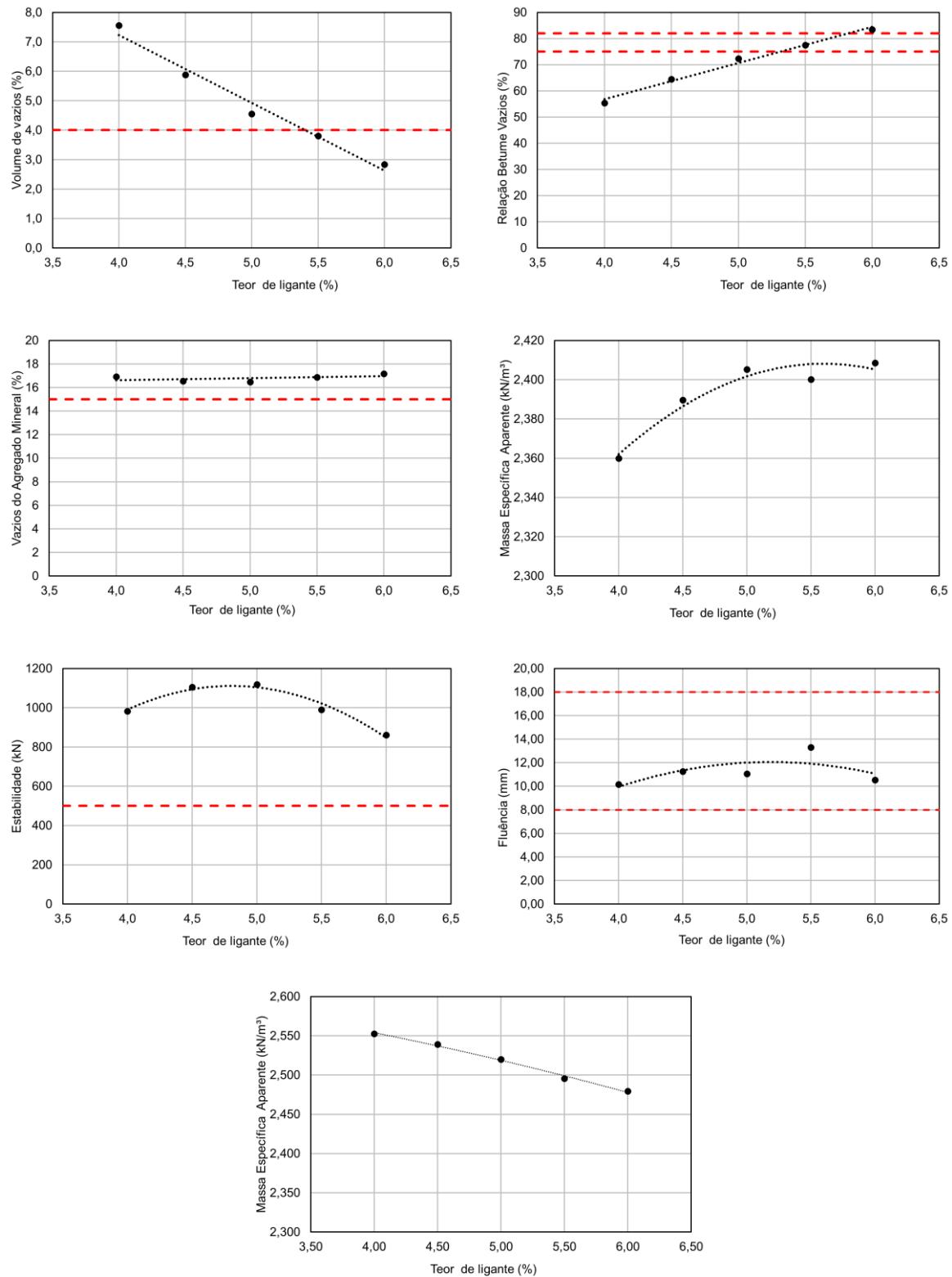


Figura 38: Resultados da dosagem da Composição 1

O resumo dos parâmetros finais obtidos durante o processo de dosagem para ambas as composições estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados da dosagem da composição 1

Propriedade	DNIT - ES 031/2006 Capa	Composição 1		Composição 2
		Quente	Morno	Quente
Teor de Betume (%)	--	5,30	5,30	5,24
Volume de Vazios (%)	3 a 5	3,95	4,14	3,57
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	75,8	75,4	78,2
Vazios do Agregado Mineral (%)	> 15	16,6	16,8	16,3
Massa Esp. Max. Medida (kN/m <sup>3</sup> )	--	25,06	25,06	23,74
Massa Esp. Aparente (kN/m <sup>3</sup> )	--	24,59	24,06	22,89
Estabilidade (kgf)	> 500	1066	639	1292
Fluênciça (1/100 in)	8 a 18	12,0	11,3	11,6

#### 4.5. RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Figura 39. Pela especificação DNIT 031/2006 - Capa os valores de resistência a tração devem ser maiores que 0,65MPa para os projetos Faixa C.

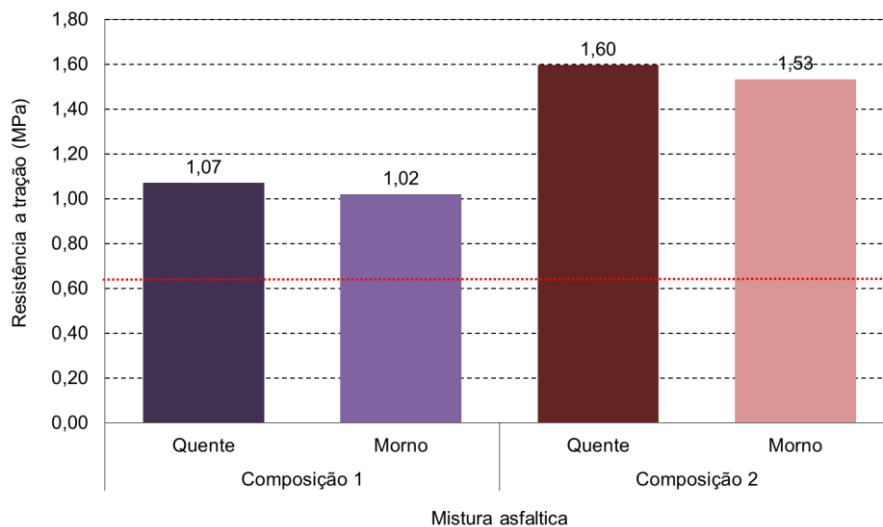


Figura 39: Resistência à tração por compressão diametral das misturas no teor de projeto

Pode-se observar que todas as misturas atingiram resistência à tração acima da exigida pela especificação, validando o teor de projeto selecionado. Também há uma tendência das misturas mornas apresentarem menor resistência a tração em relação a mistura de referência.

#### 4.6. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os resultados para o módulo de resiliência estão apresentados na Figura 40.

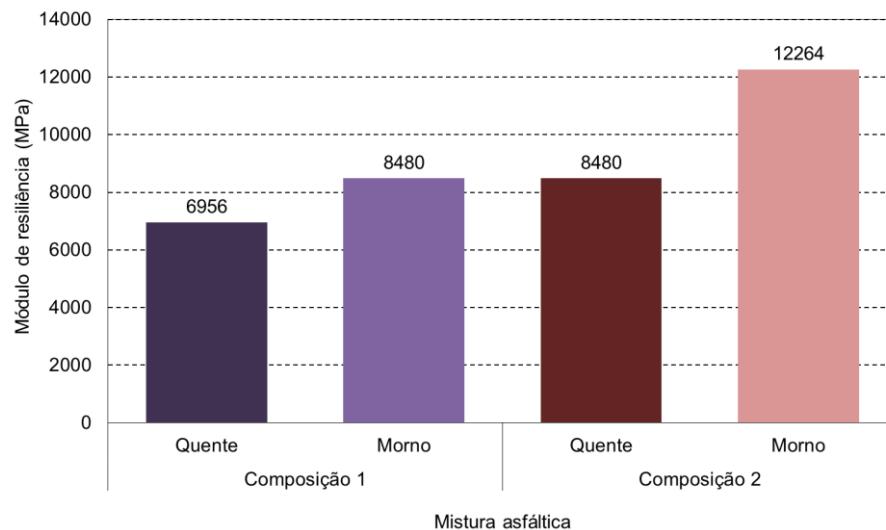


Figura 40: Módulo de resiliência das misturas no teor de projeto

Através da figura acima observasse que a Composição 2 possui módulos de resiliência superiores, mostrando assim possuir uma maior rigidez. Em relação a mistura morna não se encontra uma tendência em relação a mistura quente.

