

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Daniel Pinheiro Fernandes

**EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE CAL NO COMPORTAMENTO
VISCOELÁSTICO DE CONCRETOS ASFÁLTICOS**

**Porto Alegre
Junho 2017**

DANIEL PINHEIRO FERNANDES

**EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE CAL NO
COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DE CONCRETOS
ASFÁLTICOS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador/a: Washington Peres Núñez
Coorientador/a: Natália Guterres Mensch

Porto Alegre
Junho 2017

DANIEL PINHEIRO FERNANDES

**EFEITO DA INCORPORAÇÃO DE CAL NO
COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DE CONCRETOS
ASFÁLTICOS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, junho de 2017

Prof. Dr. Washington Peres Núñez
Dr. Pela Universidade Federal do Rio Grande
do Sul
Orientador

Ma. Natália Guterres Mensch
Ma. Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Coorientadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (PUCRS)
PhD. pela University of Nottingham

Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Natália Guterres Mensch
Ma. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

William Fedrigo
Msc. Pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho a minha família, em especial aos meus pais e minha irmã, que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha família, em especial aos meus pais e a minha irmã, por todo o apoio, carinho e amor, me incentivando em todas as etapas deste curso e sempre me encorajando a vencer os desafios impostos pela vida.

Agradeço ao professor Washington, pelo trabalho realizado ao me orientar, dividindo comigo o seu conhecimento e depositando em mim a confiança para a realização desta pesquisa.

Agradeço a minha coorientadora Natália, pela sua dedicação ao me auxiliar na etapa mais importante e delicada deste trabalho, compartilhando todo o seu conhecimento e fazendo com que realização desta pesquisa fosse possível.

Agradeço ao professor Lélío, pesquisador do LAPAV e relator deste trabalho, por todos os conselhos dados e ideias compartilhadas, incentivando todos a buscar cada vez mais.

Agradeço ao LAPAV, por toda a estrutura disponibilizada para auxiliar na minha formação, e a sua equipe, pela amizade, companheirismo e auxílio. Sem a ajuda de vocês este trabalho teria sido impossível.

Agradeço ao Programa Especial de Treinamento em Engenharia Rodoviária, o PETER, pela oportunidade de buscar o aprimoramento nesta área e por incentivar a busca por conhecimento através da pesquisa experimental.

Agradeço aos meus amigos e colegas, companheiros de estudos e de noites em claro, que ajudaram a tornar este árduo caminho da graduação mais divertido e prazeroso, com churrascos e bons papos, compartilhando as experiências que a universidade nos proporcionou.

Por fim, agradeço às empresas Triunfo/CONCEPA e Greca Asfaltos por fornecerem os materiais necessários para esta pesquisa. Sem a sua pronta disponibilidade, a pesquisa nunca teria saído do papel.

Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.

Leonardo da Vinci

RESUMO

O significativo aumento do tráfego nas rodovias brasileiras traz como desafio a necessidade de encontrar novos métodos para aumentar a vida útil dos pavimentos. Para isso, é necessário que haja um estudo mais aprofundado sobre a incorporação de materiais que influenciem no comportamento mecânico das camadas do pavimento, principalmente do revestimento. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento viscoelástico de concretos asfálticos com incorporação de cal hidratada, através do ensaio de módulo complexo. Foram estudadas 3 misturas diferentes, uma de referência (sem cal) e outras duas com diferentes tipos de cal hidratada (calcítica e dolomítica), afim de avaliar se o tipo de cal influencia no comportamento mecânico da mistura. Foram ensaiados 3 corpos de prova (CP) cilíndricos para cada mistura, totalizando 9 CP's. Os ensaios foram realizados conforme metodologia desenvolvida por Mensch (2017), seguindo as prerrogativas da AASHTO T-342, sendo esta a norma americana que rege o ensaio de determinação do módulo dinâmico (valor absoluto do módulo complexo). A compactação destes corpos de prova foi feita no compactador giratório Superpave, atingindo o volume de vazios exigido pela norma. O módulo complexo é um ensaio onde se aplica uma determinada tensão axial de compressão senoidal que gera deformações no corpo de prova. O valor do módulo dinâmico é a razão entre a tensão e a deformação resultante. O ensaio, segundo AASHTO T-342, é realizado em diferentes temperaturas (-10, 4, 21, 37 e 54 °C) e diferentes frequências de carregamento (25, 10, 5, 1, 0,5 e 0,1 Hz). Com os dados obtidos, foi possível determinar ângulos de fase, que determinaram a viscoelasticidade das misturas asfálticas e gerar curvas mestras, podendo assim verificar a rigidez dos materiais estudados. Os resultados sugeriram que a incorporação da cal influencia positivamente no concreto asfáltico, aumentando a rigidez e da mistura nas baixas temperaturas, onde ocorre o trincamento térmico e é maior o risco de trincamento por fadiga. Já nas temperaturas mais altas, onde predominam as deformações permanentes, a incorporação da cal resultou em aumento do módulo dinâmico, embora com incremento de menor significância na mistura com cal calcítica. Assim, por meio do ensaio de módulo complexo, concluiu-se que os tipos de cal estudados auxiliam no desempenho das misturas asfálticas. Porém, faz-se necessária a continuidade deste estudo, com misturas que incluam diferentes tipos de ligantes e agregados, para que se possa avaliar a extensão destes benefícios.

Palavras-chave: Misturas asfálticas. Módulo complexo. Incorporação de cal. Benefícios

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delineamento da pesquisa.....	17
Figura 2 – Comportamento viscoelástico sob carregamento harmônico.....	21
Figura 3 – Representação esquemática do módulo complexo no plano complexo.....	22
Figura 4 – Exemplo de curva mestra	23
Figura 5 – Demonstração de Espaço de Black	24
Figura 6 – Esboço do Plano Cole-Cole	25
Figura 7 – Esboço de curvas isotérmicas	26
Figura 8 – Demonstração de curvas Isócronas	27
Figura 9 – Reação da cal hidratada com a superfície do agregado.....	30
Figura 10 – Comparativo das curvas mestras estudadas por Wytczak,(2004)	33
Figura 11 - Curva granulométrica da mistura sem cal.....	35
Figura 12 – Cal incorporada no agregado graúdo	36
Figura 13 – Ligante convencional, sólido na temperatura ambiente.....	37
Figura 14 – cuba misturadora para produção das misturas asfálticas.....	39
Figura 15 – Compactador giratório (à esquerda) juntamente com o corpo de prova extraído.	40
Figura 16 – Esquemática do equipamento utilizado para o ensaio de módulo dinâmico ...	42
Figura 17 – Câmara de condicionamento e prensa de ensaio dos corpos de prova.....	44
Figura 18 – Instalação dos extensômetros no corpo de prova.....	44
Figura 19 – Curva mestra da mistura de referência, sem cal (SC)	46
Figura 20 – Curva mestra da mistura com incorporação de cal calcítica (CC).....	47
Figura 21 – Curva mestra da mistura com incorporação de cal dolomítica (CD)	47
Figura 22 – Comparativo das curvas mestras das três misturas	48
Figura 23 – Ângulo de fase em função da frequência reduzida da mistura de referência.....	49
Figura 24 – Ângulo de fase em função da frequência reduzida da mistura com cal calcítica..	49
Figura 25 – Ângulo de fase em função da frequência reduzida da mistura com cal dolomítica	50
Figura 26 – Comparativo do comportamento do ângulo de fase das misturas asfálticas	51
Figura 27 – Espaço de Black da mistura de referência.	52
Figura 28 – Espaço de Black da mistura com cal calcítica.	52
Figura 29 – Espaço de Black da mistura com cal dolomítica.....	53
Figura 30 – Comparativo do Espaço de Black para as três misturas.....	53
Figura 31 – Plano Cole-Cole da mistura de referência.....	54

Figura 32 – Plano Cole-Cole da mistura com cal calcítica.	55
Figura 33 – Plano Cole-Cole da mistura com cal dolomítica.....	55
Figura 34 – Comparativo do Plano Cole-Cole das três misturas.....	56
Figura 35 – Curva isócrona da mistura de referência.....	57
Figura 36 – Curvas isócrona da mistura com cal calcítica	57
Figura 37 – Curvas isócronas da mistura com cal dolomítica.....	58
Figura 38 – Curvas isotérmicas da mistura de referência.....	59
Figura 39 – Curvas isotérmicas da mistura com cal calcítica.....	59
Figura 40 – Curvas isotérmicas da mistura com cal dolomítica.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das cales estudadas	36
Tabela 2 – Resultado dos ensaios de caracterização do ligante	38
Tabela 3 – Características das misturas asfálticas estudadas.	39
Tabela 4 – Dados volumétricos dos corpos de prova	41
Tabela 5 – Tempo de condicionamento recomendado.	43
Tabela 6 – Número de ciclos para a sequência de ensaios.	45
Tabela 8 – Módulo dinâmico, ângulo de fase e desvios padrões da mistura sem cal.....	68
Tabela 9 – Módulo dinâmico, ângulo de fase e desvios padrões da mistura com cal calcítica.	69
Tabela 10 – Módulo dinâmico, ângulo de fase e desvios padrões da mistura com cal dolomítica.	70