#### 4.7. ENSAIO DE MÓDULO DINÂMICO

O ensaio de módulo dinâmico foi realizado conforme metodologia do Capítulo 3.

##### 4.7.1. Propriedades volumétricas das amostras

A fim de testar em laboratório a metodologia discutida no capítulo anterior foram empregadas amostras compactadas no compactador giratório Superpave do Laboratório de Pavimentação da UFRGS. Os parâmetros de densidade aparente foram determinados conforme NBR 15573/12, e de densidade máxima medida através da NBR 15619/12. Também foi determinada a porcentagem de volume de vazios das amostras. As propriedades volumétricas dos corpos de provas utilizados nos ensaios de módulo dinâmico estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14: Propriedades volumétricas das amostras

Mistura		Nº CP	h (cm)	d (cm)	Densidade aparente (kN/m <sup>3</sup> )	Densidade máx. medida (kN/m <sup>3</sup> )	Volume de vazios (%)
Composição 1	Quente	8	14,84	10,00	2,358	2,506	5,9
		9	14,85	10,00	2,361	2,506	5,8
		10	14,95	10,00	2,367	2,506	5,6
	Morno	9	14,95	10,00	2,362	2,506	5,7
		11	14,83	10,00	2,376	2,506	5,2
		15	14,92	10,00	2,370	2,506	5,4
		17	14,90	10,00	2,365	2,506	5,6
		1	14,88	10,00	2,231	2,374	6,0
	Quente	2	14,90	10,00	2,241	2,374	5,6
Composição 2	Morno	1	14,82	10,00	2,247	2,374	5,4
		2	14,84	10,00	2,242	2,374	5,5

#### 4.7.2. Módulo dinâmico e ângulo de fase

Nos itens a seguir são apresentados a representação dos resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase no espaço de Black, plano Cole-Cole, curva mestra para o módulo dinâmico e ângulo de fase. Primeiramente são apresentados os resultados de uma mesma mistura com e sem aditivo surfactante, e por último um resumo com todas as misturas utilizadas no estudo, para permitir a análise da influência do ligante, granulometria e da adição do surfactante no comportamento viscoelástico das misturas.

##### a) Espaço de Black

O espaço de Black é a representação do logaritmo do módulo dinâmico em função do ângulo de fase. Esta representação semi-log permite que sejam melhor analisados/visualizados os dados em altas temperaturas. Bem como no plano complexo, o espaço de Black também permite mostrar a relação de independência da temperatura e frequência dos parâmetros de módulo dinâmico e ângulo de fase.

Segundo Kim (2009) o espaço de Black e o plano Cole-Cole podem ser também utilizados para aferir a qualidade dos dados de teste. Por este motivo foram plotados nos gráficos do Espaço de Black os pontos de todas as amostras, para que seja possível observar a dissipação dos dados.

Sobre os resultados obtidos nos ensaios, é possível observar que até a temperatura de 21 à 37°C há um aumento do ângulo de fase, e depois uma queda do mesmo para todas as misturas. Com relação ao módulo dinâmico ele vai diminuindo com o aumento da temperatura, comportamento característico das misturas asfálticas.

A Figura 41 e a Figura 42 apresentam o ajuste polinomial de segundo grau no espaço de Black e os valores médios para cada mistura separadamente.

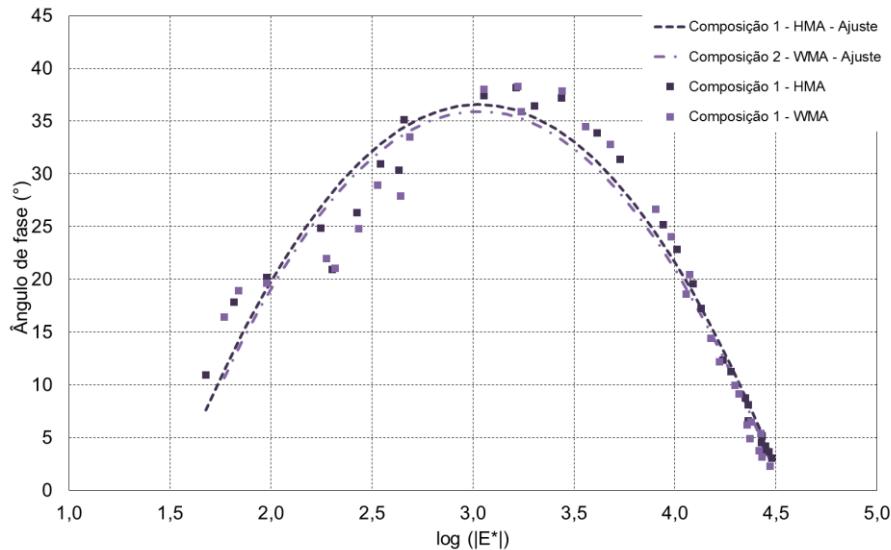


Figura 41: Espaço de Black para as misturas da composição 1

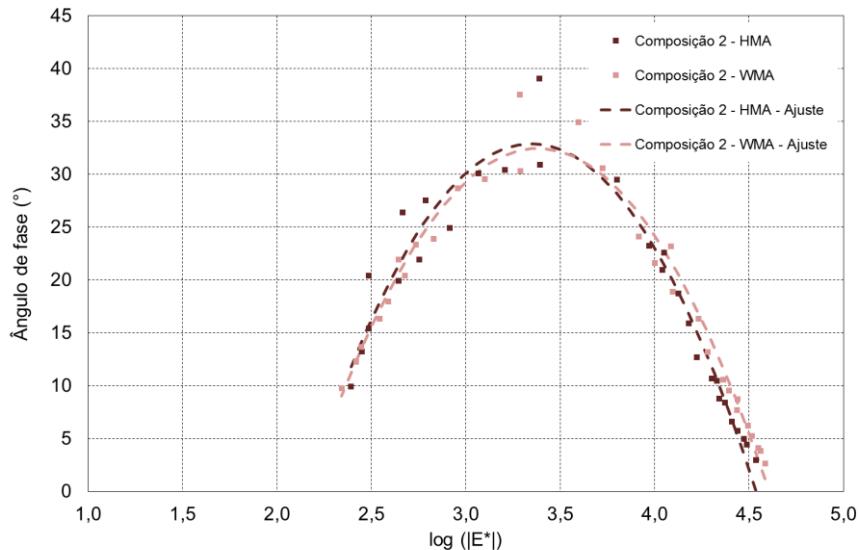


Figura 42: Espaço de Black para as misturas da composição 2

A dissipação dos dados é mais evidente na mistura modificada por polímero. Também pode-se observar que a curva dos valores médios com o ajuste da polinomial de segundo grau apresenta um

bom ajuste. Com relação as misturas mornas não é possível observar uma variação expressiva com relação a mistura de referência.

Comparando todas as misturas na Figura 43 nota-se a influência do ligante nas propriedades viscoelásticas das misturas.

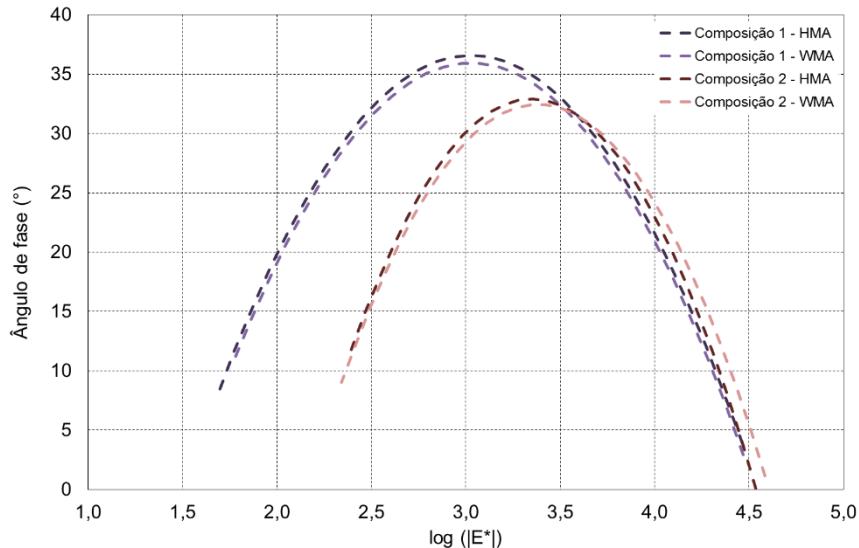


Figura 43: Espaço de Black para todas as misturas

A mistura com ligante AMP 60/85 (Composição 2) apresenta os menores ângulo de fase, demonstrando assim que a adição do polímero auxilia na fase elástica da mistura asfáltica. A mistura com CAP 50/70 (Composição 1) apresentou maiores ângulo de fase caracterizando assim uma parcela viscosa mais predominante. Essa mistura também apresenta uma maior variação dos valores de modulo dinâmico, mostrando ser mais suscetível termicamente.

#### b) Plano Cole-Cole

O plano Cole-cole representa o módulo de perda ( $E_2$ ) em função do módulo de armazenamento ( $E_1$ ). Este tipo de representação torna-se importante por apresentar a energia dissipada e armazenada pela mistura asfáltica.

A redução dos valores de  $E_2$  representam uma redução do comportamento viscoso irreversível a energia dissipada em relação a mistura quente, ou seja, ao se deformar apresenta um maior retorno as condições iniciais e maior capacidade de atenuação dos esforços aplicados. Já com os valores  $E_1$  pode-se analisar a parte recuperável, ou seja, elástica.

A Figura 44 e Figura 45 estão apresentados os ajustes polinomiais de segundo grau no plano Cole-cole para cada uma das misturas estudadas.

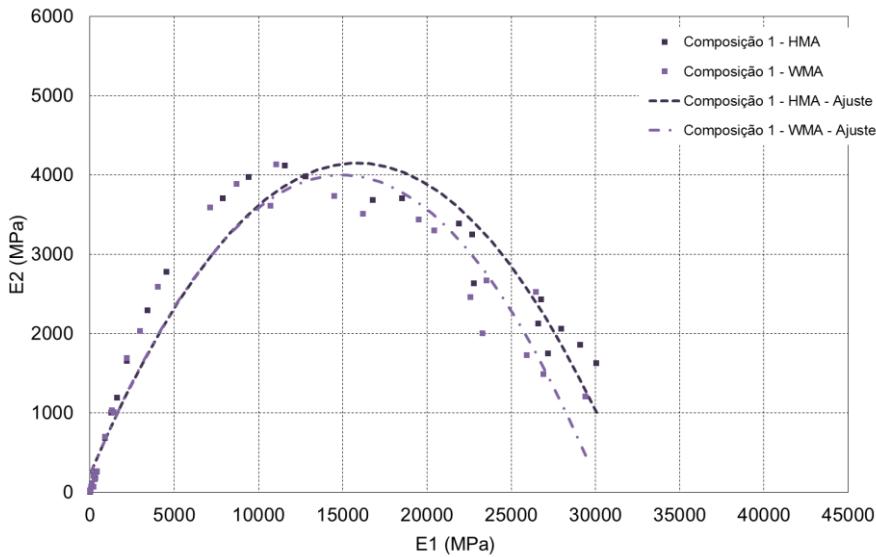


Figura 44: Plano Cole-cole para as misturas da composição 1

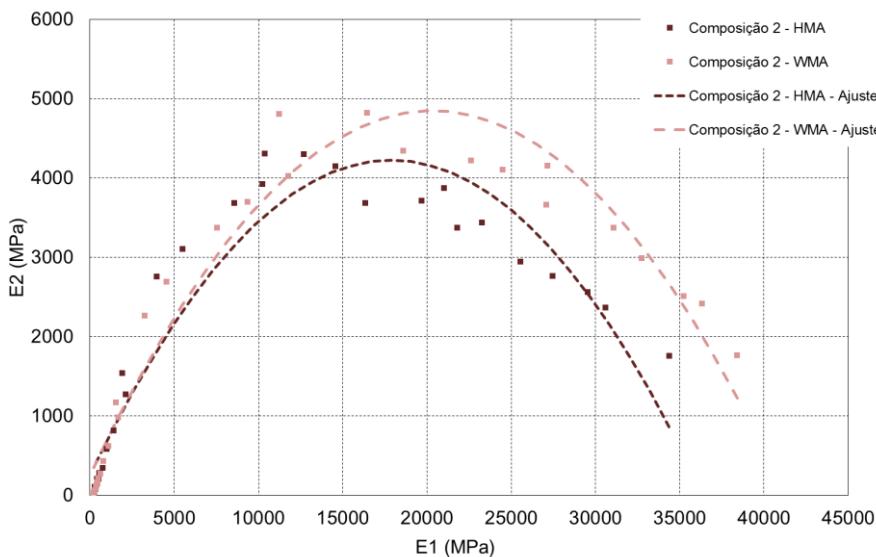


Figura 45: Plano Cole-cole para as misturas da composição 2

Para a Composição 1 a mistura morna não apresenta variação expressiva em relação a mistura quente. Já para a Composição 2 a mistura morna apresenta maior concavidade, possuindo maiores parcelas elásticas e viscosas.

A Figura 46 apresenta o plano Cole-Cole de todas as misturas desse estudo.

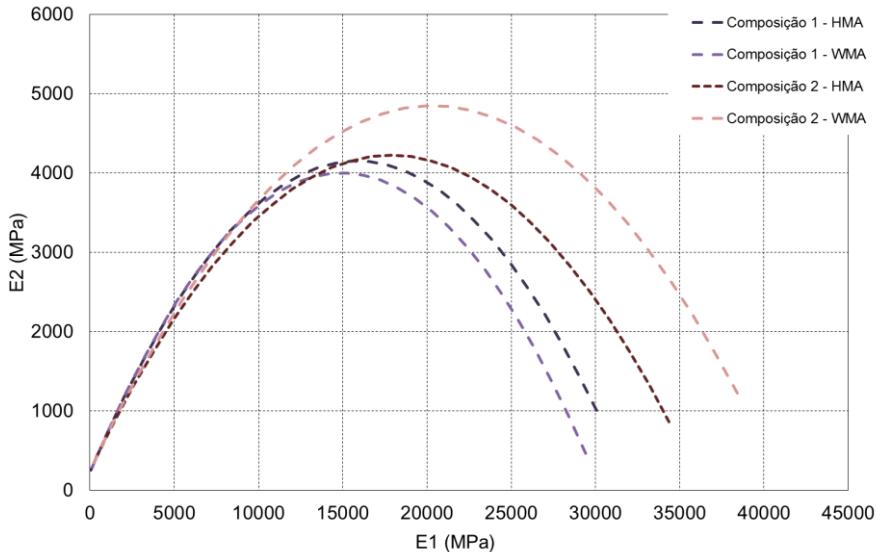


Figura 46: Plano Cole-cole para as todas as misturas

Mensch (2017) havia constatado que as misturas mornas possuíam menor concavidade no plano Cole-Cole, sendo assim, estas misturas possuíam maior capacidade de atenuação dos esforços, ocorrendo um menor acionamento dos agregados para suportar as cargas ao qual o pavimento é submetido. Em relação ao estudo atual, não é identificado um padrão de comportamento com relação a mistura morna, o que nos mostra que talvez a origem da matriz pétreia possa também alterar as propriedades viscoelásticas.

### c) Curva mestra do módulo dinâmico

As curvas mestras do módulo dinâmico apresentam uma caracterização geral da rigidez da mistura asfáltica em relação a frequência de aplicação de carga e temperatura de ensaio. Para esta análise é utilizado o princípio da superposição tempo-temperatura, sendo a temperatura de referência 20 e 21°C e ajuste sigmoidal da curva.

As misturas asfálticas apresentam um comportamento típico onde o módulo cresce com o aumento da frequência. Nas altas frequências ocorre um pequeno tempo de carregamento sendo possível observar um comportamento elástico do material. Já nas baixas frequências o comportamento é oposto, onde é possível observar as deformações viscoelásticas do material. Sobre o desempenho da mistura asfáltica as baixas frequências estão relacionadas a ocorrência de deformação permanente, já as frequências intermediárias estão relacionadas ao dano por fadiga

A Figura 47 apresenta o ajuste sigmoidal das curvas mestras do módulo dinâmico para as misturas utilizadas na pesquisa.