LISTA DE SIGLAS

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AASHTO – *American Association of Highway and Transportation Officials*

AB – Cimento asfáltico modificado com borracha de pneu moída e outros aditivos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMP – Asfalto modificado por polímero

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CBUQ – Concreto betuminoso usinado a quente

CNT – Confederação Nacional de Transportes

CP – Corpo de Prova

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

LAPAV – Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LVDT – *Linear Variable Differential Transducer*

MPT – *MultiPurpose TestWare*®

MTS – *Material Testing System*

NBR – Norma brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

ε^* – Deformação complexa

σ^* – tensão complexa

$|E^*|$ – Módulo dinâmico

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

$^{\circ}\text{C}$ – graus Celsius

ε_0 amplitude da deformação

E' – Módulo elástico ou de armazenamento

E'' – Módulo viscoso ou módulo de perda

f – Frequência de carregamento

f_R – frequência reduzida

Hz – Hertz

M – Massa da amostra

mm – milímetros

MPa – Megapascal

T – Temperatura

T – Tempo

A_t – fator de deslocamento

δ – ângulo de fase ($^{\circ}$)

ε_0 – amplitude da deformação

η – viscosidade em 10^6 poise

π – fase do sinal

$\sigma(t)$ – tensão em função do tempo

σ_0 – amplitude da tensão

ω – velocidade angular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1	QUESTÃO DE PESQUISA.....	15
2.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	15
2.2.1	Objetivo principal.....	15
2.2.2	Objetivo secundário.....	15
2.3	PREMISSA.....	15
2.4	DELIMITAÇÕES	16
2.5	LIMITAÇÕES	16
2.6	DELINIAMENTO DA PESQUISA	16
3	MISTURAS ASFÁLTICAS.....	18
3.1	PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	19
3.2	MÓDULO COMPLEXO DE MISTURAS ASFÁLTICAS.....	20
3.2.1	Curva mestra.....	22
3.2.2	Espaço de Black.....	24
3.2.3	Plano cole-cole	24
3.2.4	Modelo de previsão	25
3.2.5	Curvas isotérmicas.....	26
3.2.6	Curvas isócronas.....	27
4	A CAL.....	28
4.1	MISTURAS ASFÁLTICAS COM INCORPORAÇÃO DE CAL.....	29
4.1.1	Mecanismos de modificação.....	30
4.1.2	Influência nas propriedades do concreto asfáltico	31
4.2	MÓDULO COMPLEXO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM CAL.....	32
5	MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA	34
5.1	MATERIAIS.....	34
5.1.1	Agregados.....	34
5.1.2	Cal	35
5.1.3	Ligante asfáltico	37
5.2	MÉTODOS DE PESQUISA.....	38
5.2.1	Produção das misturas	38
5.2.2	Moldagem dos corpos de prova.....	40
5.3	EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO.....	41
5.4	ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO	42
6	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
6.1	Curva mestra	46
6.2	Ângulo de fase	48
6.3	Espaço de Black.....	51
6.4	Plano Cole-Cole.....	54
6.5	Curvas Isócronas	56

6.6	Curvas Isotérmicas.....	58
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	61
7.1	CONCLUSÕES.....	61
7.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	63
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
	APÊNDICE.....	67

1 INTRODUÇÃO

O pavimento é uma estrutura composta por camadas constituídas por diversos materiais, sendo o revestimento a camada superior. O revestimento asfáltico é geralmente composto por uma mistura de agregados minerais com ligante asfáltico produzida em usina, a temperaturas elevadas, denominada concreto asfáltico. Tanto o ligante, material resultante da destilação fracionada do petróleo, quanto o concreto asfáltico tem como característica um comportamento termossensível e viscoelástico. Sendo assim, o desempenho da mistura asfáltica está diretamente ligado a sua rigidez que, por sua vez, é influenciada por parâmetros como variações de temperatura e de frequência de aplicação de carga oriunda do tráfego.

O crescente aumento do tráfego comercial no Brasil e a baixa qualidade da infraestrutura das rodovias traz à tona a incessante busca por novos materiais que qualifiquem as misturas asfálticas. Uma das alternativas que vem sendo estudada para a melhoria do desempenho das misturas é a incorporação de cal hidratada.

Na bibliografia internacional, encontram-se estudos, como os relatados por SEEBALY E LITTLE (2006), que comprovam a melhoria no desempenho mecânico e, em alguns casos, o aumento da vida útil do concreto asfáltico, proporcionados pela incorporação da cal na mistura.

No Brasil, ainda são escassos estudos semelhantes, destacando-se os trabalhos desenvolvidos no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com importantes avanços decorrentes das pesquisas realizadas por Bock (2012), Granich (2015), Paviani (2015) e Viapiana (2016).

Embora apresentem um comportamento visco-elásto-plástico, as misturas asfálticas podem ser consideradas elásticas se a carga aplicada for relativamente pequena em relação à sua resistência, e o carregamento for cíclico (HUANG, 1993). Admitir a hipótese de que o comportamento das misturas asfálticas seja elástico linear possibilita a análise simplificada de sistemas de camadas por meio de soluções analíticas numéricas (BERNUCCI et al., 2008), embora esta afirmação, muitas vezes, fuja da realidade.

Como afirmado por Christensen (1982), a importância de se considerar os efeitos da viscoelasticidade das misturas, bem como analisar os efeitos de diferentes temperaturas e frequências de carregamento, explica a importância de se empregar o ensaio de módulo

complexo (E^*) para determinar tanto as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas dos concretos asfálticos.

Conhecer os parâmetros que caracterizam a rigidez e as propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas utilizadas como revestimento é de extrema importância para a previsão da degradação dos pavimentos e essencial para o aumento da qualidade e da vida útil das rodovias do país.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para o desenvolvimento desta pesquisa são descritas a seguir.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão que fomentou a pesquisa é: a incorporação da cal interfere no comportamento viscoelástico dos concretos asfálticos e, conseqüentemente, no seu desempenho mecânico?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos desta pesquisa são classificados em principais e secundários e estão listados a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento viscoelástico de um concreto asfáltico convencional com a incorporação de cal, por meio do ensaio de Módulo Complexo.

2.2.2 Objetivo secundário

Como objetivo secundário, este trabalho procura verificar se há diferença no desempenho das misturas asfálticas produzidas com dois tipos de cal hidratada (calcítica e dolomítica).

2.3 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que, além de servir como material de enchimento (filer) para a composição granulométrica de uma mistura asfáltica e atuar como um agente melhorador de adesividade entre agregado e ligante, pouco se sabe ainda sobre as propriedades viscoelásticas de uma mistura asfáltica com cal, tampouco a contribuição que a cal pode dar para melhorar a rigidez desta mistura.

2.4 DELIMITAÇÕES

Este trabalho delimita-se à análise de misturas asfálticas produzidas com agregados basálticos, com a granulometria enquadrada na faixa C do DNIT, ligante asfáltico convencional CAP 50/70 e dois diferentes tipos de cal.

2.5 LIMITAÇÕES

As misturas asfálticas analisadas no trabalho foram produzidas utilizando uma cuba misturadora com capacidade para 6 kg e os corpos de prova foram moldados em um Compactador Giratório Superpave.

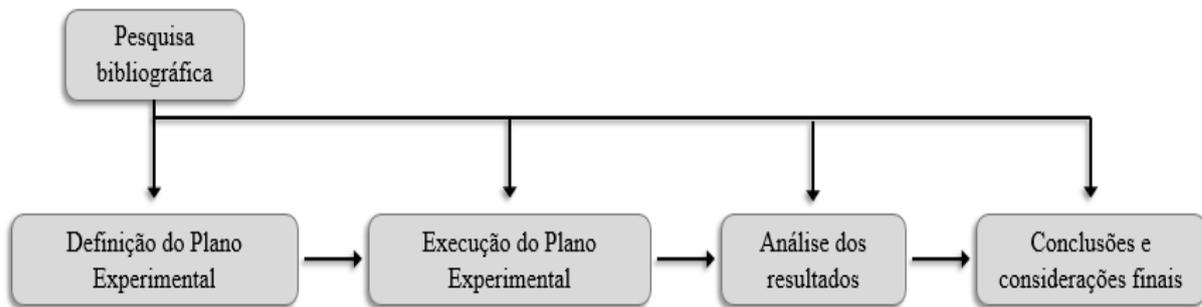
A pesquisa limitou-se a analisar 3 diferentes misturas convencionais, uma mistura de referência sem cal (SC), utilizando apenas agregado e CAP 50/70, uma mistura incorporando cal calcítica (CC) e a terceira incorporando cal dolomítica (CD).