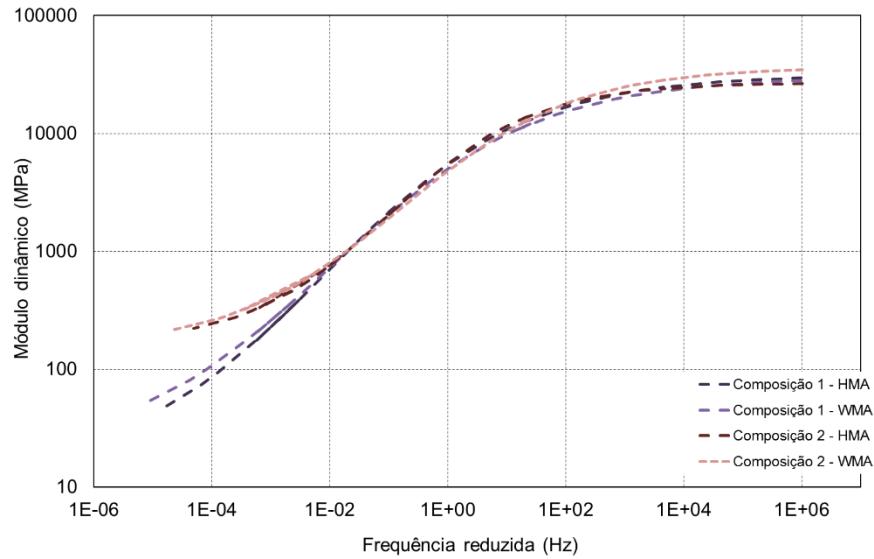


Figura 47: Curva mestra para todas as misturas

Em geral é possível observar que as misturas mornas não apresentam uma variação expressiva dos valores de modulo de dinâmico. A Composição 2 apresenta menor susceptibilidade térmica, por apresentar menor variação do modulo dinâmico ao longo de todo o ensaio, o que já é esperado para uma mistura com ligante modificado.

Realizando a análise das altas frequências (Figura 48) é possível observar que todas as misturas possuem valores de módulos muito parecidos, sendo que a mistura morna da Composição 2 possui os módulos mais elevados.

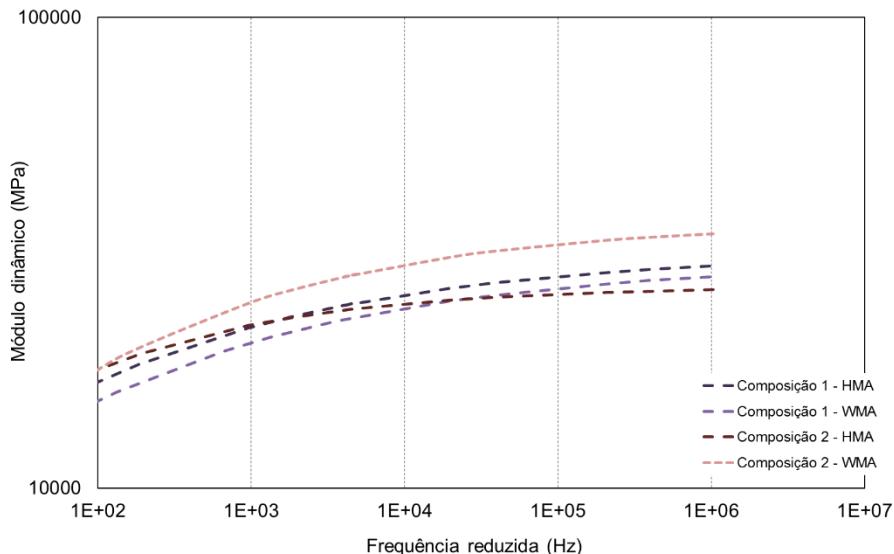


Figura 48: Curva mestra para todas as misturas nas altas frequências

Já para as frequências médias (Figura 49) comportamento das misturas mornas fica mais próximo, demonstrando que o comportamento à fadiga em relação as misturas com e sem aditivo não devem possuir uma variação expressiva.

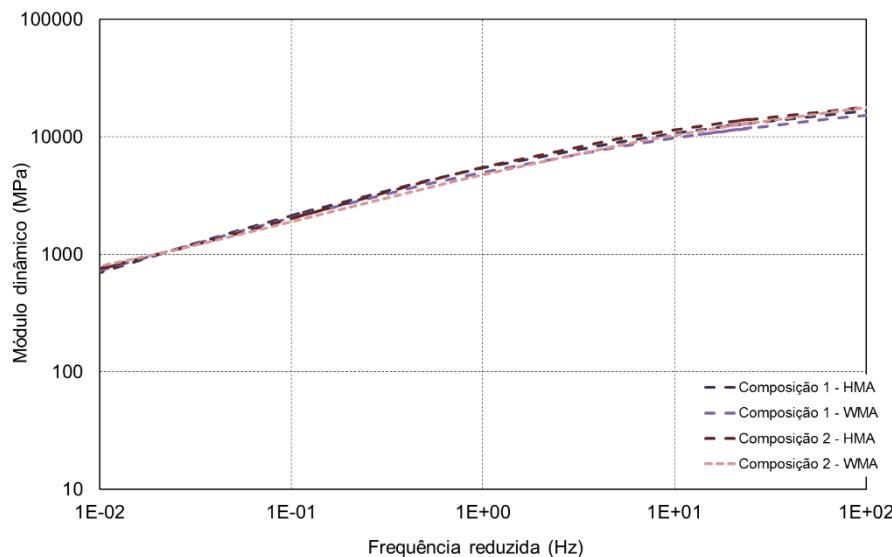


Figura 49: Curva mestra para todas as misturas nas médias frequências

A Figura 50 apresenta o resultado da curva mestra do módulo dinâmico nas baixas frequências. Nestas frequências as misturas mornas apresentam módulos superiores ao da mistura de referência, sendo que a Composição 2 possui maiores módulos o que já é esperado para uma mistura com ligante modificado.

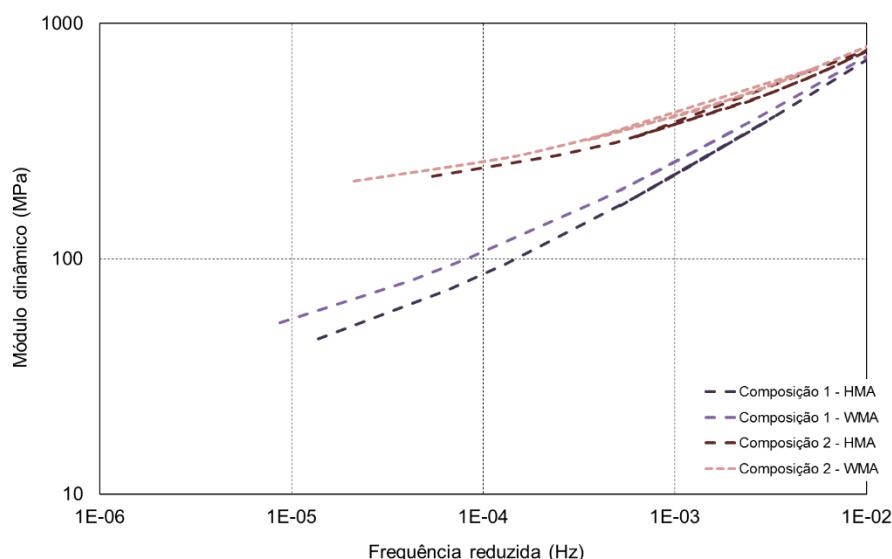


Figura 50: Curva mestra para todas as misturas nas baixas frequências

d) Curva mestra do ângulo de fase

A Figura 51 apresentam as curvas mestras para o ângulo de fase. Pode-se observar que em geral os valores de ângulo de fase para as misturas mornas são bem próximos ao da mistura quente. A mistura com adição de polímero (Composição 2) apresenta menores ângulos de fase, representando uma maior fase elástica, o que é característico para misturas este tipo de ligante asfáltico. Já o ligante convencional apresenta comportamento mais viscoso, sendo assim mais suscetível a deformações irreversíveis.

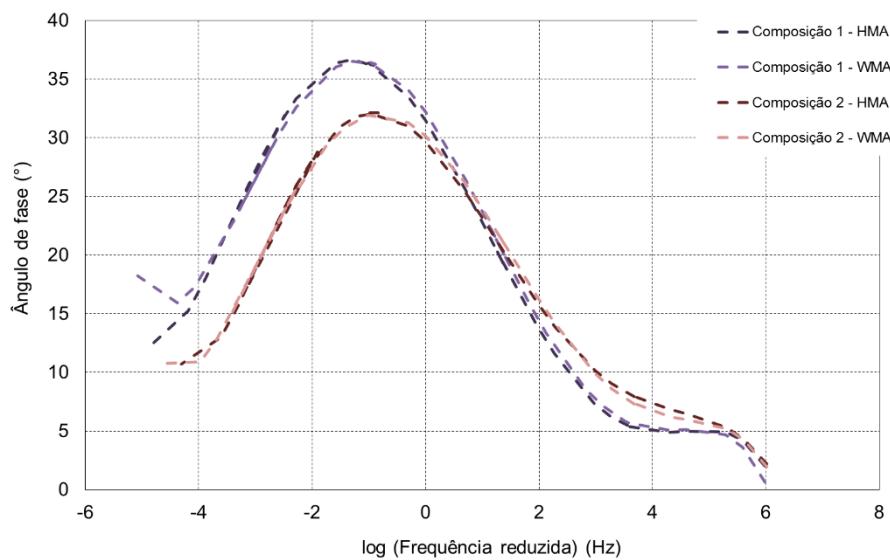


Figura 51: Curva mestra do ângulo de fase para todas as misturas

e) Inferência a fadiga e deformação permanente

A Figura 52 apresenta a função do fator de fadiga em relação a frequência de ensaio na temperatura de 20°C. Os menores valores de  $|E^*| \cdot \text{sen}\varphi$  são os que apresentam um melhor comportamento a fadiga.

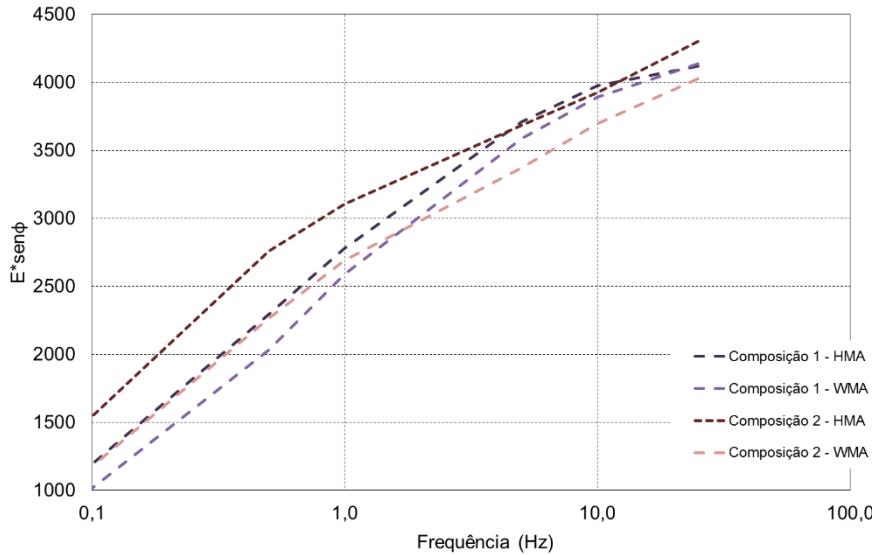


Figura 52: Inferência a fadiga para todas as misturas na temperatura de 20°C

Observasse que a Composição 2 morna apresenta o melhor comportamento a fadiga. O que não era esperado, e necessita de maior investigação, é a mistura quente da Composição 2 possuir comportamento a fadiga inferior a mistura com ligante convencional, o que não é verificado na bibliografia.

A Figura 53 apresenta os valores do fator de deformação permanente em função da frequência na temperatura de 54°C. A análise deve ser realizada de modo que os maiores valores de  $|E^*|/\text{sen}\phi$  são os que apresentam melhor comportamento a deformação permanente.

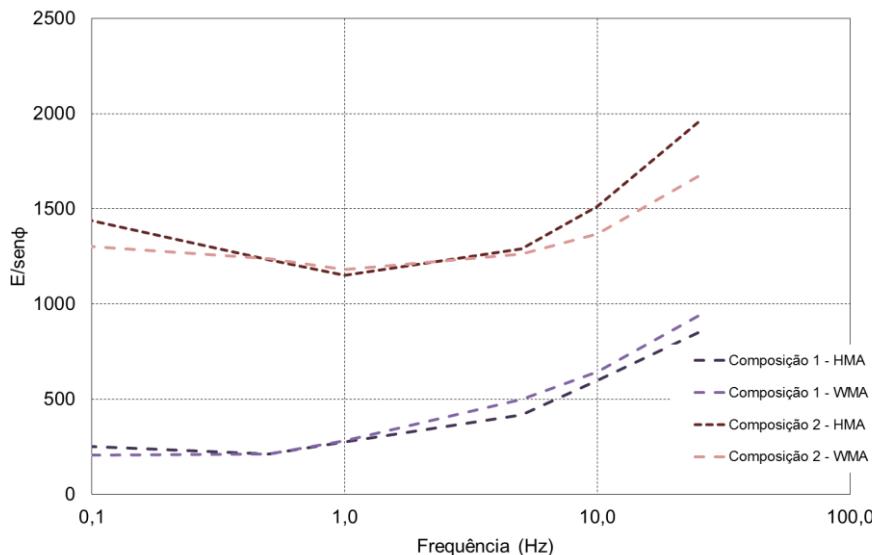


Figura 53: Inferência a deformação permanente para todas as misturas na temperatura de 54°C

Como já esperando o ligante convencional (Composição 1) foi o que apresentou o pior comportamento a deformação permanente. Já as misturas mornas não apresentaram um padrão de comportamento em relação a mistura de referência.

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES ADICIONAIS

Como análise adicional aos objetivos iniciais desta pesquisa foram realizados ensaios mecânicos com a mistura coletada na usina de Eldorado. Os resultados mostram um comparativo entre os dados obtidos a partir do traço de projeto (Composição 2), e do traço resultante da usinagem (Composição 3).

Foram utilizados a mesma metodologia apresentada anteriormente. A mistura proveniente da usina foi aquecida na temperatura de compactação e os corpos de prova para os ensaios foram moldados, obtendo o volume de vazios apresentado na Tabela 15 para os corpos de prova utilizados no ensaio de módulo dinâmico.

Tabela 15: Propriedades volumétricas das amostras

Mistura		Nº CP	h (cm)	d (cm)	Densidade aparente (kN/m <sup>3</sup> )	Densidade máx. medida (kN/m <sup>3</sup> )	Volume de vazios (%)
<b>Composição 3</b>	<b>Quente</b>	1	14,89	10,00	2,311	2,434	5,1
		2	14,89	10,00	2,288	2,434	6,0

A Figura 54 mostra os resultados de resistência a tração. A mistura proveniente da usina possui valor superior aos da misturas moldadas em laboratório.

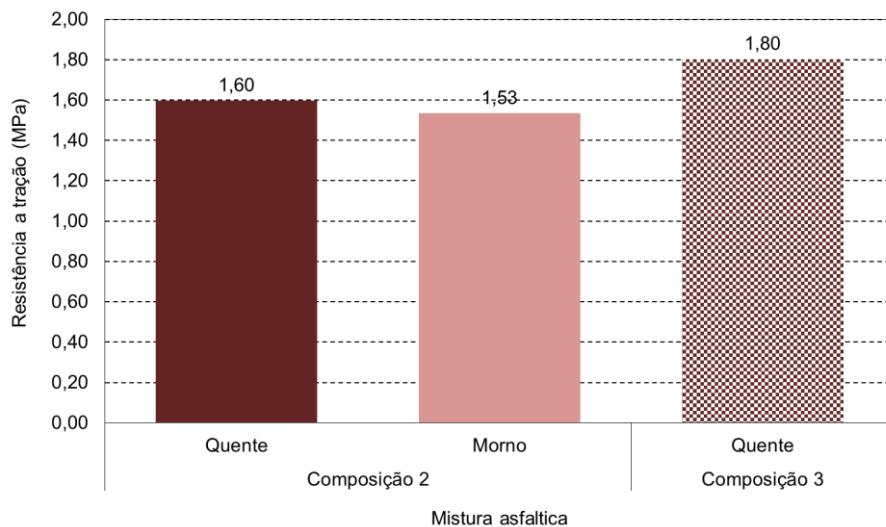


Figura 54: Resistência à tração por compressão diametral das misturas

O módulo de resiliência (Figura 55) da mistura da usina também possui valores maiores em relação a mistura quente, mas ainda assim inferiores ao da mistura morna produzida em laboratório.