2.6 DELINIAMENTO DA PESQUISA

A estrutura da pesquisa foi delineada por meio das seguintes etapas, organizadas conforme a figura 1 e descritas nos itens a seguir:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição dos materiais e procedimentos laboratoriais;
- c) execução dos procedimentos laboratoriais;
- d) análise dos resultados;
- e) conclusões e considerações finais.

Figura 1 - Delineamento da pesquisa



(Fonte: elaborado pelo autor)

A **pesquisa bibliográfica** ocorreu durante todo o trabalho, sendo de extrema importância para o desenvolvimento de cada uma das etapas, buscando aprofundar o conhecimento e ter maior embasamento teórico sobre o assunto abordado. Esta pesquisa teve como principais fontes de conteúdo dissertações, trabalhos de conclusão, artigos científicos, materiais de cursos, normas do Brasil e de outros países.

Na **definição do plano experimental** foram determinados os métodos laboratoriais que seriam relevantes para o desenvolvimento da pesquisa. Nesta etapa foram definidas também as misturas que seriam analisadas e os materiais a serem utilizados na pesquisa. O organograma dos ensaios realizados também foi definido nesta etapa.

A **execução do plano experimental** iniciou logo após a etapa anterior, começando com a produção das misturas e com a moldagem dos corpos de prova. Nesta etapa foram executados também os ensaios definidos para o andamento da pesquisa. Esta etapa ocorreu inteiramente no LAPAV da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Com os dados obtidos através dos ensaios, foi possível prosseguir para a etapa de **análise dos resultados** e, assim, chegar às **conclusões e considerações finais**.

3 MISTURAS ASFÁLTICAS

A pavimentação de estradas consolidou-se como uma das mais importantes obras de engenharia durante a expansão do império romano (séc. III a.C.). Esta atividade estava diretamente ligada ao desenvolvimento econômico e à integração entre as regiões dominadas pelo império, o que resultava num melhor deslocamento de mercadorias e até mesmo do exército entre essas regiões. Com a decadência do império romano e, posteriormente, a decadência econômica dos povos europeus na Baixa Idade Média, a evolução das técnicas de pavimentação e manutenção de estradas foi abreviada, vindo a receber novamente a devida importância somente em meados do século XVIII, na França. Essas técnicas perduraram durante séculos e passariam a ser aplicadas inclusive em outros continentes.

Já no Brasil, pesquisas apontam que as técnicas romanas de pavimentação foram empregadas na Calçada do Lorena no final do século XVIII, entre Riacho Grande e Cubatão, na então Capitania de São Paulo, sob a direção do engenheiro-militar português João da Costa Ferreira. Entretanto, a primeira rodovia no país da qual se tem registro histórico é a ligação entre as cidades de São Paulo e Santos, construída por engenheiros portugueses da Escola de Fortificações de Lisboa.

O pavimento asfáltico é composto por quatro camadas: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço de subleito. O revestimento asfáltico está destinado a receber diretamente as cargas oriundas do tráfego e distribuí-las de forma atenuada para as camadas inferiores. Além disso, esta camada tem como objetivo garantir a impermeabilidade da estrutura, atendendo os requisitos de flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência a derrapagem, resistência à fadiga e ao trincamento térmico, bem como qualquer outro fator de degradação proveniente da variação do clima local (BERNUCCI et al., 2008).

O concreto asfáltico denso (CA), ou concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), é o material para revestimento mais utilizado no Brasil, sendo empregado em aproximadamente 95% das rodovias do país. Consiste em uma mistura de agregados minerais bem graduados, de material fino de enchimento (filer) e de cimento asfáltico de petróleo (CAP), mais conhecido como ligante asfáltico (BALBO, 2007).

Para atender os requisitos de desempenho adequados, a mistura asfáltica deve ser dosada corretamente, o que significa que a quantidade de CAP não pode ser elevada demais a ponto de

preencher os vazios que esta mistura deve conter em seu interior mesmo após a compactação, para que seja estável ao tráfego e não deforme por fluência, tampouco baixa demais a ponto de comprometer a trabalhabilidade da mistura. Este teor de ligante é determinado em relação ao peso total da mistura, normalmente ficando entre 4,5 e 6,0% para misturas convencionais. Além disso, é necessário que a composição granulométrica dos agregados, ou seja, a distribuição de diferentes tamanhos dos agregados, seja a distribuição adequada para garantir à mistura uma estrutura pétreia que atenda os quesitos de trabalhabilidade, durabilidade e resistência (BERNUCCI et al., 2008).

Quando a composição granulométrica apresenta alguma descontinuidade, com pouca presença de finos, costuma-se utilizar um material de enchimento (o filer), reconstituindo assim a curva granulométrica apropriada para um determinado tipo de mistura. Este material pode ser oriundo do próprio pó-de-pedra, de finos calcários ou até mesmo de cimento Portland.

Segundo Balbo (2007) o filer, além de preencher os vazios excedentes na mistura, aumenta a viscosidade do CAP, gerando assim um incremento no ponto de amolecimento, na estabilidade, no módulo de resiliência e na resistência da mistura asfáltica.

3.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Caracterizar os materiais de pavimentação, em especial as misturas asfálticas, é uma tarefa um tanto complicada devido aos inúmeros fatores que influenciam no seu comportamento mecânico, como o clima, o tempo de aplicação e frequência das cargas dos veículos. Para essas misturas, o envelhecimento gradativo do ligante asfáltico torna a caracterização do material uma tarefa ainda mais complexa, pela difícil simulação deste fenômeno em laboratório (BERNUCCI et al., 2008).

Segundo Bernucci et al. (2008), nos últimos quarenta anos foi possível observar um crescente interesse na utilização dos métodos de dimensionamento dos pavimentos, que buscam compatibilizar as ações solicitantes do tráfego com a capacidade dos materiais por meio da análise estrutural de sistemas em camadas. Para isso, é necessário analisar, entre outros fatores, as propriedades dos materiais. Os modelos constitutivos comumente adotados nesta análise são tanto o elástico linear (para camadas de revestimento) como elástico não-linear (para camadas subjacentes).

As propriedades mecânicas das misturas asfálticas comumente analisadas, tanto para previsão de desempenho como para o controle de dosagem das misturas, envolvem a rigidez do material. Segundo Bernucci et al. (2008), a vida de fadiga, a resistência à tração e a resiliência das misturas asfálticas são as características que mais influenciam no seu desempenho, sendo, portanto, as propriedades mais estudadas atualmente.

Devido ao comportamento viscoelástico do ligante, a resposta do revestimento é diferente para carregamentos estáticos e dinâmicos. Um material com este comportamento apresenta maior rigidez para carregamentos com menor duração de aplicação do pulso de carga e menor rigidez para cargas aplicadas por períodos mais longos. Outro fator importante para caracterizar misturas asfálticas é a frequência de aplicação desses pulsos de carga. A rigidez deste material varia consideravelmente com a variação de temperatura, outro fator de suma importância para a caracterização das propriedades mecânicas do revestimento asfáltico. Para temperaturas mais baixas, a mistura torna-se mais rígida, ao passo que, para temperaturas mais altas, essa rigidez tende a cair (BERNUCCI et al., 2008).

Os ensaios de avaliação das propriedades mecânicas dos materiais dos pavimentos procuram simular as condições reais de solicitação no campo. Os ensaios de carga repetida avaliam os efeitos do tráfego no pavimento, sendo que a amplitude de carga e o pulso dependem da velocidade dos veículos e da profundidade em que se calculam as tensões e deformações. No caso das misturas asfálticas, manifesta-se a natureza termoviscoelástica do ligante asfáltico no tipo de deformação e na dependência da temperatura (MEDINA E MOTTA, 2015).

3.2 MÓDULO COMPLEXO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

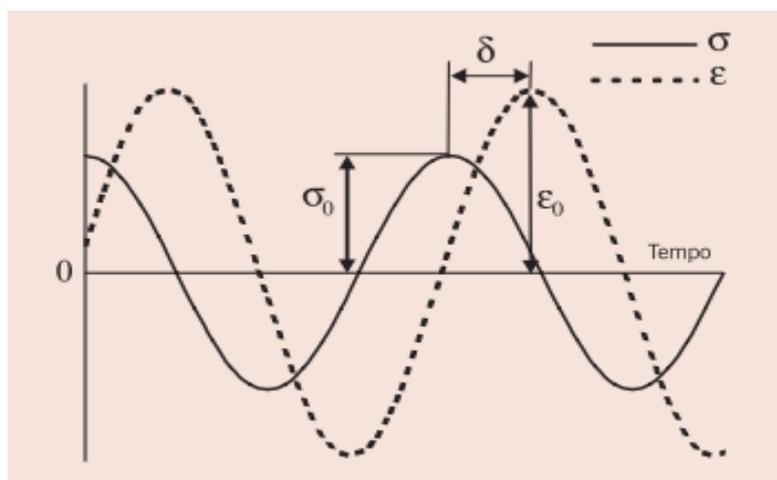
Uma forma de caracterização da viscoelasticidade das misturas asfálticas é a determinação do seu módulo complexo (E^*) ou módulo dinâmico, valor absoluto do módulo complexo ($|E^*|$).