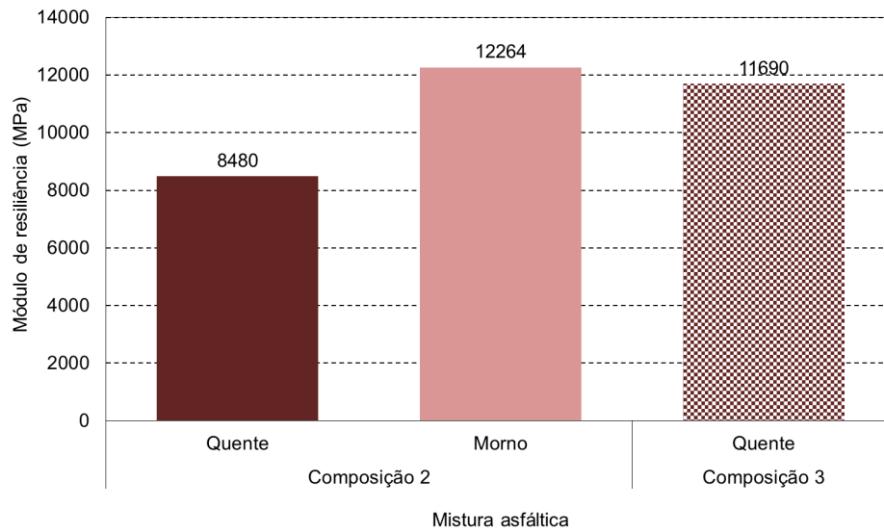


Figura 55: Módulo de resiliência das misturas no teor de projeto

O espaço de Black (Figura 56) apresenta concavidade muito parecida aos da mistura de laboratório, porém com maior variação do módulo dinâmico, mostrando assim ser mais suscetível termicamente.

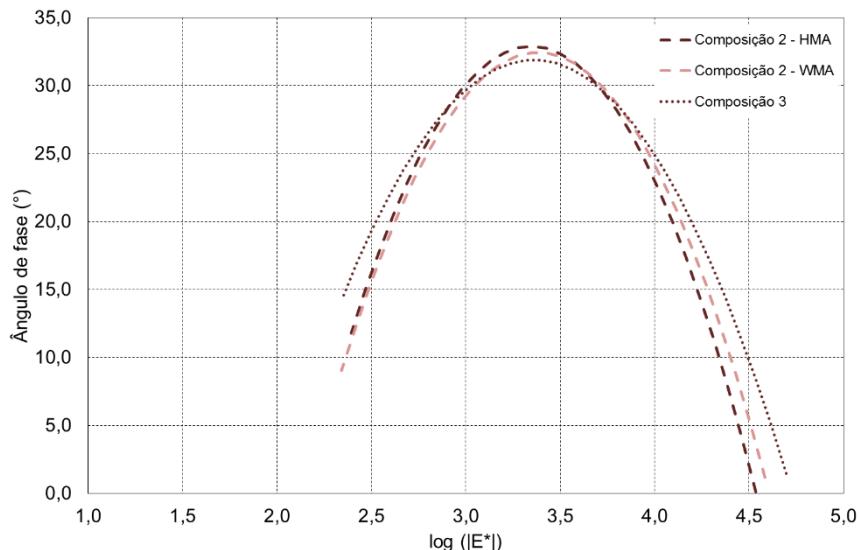


Figura 56: Espaço de Black

A Composição 3 no Plano Cole-Cole (Figura 57) apresenta maior concavidade, possuindo maiores parcelas elásticas e viscosas. Esse comportamento também demonstra uma menor capacidade de atenuação dos esforços da mistura usinada, ocorrendo assim um maior acionamento dos agregados para suportar as cargas ao qual o pavimento é submetido.

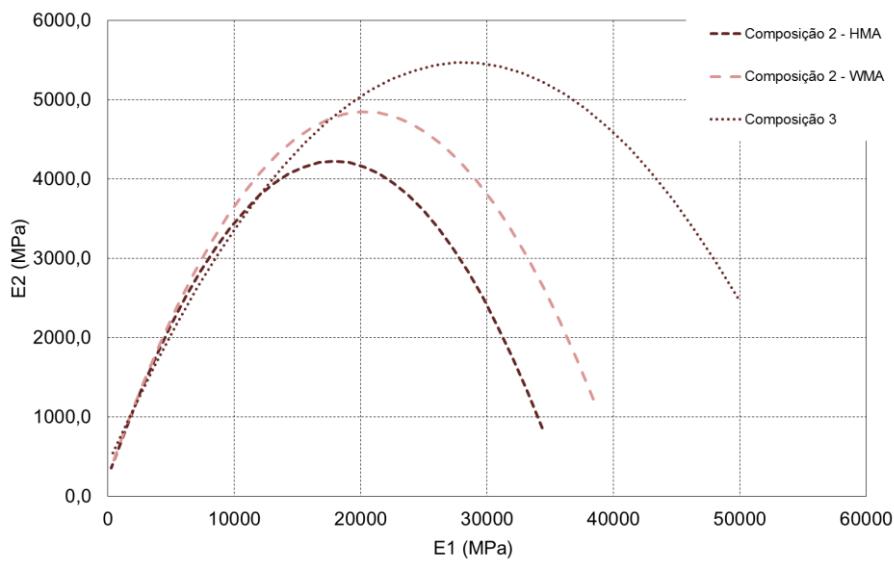


Figura 57: Plano Cole-Cole

A Figura 58 apresenta a curva mestra das misturas objeto desse estudo adicional. A Composição 3 apresenta valores visivelmente maiores de modulo de dinâmico ao longo de toda a curva mestra, mostrando assim possuir mais rigidez, corroborando com os resultados do ensaio de resistência a tração.

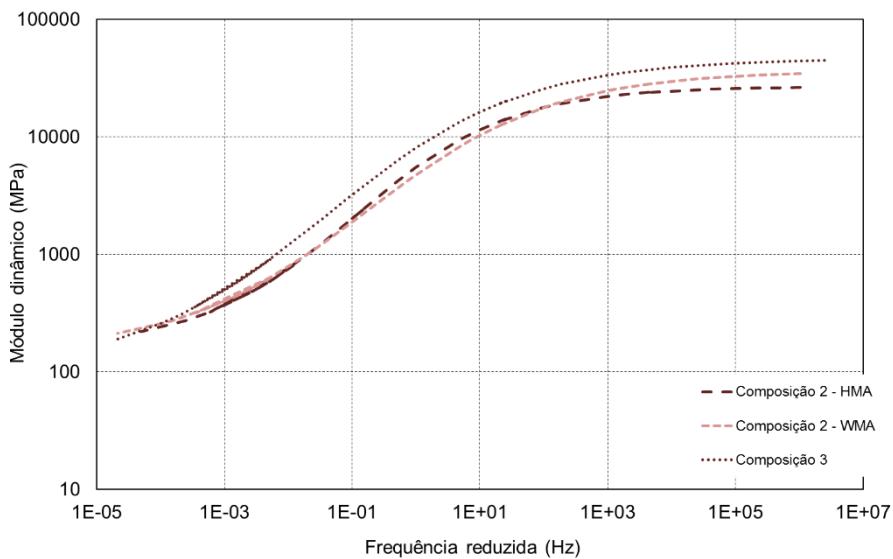


Figura 58: Curva mestra do módulo dinâmico

A curva mestra do ângulo (Figura 59) de fase apresenta valores levemente superiores aos da Composição 2, apresentando comportamento mais viscoso, e mais suscetível a deformações irreversíveis.

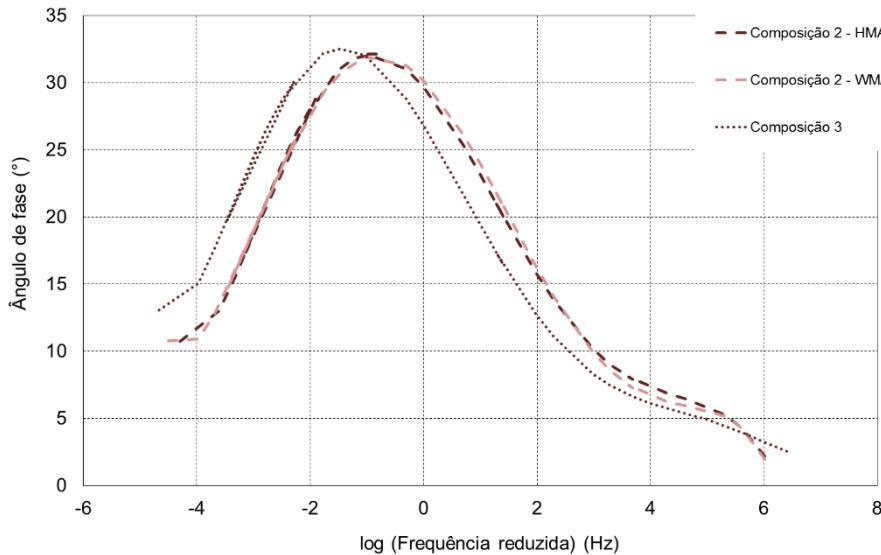


Figura 59: Curva mestra do ângulo de fase

A inferência a fadiga (Figura 60) através dos parâmetros Superpave mostra que a Composição 3 possui comportamento inferior a fadiga em relação a Composição 2. Assim como no caso da deformação permanente (Figura 61) onde a mistura usinada possui pior comportamento. Supostamente esse comportamento se deve ao envelhecimento causado na mistura no processo de usinagem.

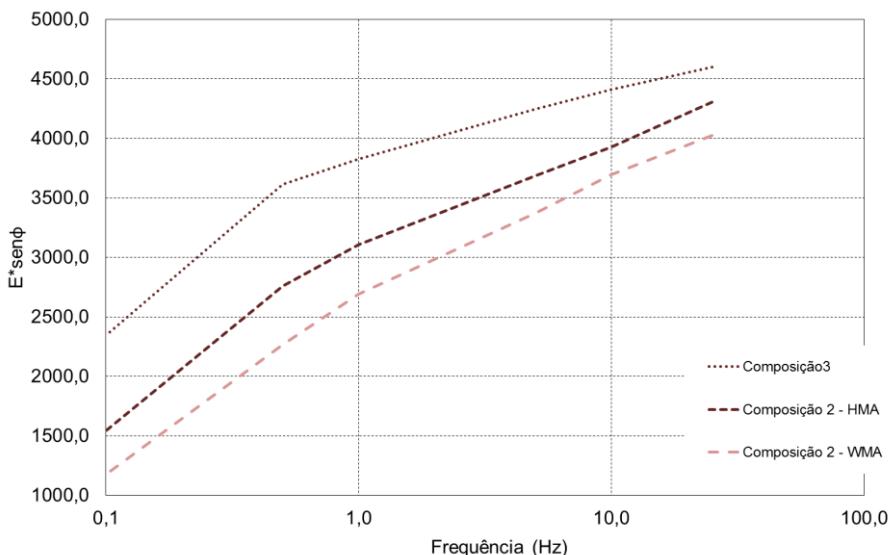


Figura 60: Inferência a fadiga na temperatura de 20°C

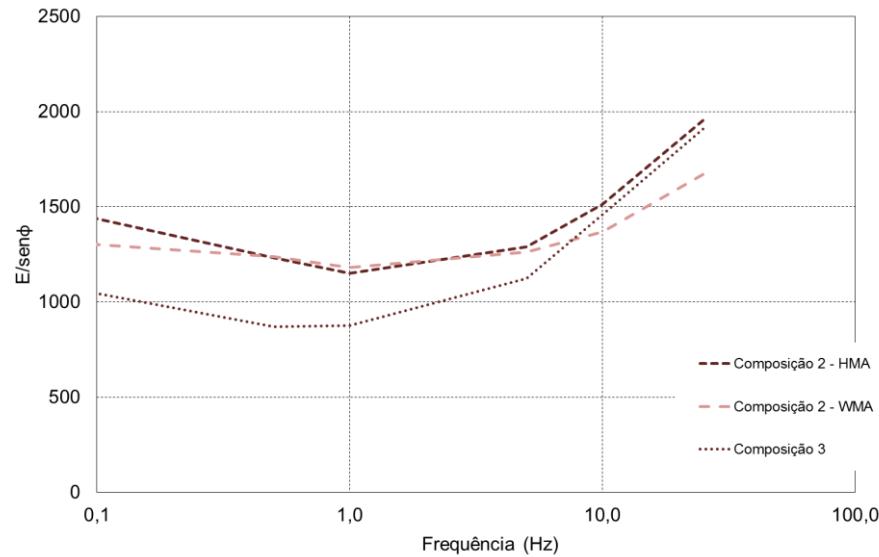


Figura 61: Inferência a deformação permanente na temperatura de 54°C

## 6. CONCLUSÕES

O objetivo inicial dessa pesquisa visava obter parâmetros viscoelásticos de misturas asfálticas quentes e mornas comumente utilizada em rodovias do Rio Grande do Sul, usando um aditivo surfactante para as misturas mornas. Além disso ao longo da pesquisa foi proposto um tópico adicional de análise da mistura proveniente da usina em comparação com a produzida em laboratório.

A partir das análises realizadas para as Composições 1 e 2 no capítulo anterior é possível concluir:

- Os ensaios de resistência a tração e módulo de resiliência não apresentam um padrão de comportamento em relação a mistura morna, sendo que a mistura da Composição 2 apresenta comportamento superior.
- No ensaio de módulo dinâmico, em geral, é possível observar que as misturas mornas não apresentam uma variação expressiva dos valores de módulo dinâmico e ângulo de fase em relação a mistura de referência.
- A mistura com ligante AMP 60/85 (Composição 2) apresenta os menores ângulos de fase, demonstrando assim que a adição do polímero auxilia na fase elástica da mistura asfáltica. A mistura com CAP 50/70 (Composição 1) apresentou maiores ângulos de fase caracterizando assim uma parcela viscosa mais predominante. Essa mistura também apresenta uma maior variação dos valores de módulo dinâmico, mostrando ser mais suscetível termicamente.
- No Plano Cole-Cole não é identificado um padrão de comportamento com relação a mistura morna, o que nos mostra que talvez a origem da matriz pétreia possa também alterar as propriedades viscoelásticas.
- Observou-se uma discrepância na realização a inferência a fadiga, onde pode ser identificado que a mistura quente da Composição 2 possui comportamento a fadiga inferior a mistura com ligante convencional, o que não é verificado nas bibliografias.
- A Composição 1 foi o que apresentou o pior comportamento na inferência a deformação permanente.

Com relação a análise adicional, é possível concluir para as Composições 2 e 3:

- Os resultados de módulo de resiliência e resistência a tração obtiveram valores superiores para a Composição 3, apresentando assim maior rigidez.
- No ensaio de módulo dinâmico a Composição 3 apresenta valores visivelmente maiores de módulo dinâmico ao longo das análises realizadas. Já o ângulo de fase apresenta valores levemente superiores aos da Composição 2, apresentando comportamento mais viscoso.
- A Composição 3 no Plano Cole-Cole apresentou maior concavidade, possuindo maiores parcelas elásticas e viscósas. Esse comportamento também demonstra uma menor capacidade de atenuação dos esforços da mistura usinada, ocorrendo assim um maior acionamento dos agregados para suportar as cargas ao qual o pavimento é submetido.

A inferência a fadiga e a deformação permanente mostraram que a mistura proveniente da usina possui performance inferior à da produzida em laboratório. Essa comportamento se

caracteriza principalmente devido ao envelhecimento durante o processo de usinagem da mistura asfáltica.

Conforme previsto no escopo do projeto foi realizado uma reunião na sede da Triunfo|Concepa de forma a compartilhar com a equipe de apoio a metodologia utilizada, os resultados obtidos e as conclusões da pesquisa. A reunião foi de grande valia para auxiliar no fechamento deste relatório e também para contar com a opinião da equipe de apoio que trabalha na prática de realização e análise de pavimento rodoviários. A Figura 62 apresenta uma foto da reunião realizada no dia 29/06/2017.