Em meados do século passado, Papazian realizou um ensaio aplicando tensões axiais senoidais em um corpo de prova, medindo os deslocamentos correspondentes. Os ensaios foram conduzidos variando-se temperatura e frequência de carregamento. Assim, concluiu-se que os conceitos de viscoelasticidade poderiam ser aplicados no desenvolvimento dos estudos sobre o desempenho dos pavimentos asfálticos (BERNUCCI et al., 2008).

Segundo Bernucci et al. (2008), a importância de se considerar a viscoelasticidade em misturas, bem como a possibilidade de observar os efeitos da variação de temperatura e frequência de carregamento, torna o ensaio de módulo complexo uma ferramenta comumente utilizada no exterior. Este parâmetro pode ser usado para determinar tanto as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas lineares das misturas asfálticas.

Segundo Motta et al. (2015), o módulo dinâmico é um valor que relaciona tensões e deformações para materiais viscoelásticos sujeitos a um carregamento senoidal. O ensaio é repetido para diferentes temperaturas e frequências de carregamento. A figura 2 ilustra um carregamento senoidal e, conseqüentemente, uma deformação causada pela aplicação deste carregamento.

Figura 2 - Comportamento viscoelástico sob carregamento harmônico



(Fonte: Bernucci et al., 2008)

A defasagem entre os picos de tensão e deformação representa a característica viscoelástica do material. Para materiais onde não se identifica defasagem entre a tensão e a deformação, ou seja, valor do ângulo de fase (δ) nulo, tem-se uma característica puramente elástica. Já em materiais onde o ângulo de fase é superior a 90° , o comportamento viscoso é predominante (BERNUCCI et al., 2008).

A relação entre as amplitudes de tensão e deformação define o valor absoluto do módulo dinâmico, e é dado pela seguinte expressão:

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

A componente em fase com o carregamento é chamada de módulo de armazenamento, e indica a resposta elástica do material:

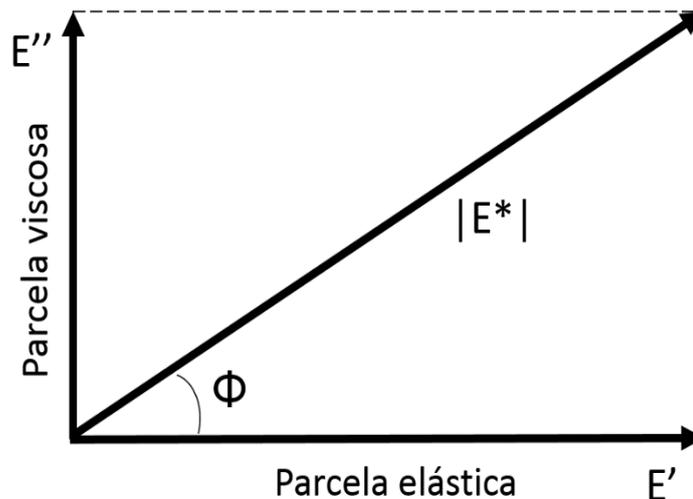
$$E' = \frac{\sigma_0 \cdot \cos(\delta)}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação (2)}$$

A componente defasada define o módulo de perda (*loss modulus*) e tem relação com a resposta viscosa do material:

$$E'' = \frac{\sigma_0 \cdot \sin(\delta)}{\varepsilon_0} \quad \text{Equação (3)}$$

A figura 3 representa vetorialmente, no plano complexo, as duas componentes, resultando no vetor módulo dinâmico.

Figura 3 - Representação esquemática do módulo complexo no plano complexo



(Fonte: Mensch, 2017)

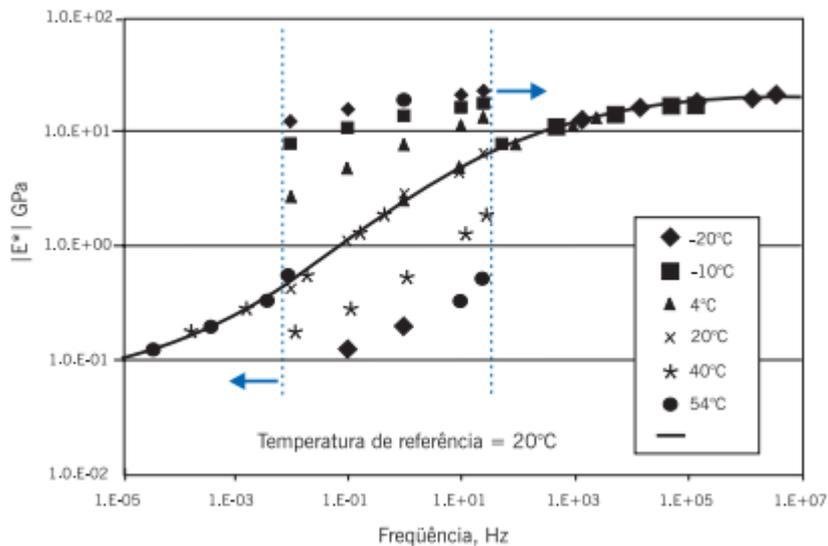
Dessa forma, é possível observar graficamente o quão elástico (ou viscoso, dependendo da magnitude das componentes) é o material estudado.

3.2.1 Curva mestra

A análise dos dados obtidos com o ensaio de módulo complexo possibilita a construção de uma curva mestra. A curva mestra de uma mistura asfáltica permite que comparações sejam feitas

sobre uma faixa de frequências e temperaturas, pois é obtida utilizando-se o princípio da superposição tempo-temperatura. Este princípio permite que os dados coletados a diferentes temperaturas sejam deslocados horizontalmente relativamente a uma temperatura de referência (BERNUCCI et al., 2008). As curvas isotermais são transladadas para a curva de referência (denominada curva mestra) por meio de um fator que pode ser encontrado de maneiras diferentes. A figura 4 exemplifica uma curva mestra.

Figura 4 – Exemplo de curva mestra



(Fonte: Bernucci et al., 2008)

Para construir a curva mestra, as curvas isotermais são transladadas em relação a uma temperatura de referência. A translação destas curvas pode se dar de diferentes maneiras, tais como pela equação de Arrhenius, de William-Landel-Ferry (WLF) ou por translação gráfica (QUINTERO, 2016). A equação utilizada neste trabalho foi a equação de WLF, que é demonstrada a seguir.

$$\text{Log}(aT) = \frac{-C_1(T-T_R)}{(T-T_R)+C_2} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

aT = Fator de translação

T = Temperatura (°C)

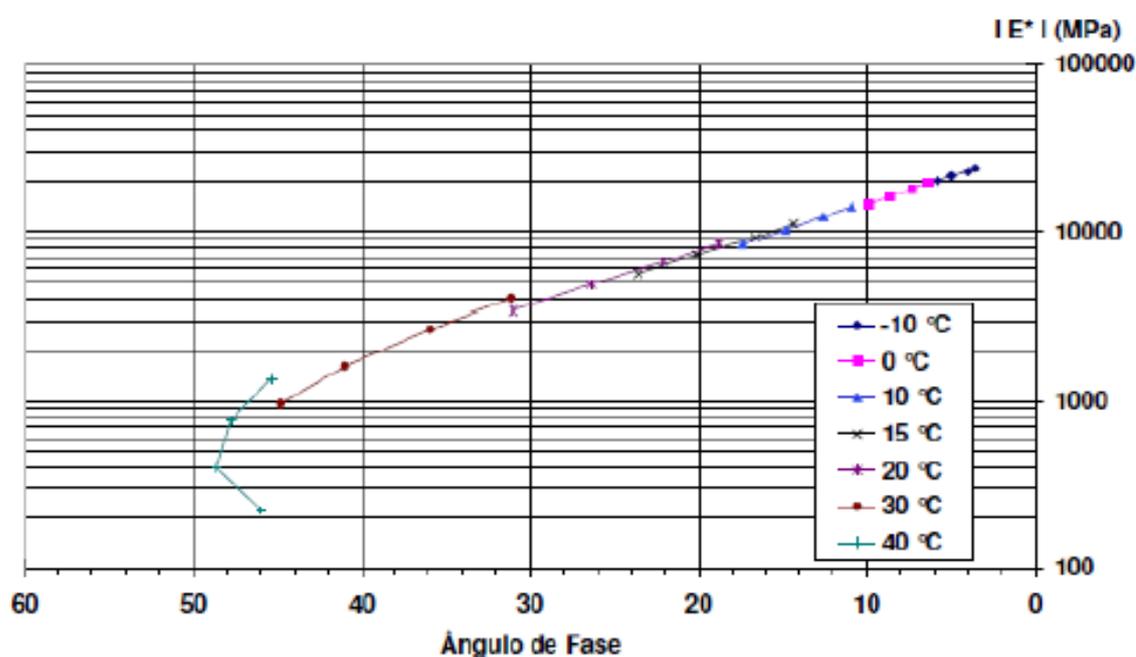
T_R = Temperatura de referência (K)