Figura 62: Reunião de trabalho com a Triunfo|Concepa

Na Tabela 16 encontra-se um resumo dos itens propostos para esta pesquisa no cronograma físico e os respectivos objetivos específicos aos quais atende, bem como sua localização ao longo deste relatório final.

Tabela 16: Resumo dos itens propostos para esta pesquisa

<b>ANÁLISE COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES VISCOELÁSTICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS QUENTES E MORNAS</b>	<b>Objetivo específico</b>	<b>Item no relatório final</b>
1.1 Revisão da Literatura - propriedades viscoelásticas de misturas asfálticas e o ensaio de módulo complexo	1, 3	2.1, 2.2, 3.1
1.2 Revisão da Literatura - uso de misturas mornas e sua aplicação	2	2.3
1.3 Dosagem de mistura asfáltica e ensaios volumétricos	4	3.2, 4.4
1.4 Fabricação de amostras tipo HMA e WMA	4	3.3, 4.1, 4.2. 4.3
1.5 Ensaios de MR & RT	5	4.5 e 4.6
1.6 Ensaios de Módulo Completo (-10, 21 & 54°C @ 25, 10, 5, 1, 0.5, 0.1Hz)	6	4.7
1.7 Análise de dados & aplicação de filtros matemáticos	7	3.3.6
1.8 Determinação da curva mestra do módulo dinâmico; curva mestra do ângulo de fase; espaço de Black & plano Cole-Cole.	8	5
1.9 Análise preliminar da interferência do comportamento à fadiga e deformação permanente.	9	5
2.0 Elaboração do relatório final de pesquisa	-	1 a 7
2.1 Reunião com equipe de trabalho e Concessionária	-	6

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, S. da C. Estudos de misturas asfálticas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60). Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. Departamento de Transportes. São Carlos, SP, 2011.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D3497: Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures. Philadelphia, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15086: Materiais Betuminosos - Determinação da Recuperação Elástica pelo Ductilômetro. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15087: Misturas asfálticas — Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15184: Materiais Betuminosos - Determinação da Viscosidade em Temperaturas Elevadas Usando um Viscosímetro Rotacional. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15573: Misturas asfálticas — Determinação da densidade aparente e da massa específica aparente de corpos de prova compactados. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15619: Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16018: Misturas asfálticas - Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida, Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6560: Materiais Betuminosos - Determinação do Ponto de Amolecimento - Método do Anel e Bola. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6576: Materiais Asfálticos - Determinação da Penetração. Rio de Janeiro, 2007.

BENNERT, T. Evaluation of Warm Asphalt Technology. New Jersey Department of Transportation. Draft Report. Trenton, New Jersey, 2010.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica – formação básica para engenheiros. 1<sup>a</sup> ed. (3<sup>a</sup> reimpressão) Rio de Janeiro: PETROBRÁS, Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2008.

BRITO, L. A. T. Avaliação e Análise Paramétrica do Ensaio de Compressão Diametral sob Cargas Repetidas em Misturas Asfálticas. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2006.

BUSS, A.; RASHWAN, M.; WILLIAMS, R. C. Investigation of Warm-Mix Asphalt Using Iowa Aggregates. Iowa Department of Transportation. Final Report. Ames, Iowa, 2011.

CENTOFANTE, R. Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Santa Maria, RS, 2015.

CHOWDHURY, A.; BUTTON, J. W. A Review of Warm Mix Asphalt. Texas Transportation Institute. Technical Report. College Station, Texas, 2008.

CLYNE, T. R.; Li, X.; Marasteanu, M. O.; Skok, E. L. Dynamic and resilient modulus of Mn/DOT asphalt mixtures. Minnesota Department of Transportation. Final Report. St. Paul, Minnesota, 2003.

COLPO, G. B. Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER ME 043: Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 35: Agregados - Determinação da Abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 54: Equivalente de areia. Rio de Janeiro, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 86: Agregados - Determinação do Índice de Forma. Rio de Janeiro, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2006 - ES: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: from binders to mixes. Road Materials and Pavements Design. Département Génie Civil et Bâtiment (URA CNRS), Ecole Nationale des TPE, France, 2004

DI BENEDETTO, H.; PARTL, M. N.; FRANCKEN, L. FRANCKEN; DE LA ROCHE, C. Stiffness testing for bituminous mixtures. RILEM TC 182-PEB Performance testing and Evaluation of bituminous materials. Materials and Structures, Vol. 34, 2001, pp 66-70.

DOUGAN, C. E\* - Dynamic Modulus - Test Protocol – Problems and Solutions. Connecticut Department of Transportation in Cooperation with the U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. University of Connecticut, USA, 2003.

ESTAKHRI, C.; BUTTON, J.; ALVAREZ, A. E. Field and laboratory investigation of warm mix asphalt in Texas. Texas Transportation Institute. College Station, Texas, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 12697-26: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness. Brussels, 2004.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B.D. Field Performance of Warm Mix Asphalt. TRB 2008 Annual Meeting. 2008.

KIM, Y.R. Modeling of Asphalt Concrete. North Carolina: McGraw-Hill Professional, 2009. 460p. ISBN: 007146462X

KLINSKY, L. M. G; de FARIA, V. C.; BERNUCCI, L. L. B.; MOTTA, R. Revestimentos asfálticos sustentáveis: Estudo do comportamento mecânico e de redução de emissões de misturas asfálticas mornas. Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT). Relatório Final. 2014.

MELLO, L. G. R. O Estudo do Dano em Meio Contínuo no Estudo da Fadiga em Misturas Asfálticas. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Brasília, DF, 2008.

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

MOMM, L. Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, SP, 1998.

MOTTA, R.; BERNUCCI, L.; VASCONCELLOS, P.; FARIA, V.; LEAL, J. F. Laboratory and Field Evaluation of Warm Mix Asphalt in Brazil. TRB 2014 Annual Meeting. 2014.

MTS Systems Corporation. 318 Load Unit Product Information. 2014.

MTS Systems Corporation. Axial Extensometers Product Information. 2009.

MTS Systems Corporation. FlexTest GT Test Controller. 2009.

MTS Systems Corporation. MTS Model 793.10 MultiPurpose TestWare®- User Information and Software Reference. 2015.

MTS Systems Corporation. Series 505 SilentFlo™ Hydraulic Power Unit Product Information. 2010.

MTS Systems Corporation. Series 651 Environmental Chambers. 2016.

MTS Systems Corporation. Tuning and Calibration. 2009.

NASCIMENTO, L. A. H DO. Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. Dissertação (Doutorado em filosofia) -

Faculty of North Carolina State University. Transportation Materials. Raleigh, North Carolina – USA, 2015.

NASCIMENTO, L. A. H DO. Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. Dissertação(mestrado) –Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE. Programa de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, RJ, 2008.

NASCIMENTO, L. A. H. DO; ROCHA, S. M. N.; NASCIMENTO, C. E. H. DO; KIM Y. R.; CHACUR, M.; MARTINS, A. T. Uso da mecânica do dano contínuo na caracterização de misturas asfálticas brasileiras. 21º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM . Research Results Digest 370 - Guidelines for Project selection and materials sampling, conditioning, and testing in WMA research studies. Washington, 2012.

OTTO, G. G. Misturas Asfálticas Mornas – Verificação da Fadiga e do Módulo Complexo. 2009.164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina.

PELLINEN, T.; Crockford, B. Comparison of analysis techniques to obtain modulus and phase angle from sinusoidal test data. 6th RILEM Symposium PTEBM'03, Zurich, 2002.

THEISEN, K. M. Aplicação do princípio da correspondência elasto-viscoelástica para previsão de deformabilidade de misturas asfálticas. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS, 2006.

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

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Relatório final - Ingevity/Evotherm®: Desempenho das misturas asfálticas mornas utilizando a tecnologia evotherm com e sem o uso do compactador giratório. Porto Alegre, RS, 2015.

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

ZAUMANIS , M.; OLESEN, E.; HARITONOVS, V. Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt Properties. 5th International Conference Bituminous Mixtures and Pavements. Thessaloniki, Greece, 2011.

ZUBARAN, M.; MOTTA, L. M. G. Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto. 42ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv) e 18º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR). Foz do Iguaçu, PR, 2015.