C_1 e C_2 = constantes dependentes do material

3.2.2 Espaço de Black

No espaço de Black a representação do módulo dá-se em relação ao ângulo de fase e revela a viscosidade da mistura asfáltica. Nesta forma de representação, o ângulo de fase corresponde às abscissas e o módulo dinâmico às ordenadas. Observa-se a evolução do ângulo de fase. A figura 5 esboça um modelo de espaço de Black.

Figura 5 – Demonstração de Espaço de Black



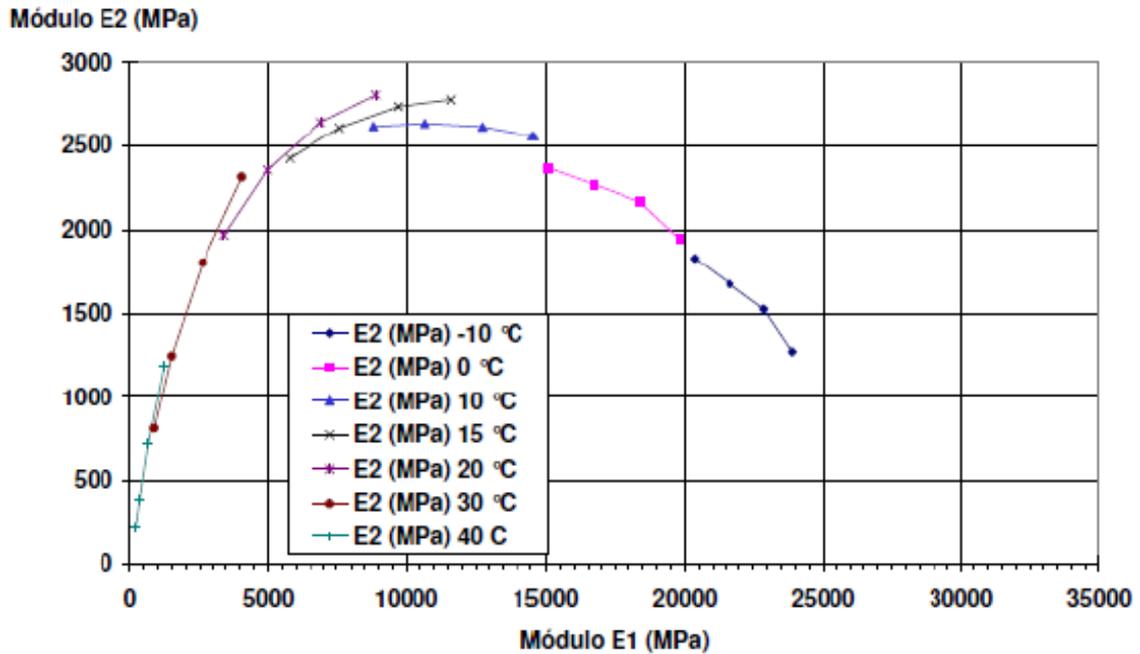
(Fonte: Quintero, 2016)

3.2.3 Plano cole-cole

No plano Cole-Cole, a representação do módulo se dá entre as componentes real e imaginária em eixo cartesiano. Esta representação sugere o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas. Neste plano, indica-se uma curva de semiarco.

Segundo Colpo (2014), essa representação permite avaliar também a temperatura e a frequência nas quais se terá a maior dissipação de energia e em qual ciclo de carregamento. A figura abaixo representa um modelo de plano Cole-Cole.

Figura 6 – Esboço do Plano Cole-Cole



(Fonte: Quintero, 2016)

3.2.4 Modelo de previsão

O valor de módulo dinâmico pode ser estimado através de um modelo de previsão, com resultados obtidos por meio de modelos estatísticos. Uma das equações resulta de valores de entrada como frequência de ensaio, viscosidade do ligante, percentual de vazios e a granulometria dos agregados. Os modelos de previsão se aplicam a todos os tipos de misturas, bem como a ligantes convencionais e modificados. A expressão a seguir define o modelo adotado pelo método de dimensionamento da AASHTO (2002):

$$\begin{aligned} \text{Log}E^* = & -0,261 + 0,008225p_{200} - 0,00000101(p_{200})^2 + 0,00196p_4 - 0,03157V_a - \\ & 0,415 \frac{V_{beff}}{V_{beff}+V_a} + \frac{1,87-0,002808p_4+0,0000404p_{38}-0,0001786(p_{38})^2+0,0164p_{34}}{1+e^{(0,716 \log(f)-0,7425 \log(\eta))}} \end{aligned} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

E^* = valor do módulo dinâmico (10^5 psi)

η = viscosidade do ligante (10^6 poise)

f = frequência de carregamento (Hz)

V_a = volume de vazios da mistura (%)

V_{beff} = Teor efetivo de ligante (%)

p_{34} = valor de agregado retido na peneira 19 mm (%)

p_{38} = valor de agregado retido na peneira 9,5 mm (%)

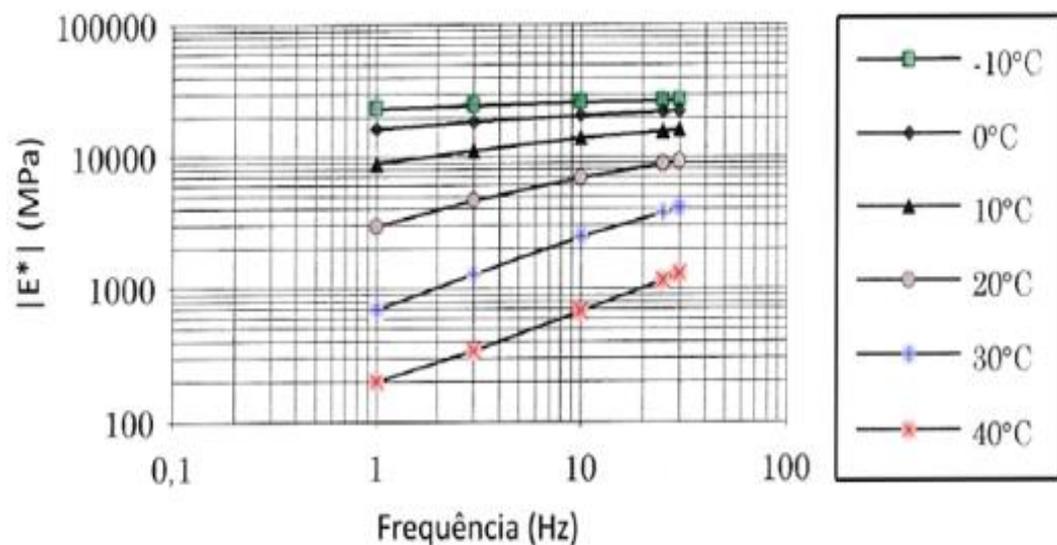
p_4 = valor de agregado retido na peneira 4,76 mm (%)

p_{200} = valor de agregado passante na peneira 0,0075 mm (%)

3.2.5 Curvas isotérmicas

As curvas isotérmicas representam graficamente o valor do módulo dinâmico em função da frequência aplicada para cada temperatura do ensaio, em escala logarítmica (MENSCH, 2017). Segundo Mensch (2017), as curvas isotérmicas sugerem a susceptibilidade cinética das misturas asfálticas em cada temperatura. A figura 7 representa o módulo dinâmico da mistura em função da frequência de carregamento, para diferentes temperaturas.

Figura 7 – Esboço de curvas isotérmicas

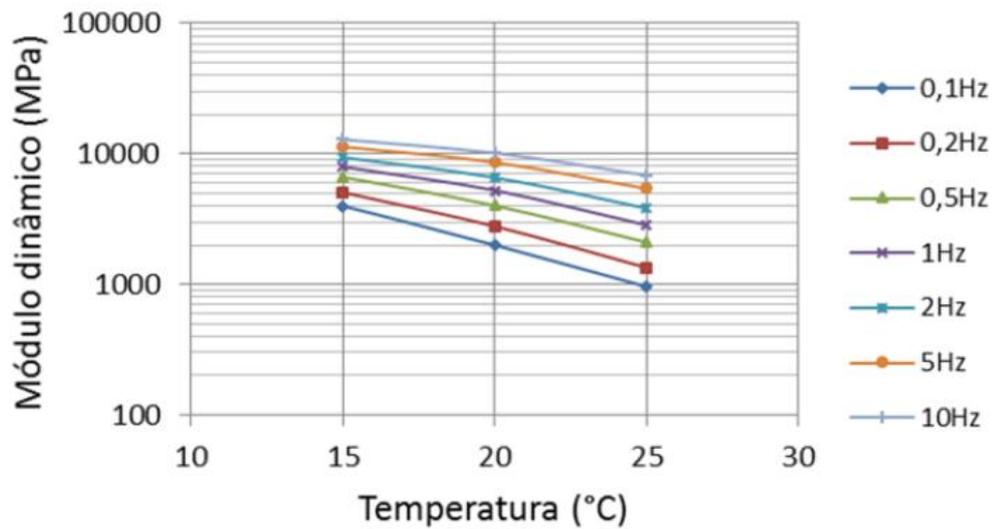


(Fonte: Mensch, 2017)

3.2.6 Curvas isócronas

As curvas isócronas representam o valor de módulo dinâmico em função da temperatura, para cada frequência de ensaio. Permite visualizar a redução do módulo com o aumento da temperatura sendo possível, assim, verificar a susceptibilidade térmica da mistura asfáltica. Quanto maior a inclinação da curva, mais suscetível é o material, ou seja, maior é o efeito do tempo de carregamento. Um exemplo de curvas isócrona é mostrado na figura 8.

Figura 8 – Demonstração de curvas Isócronas



(Fonte: Mensch, 2017)

4 A CAL

A cal é considerada um dos produtos manufaturados mais antigos da humanidade. Sua utilização pode ser evidenciada nos mais variados ramos da sociedade. Na engenharia, essa variedade se encontra ainda mais enfatizada e é possível perceber o quão antigo é a aplicação deste material. Há 5.000 anos os egípcios já incorporavam a cal na construção de suas pirâmides, utilizando-a como ingrediente da argamassa e do gesso. Já os romanos utilizavam a cal, juntamente com areia e cinza vulcânica de Pozzuoli, para produzir um resistente composto de cimento e água para utilização em edificações e estradas. Este interesse na utilização da cal perdeu força nos séculos seguintes, sendo redescoberta a sua importância no fim da Idade Média.

No Brasil, a cal começou a ser utilizada na época colonial, com a produção de cal virgem a partir de conchas marinhas. Sua aplicação se restringia a argamassa para revestimento externo das casas com o objetivo de proteger das copiosas chuvas tropicais. Daí até meados do século XX, a cal passou a ser aplicada fortemente nos mais variados ramos da construção civil e, desde então, houve um rápido crescimento no seu interesse científico e tecnológico.

Segundo Bock (2012), a maioria das cales produzidas no Brasil são provenientes da calcinação de calcários/dolomitos metamórficos, com pureza variável. O principal produto resultante da calcinação das rochas carbonatadas cálcicas e cálcio-magnesianas é a cal virgem, produto composto predominantemente por óxido de cálcio e óxido de magnésio.

Outro tipo de cal muito comum no mercado é a cal hidratada, um pó resultante da combinação dos óxidos anidros da cal virgem com a água. Este tipo de cal é o mais utilizado na construção civil atualmente.

Segundo a ABNT NBR 7175, a cal hidratada pode ser classificada quanto a sua pureza (CH I, CH II ou CH III) e quanto à concentração de Cálcio e Magnésio. A cal classificada como CH I é tida como uma cal de pureza mais elevada, seguida pela CH II, sendo a cal CH III a menos pura, conforme os resultados dos ensaios exigidos pela norma citada. Quanto à concentração de Cálcio e Magnésio, a cal pode ser classificada como calcítica quando a concentração de CaO for superior a 90% ou magnésiana quando este teor estiver compreendido entre 65 e 90%. Abaixo de 65%, a cal é classificada como Dolomítica.

Segundo Bock (2012), o consumo brasileiro de calcários, dolomitos e conchas calcárias é da ordem de 58 milhões de toneladas por ano. O Brasil está, já há algum tempo, entre os cinco maiores produtores de cal do mundo, sendo 73% desta produção realizada no Sudeste, 14% na região Sul e o restante da produção encontra-se distribuída pelas outras regiões do Brasil. Esta produção se divide 63 % em Cal Virgem e os outros 37% em Cal Hidratada.

Nos países industrializados a principal fonte de consumo de cal se dá na área da metalurgia, mas é na construção civil que se encontra o consumo mais tradicional, desde a produção de argamassa, passando pelo desenvolvimento de materiais sílico-calcários, estabilização de solos e o crescente interesse na sua utilização na área da pavimentação, como componente das misturas asfálticas (BOEIRA, 2011).

4.1 MISTURAS ASFÁLTICAS COM INCORPORAÇÃO DE CAL

Durante a crise do petróleo nos Estados Unidos, no início da década de 70, a qualidade dos ligantes asfálticos caiu significativamente, comprometendo o desempenho dos pavimentos americanos, acentuando mecanismos de degradação que estariam diretamente ligados à variação de temperatura e umidade como, por exemplo, deformação permanente, trincas causadas por fadiga e a má adesividade entre ligante e agregado.

Começou então a busca por novos aditivos que melhorassem o desempenho mecânico das misturas frente a estes tipos de mecanismos de degradação. Neste contexto, o emprego da cal hidratada mostrou-se eficaz e passou a ser visto não mais como um material de enchimento, mas como um componente capaz de minimizar a degradação prematura dos pavimentos (SEBAALY, 2006).

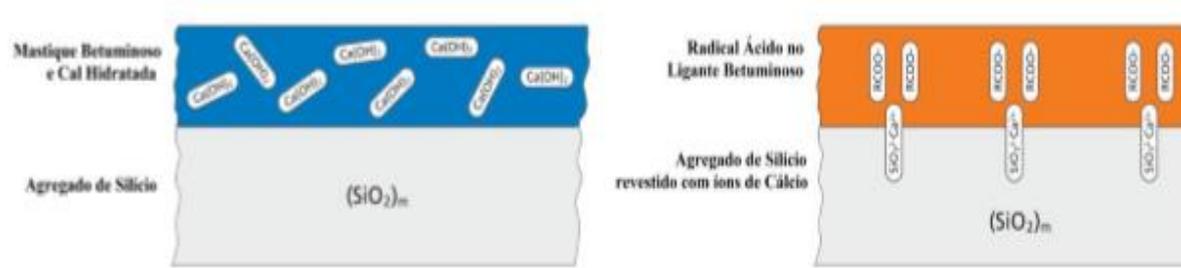
Desde então, a cal vem mostrando resultados satisfatórios quanto à sua utilização para um melhor desempenho mecânico das misturas asfálticas. Segundo Bock (2012), pesquisas apontam que, tanto nos Estados Unidos como em países da Europa, misturas modificadas com cal têm a sua durabilidade aumentada consideravelmente.

No Brasil, a cal ainda tem suas qualidades, quanto a aditivo melhorador de desempenho de misturas asfálticas, pouco exploradas. Hoje em dia, já se reconhece a cal hidratada como um dos mais eficazes melhoradores de adesividade para o ligante, além de aumentar a rigidez e minimizar os danos causados pela umidade.

4.1.1 Mecanismos de modificação

Segundo Ishai e Craus (1977), a cal hidratada desenvolve uma superfície de rugosidade no agregado, favorecendo a adesão do ligante asfáltico. A figura 9 ilustra a reação da cal hidratada, quando entra em contato com o agregado.

Figura 9 – Reação da cal hidratada com a superfície do agregado



(Fonte: Ishai et al., 2012)

Ao mesmo tempo em que trata os agregados (Ishai et al., 1977), a cal também reage com as moléculas polares do ligante, inibindo a formação de sabões solúveis em água, que causariam descolamentos. As interações químicas entre a cal e os grupos de ácidos do ligante contribuem tanto para o aumento da resistência ao envelhecimento quanto para melhorar a adesividade das misturas asfálticas (EULA, 2010).

As interações intensas entre a cal hidratada e os componentes da mistura asfáltica explica, em partes, melhorias na resistência à umidade, no envelhecimento e nas propriedades mecânicas das misturas.

Bock (2012) descreve a porosidade da cal hidratada como sendo uma característica capaz de influenciar no enrijecimento da mistura, ocorrendo um aumento no módulo de resiliência. Constata-se também, na literatura, um aumento no módulo das misturas asfálticas em temperaturas mais altas com a incorporação da cal hidratada, onde as deformações permanentes são predominantes.

4.1.2 Influência nas propriedades do concreto asfáltico

A seguir são apresentadas algumas propriedades das misturas asfálticas que sofrem melhorias com a incorporação da cal hidratada.

a) Resistência ao envelhecimento químico

A adição da cal hidratada promove uma redução da taxa de oxidação e envelhecimento, resultado das reações químicas que ocorrem entre o hidróxido de cálcio e as moléculas altamente polares do betume. Assim, a cal modifica o ligante asfáltico, reduzindo sua sensibilidade ao envelhecimento (EULA, 2010). Este efeito é ocasionado por um lento aumento na viscosidade em função do tempo de envelhecimento.

b) Dano por umidade induzida

Lutif et al. (2007) observa que a adição da cal hidratada contribuiu para o aumento da Resistência Retida à Tração (RRT), o que mostra que o dano por umidade, pode ser minimizado. O efeito da cal fez-se ainda mais notório quando as misturas foram submetidas a ciclos de congelamento e descongelamento.

c) Redução no teor de ligante

A quantidade de ligante asfáltico é um fator que influencia diretamente no comportamento mecânico da mistura. É o CAP que determina a viscosidade e influencia na rigidez da mistura, em função da temperatura e da frequência de carregamento.

À luz de pesquisas anteriores, é comprovado que a cal, por muitas vezes diminui o teor do ligante na mistura. Bock (2012) constatou que a incorporação de cal na mistura asfáltica reduziu em 10% o teor de ligante. Esta redução pode tornar o material mais rígido, principalmente se a temperatura analisada for elevada.

Além de ser usado como material de enchimento e como aditivo melhorador de adesividade, a cal, quando incorporada na mistura asfáltica, fica dispersa no CAP juntamente com o material mais fino oriundo da composição granulométrica, formando uma massa CAP + filer denominada mástique asfáltico. Portanto, mais do que preenchimento de vazios da mistura, a cal pode causar um aumento na viscosidade do CAP, o que geraria um incremento no ponto de

amolecimento, na estabilidade, no módulo de resiliência e na resistência da mistura asfáltica, evidentemente até um dado limite de consumo dessa adição (BALBO, 2007).

Bock (2012) afirma que a incorporação de cal favoreceu as misturas asfálticas com ligante convencional, tornando-as menos suscetíveis à deformação permanente. Mesmo com uma redução do teor de ligante de projeto das misturas com cal, houve um desempenho superior destes materiais em relação às misturas sem cal.

Segundo Granich (2015), a incorporação de cal, tanto calcítica como dolomítica, em concretos asfálticos com ligante convencional auxilia no aumento da vida de fadiga, permitindo obter materiais com maior desempenho e durabilidade.

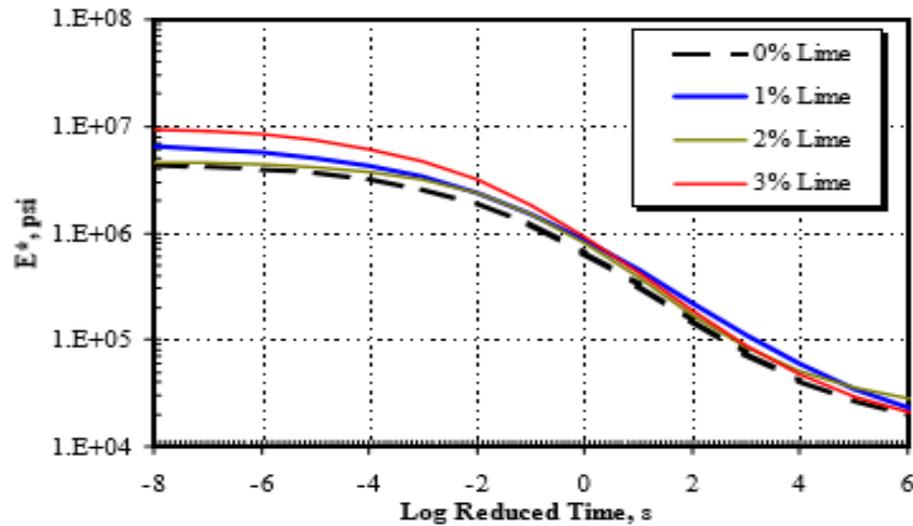
Paviani (2015) afirma, em sua pesquisa, que a adição de cal em misturas asfálticas convencionais produzidos com agregados graníticos aumentam significativamente o módulo de resiliência, independentemente do tipo de cal. Porém, a resistência à tração não é significativamente influenciada pela incorporação das cales.

4.2 MÓDULO COMPLEXO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM CAL

Há pouquíssimos relatos na bibliografia internacional sobre o efeito da adição de cal no módulo dinâmico de concretos asfálticos. Destaca-se o estudo relatado por Wytczak (2004) envolvendo quatro diferentes tipos de misturas asfálticas.

Os resultados revelaram um aumento significativo na rigidez das misturas nas temperaturas mais baixas, com valores de $|E^*|$ mais altos em comparação à misturas sem cal (referência). Os dados dessa pesquisa sugerem um aumento superior a 25% no módulo dinâmico da mistura com cal, o que comprova uma influência direta da cal na viscosidade do ligante asfáltico (WYTCZAK, 2004). A figura a seguir mostra o comparativo das misturas asfálticas estudadas nesta pesquisa.

Figura 10 – Comparativo das curvas mestras estudadas por Wytczak,(2004)



(Fonte: Wytczak, 2004)

No entanto, Wytczak (2004) afirma que nas temperaturas mais altas, cenário no qual predominam as deformações permanentes, a incorporação da cal pouco fez diferença. Isto pode ser explicado pela menor quantidade de ligante nas misturas onde se tem maior porcentagem de cal, o que torna o material mais rígido em temperaturas mais altas.

5 MATERIAIS E MÉTODOS DE PESQUISA

Neste capítulo serão apresentados os materiais utilizados na pesquisa e os métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho e obtenção dos resultados.

5.1 MATERIAIS

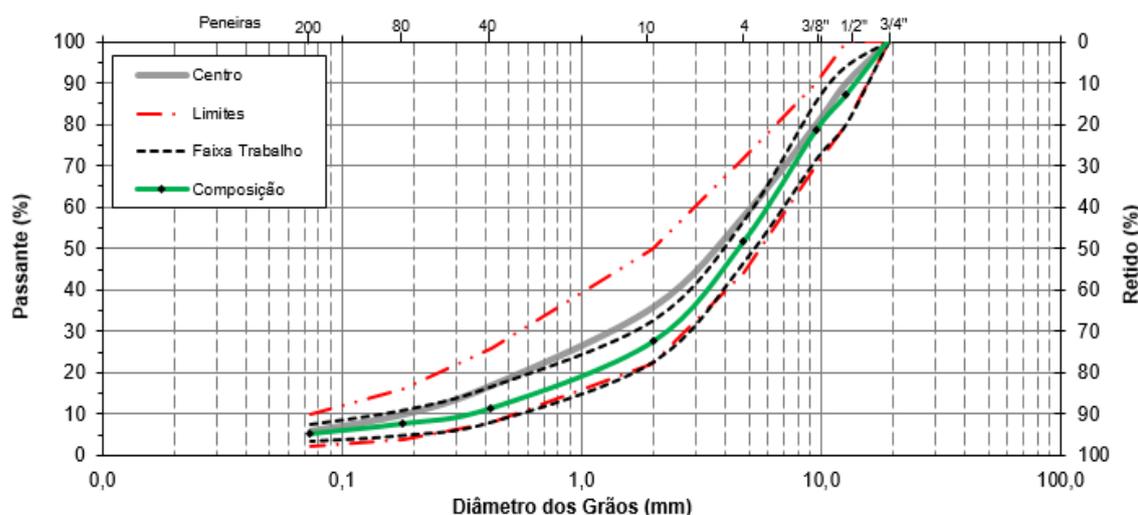
O estudo foi realizado a partir de uma mistura proposta por Mensch (2017), com materiais comumente utilizados na pavimentação rodoviária do Brasil. Os materiais utilizados são brevemente descritos a seguir.

5.1.1 Agregados

O agregado utilizado na pesquisa é de origem basáltica, provenientes de uma pedreira localizada no km 30 da BR-290, no município de Santo Antônio da Patrulha-RS. Este agregado foi escolhido por já se ter um conhecimento prévio de suas características, por estar disponível em quantidade grande no laboratório e pelo fato de os agregados basálticos serem utilizados com bastante frequência nas obras rodoviárias brasileiras, especialmente no RS.

A granulometria do agregado foi a mesma utilizada na pesquisa de Mensch (2017), enquadrada na Faixa C do DNIT, utilizando uma composição tinha a proporção, para a mistura de referência, de 24% de brita 3/4", 24% de brita 3/8", 26% de Pó de pedra na fração mais graúda (denominada Pó 1) e 26% de pó de pedra na fração mais miúda (Pó 2). A figura 11 mostra a composição da curva granulométrica para a mistura de referência (sem cal).

Figura 11 - Curva granulométrica da mistura sem cal



(Fonte: elaborado pelo autor)

Ressalta-se que o pó de pedra foi dividido em “pó 1” e “pó 2” devido a dificuldade de enquadrar a curva nos limites estabelecidos pela faixa C do DNIT. Para as duas misturas utilizando cal, a composição granulométrica ficou com uma proporção similar à da mistura de referência, com a diferença apenas do acréscimo de 2% de cal (quantidade já estudada por pesquisadores, tendo o melhor resultado de adesividade, para esses dois tipos de cal), retirando 1% de pó 1 e 1% de pó 2 em relação ao peso total da composição.

5.1.2 Cal

Foram utilizados dois tipos de cal, uma cal de origem dolomita produzida no estado do Rio Grande do Sul e a outra cal de origem calcítica produzida no estado de Minas Gerais.

Cal Dolomítica

A cal dolomítica CH II foi escolhida por ser encontrada com grande facilidade no estado do Rio Grande do Sul, sendo predominante no estado. Esta cal já vem sendo utilizada em diversas áreas da construção civil, entre elas a pavimentação. Porém, esta utilização limita-se ao uso para estabilização de solo, como filer e na melhora da adesividade entre o agregado e ligante, sem avanço na análise do comportamento mecânico do revestimento asfáltico.

Cal Calcítica

A cal calcítica CH I proveniente de Minas Gerais foi escolhida devido ao seu alto teor de hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Pesquisas realizadas nos Estado Unidos indicam que o uso de cales com teor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ elevado resultam num melhor desempenho mecânico da mistura asfáltica. Esta melhora fica evidente quando o teor de hidróxido de cálcio é superior à 90% que é o caso desta cal. Bock (2008) afirma que o método no qual a incorporação da cal surte melhor efeito na adesividade é adicionando-a ao agregado graúdo.

A tabela 1 algumas características das cales relevantes para a pesquisa. A figura 12 apresenta a forma como a cal foi incorporada na mistura.

Tabela 1 – Características das cales estudadas

<i>Tipo</i> \ <i>Característica</i>	<i>Pss #200 (%)</i>	<i>Massa Específica Aparente Solta (g/cm^3)</i>	<i>Massa Específica Real (g/cm^3)</i>
<i>Cal Calcítica</i>	95,45	0,496	2,239
<i>Cal Dolomítica</i>	88,10	0,546	2,320

(Fonte: Bock, 2012)

Figura 12 – Cal incorporada no agregado graúdo



(Fonte: elaborado pelo autor)

5.1.3 Ligante asfáltico

O ligante utilizado nas misturas foi o cimento asfáltico de petróleo convencional, classificado como CAP 50/70. Optou-se pela utilização deste ligante por ele não possuir nenhum modificador ou adição de polímeros. A figura 13 mostra o CAP na forma sólida, a temperatura ambiente.

Figura 13 – Ligante convencional, sólido na temperatura ambiente



(Fonte: elaborado pelo autor)

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização: densidade, penetração, viscosidade Brookfield e ponto de amolecimento. Todos estes ensaios obtiveram resultados de acordo com a especificação da ANP (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2005), para este tipo de ligante (CAP 50/70). Os resultados obtidos, bem como os parâmetros a serem atendidos estão indicados na tabela 2, a seguir.

Tabela 2 – Resultado dos ensaios de caracterização do ligante

Ensaio		Especificação ANP	CAP 50/70
Viscosidade Brookfield	135°C	mínimo 274	408
NBR 15184 (cP)	150°C	mínimo 112	237
	177°C	57 a 285	90
Densidade de materiais betuminosos NBR 6296 (g/cm ³)		-	0,957
Ponto de amolecimento -NBR 6560 (°C)		mínimo 46	49
Penetração - NBR 6576 (0.1mm)		50 a 70	69
Índice de susceptibilidade térmica (IST)		(-1,5) a (+ 0,7)	-0,8

(Fonte: elaborado pelo autor)

5.2 MÉTODOS DE PESQUISA

Todos os ensaios desta pesquisa foram realizados no Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), considerado referência no país em pesquisas na área de pavimentação. Os métodos utilizados são apresentados a seguir.

5.2.1 Produção das misturas

Neste trabalho foi utilizada uma cuba misturadora automática com controlador de temperatura (Figura 14). Tanto o ligante como os agregados foram previamente aquecidos em estufa, a temperaturas pré-estabelecidas, sendo a temperatura do ligante definida pelo ensaio de viscosidade Brookfield (153 °C) e a temperatura do agregado 10 °C acima da temperatura definida para o ligante (163 °C).

Todas as misturas estudadas passaram por uma etapa de envelhecimento, sendo armazenadas em estufa, por um período de duas horas, à 140 °C, mesma temperatura de compactação. Esta temperatura é pré-definida simulando a perda de temperatura que ocorre em campo no intervalo de tempo entre a mistura e a compactação na pista.

Figura 14 – cuba misturadora para produção das misturas asfálticas



(Fonte: elaborado pelo autor)

A tabela 3 apresenta as características das misturas asfálticas estudadas, bem como as especificações da Norma DNIT 031 (DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, 2006).

Tabela 3 – Características das misturas asfálticas estudadas.

Propriedade	Especificação	Mistura CC	Mistura CD	Mistura CC
Teor de Betume (%)	-	5,5	5,34	5,28
Volume de Vazios (%)	3 a 5	4,1	4	4,1
Relação Betume Vazios (%)	75 a 82	76,5	75,2	75,8
Vazios Agregado Mineral (%)	> 15	17	16,6	16,2
Massa Esp. Máx. Medida (kN/m ³)	-	2,479	2,506	2,506
Massa Esp. Aparente (kN/m ³)	-	2,38	2,459	2,438
Estabilidade (kN)	> 500	584,3	1066	1043
Fluência (mm)	8 a 18	8,7	12	12
Resistência à Tração (MPa)	-	0,95	0,93	1,03
Módulo de Resiliência (MPa)	-	3410	3526	4130
Resistência à Tração Retida (%)	> 70	69	87	82

(Fonte: elaborado pelo autor)

É importante salientar que as misturas com cal calcítica e cal dolomítica apresentam praticamente os mesmos valores característicos de projeto. Sendo assim, o teor de ligante utilizado para as duas misturas foi o mesmo (5,3%), visto que a diferença real foi quase nula.

5.2.2 Moldagem dos corpos de prova

Para cada mistura asfáltica foram moldados 3 corpos de prova (CP), todos com aproximadamente 15 cm de altura e 10 cm de diâmetro, sem que fosse necessário nenhum corte das suas faces, conforme procedimento utilizado por Nascimento (2015). Para isso, foi utilizado um compactador giratório Superpave e controlou-se a compactação através de uma densidade estimada para atingir o volume de vazios sugerido por Nascimento (2015) para o ensaio de módulo complexo, estabelecido entre 5 e 6% (o que significa um grau de compactação de 98%, dentro dos limites propostos pela especificação do DNIT 031/06). O compactador utilizado e o corpo de prova extraído são mostrados na figura 15.

Figura 15 – Compactador giratório (à esquerda) juntamente com o corpo de prova extraído.



(Fonte: próprio autor)

Após a moldagem dos corpos de prova, determinou-se as características volumétricas dos mesmos, conforme NBR 15573. A tabela 4 traz os dados de cada corpo de prova. O corpo de prova número 1, contendo a cal dolomítica não atingiu o volume de vazios esperado, sendo excluído do grupo e trabalhando-se apenas com os CP's 2 e 3, para esta mistura.

Tabela 4 – Dados volumétricos dos corpos de prova

MIST.	ID. CP.	Dimensões		Det. da Densidade			Dens. Aparente	V.v (%)
		h CP	d CP	Peso AR	Peso Imerso	Sup. Seca		
CAL DOLOMÍTICA	1	14,83	10,00	2680,90	1552,10	2692,40	2,35	6,2
	2	14,52	10,00	2681,60	1561,80	2691,90	2,37	5,3
	3	14,84	10,00	2681,20	1556,30	2687,70	2,37	5,4
CAL CALCÍTICA	1	14,84	10,00	2684,40	1562,30	2693,50	2,37	5,3
	2	14,84	10,00	2682,40	1557,00	2691,30	2,36	5,6
	3	14,84	10,00	2681,60	1558,40	2689,50	2,37	5,4
SEM CAL	1	14,80	10,00	2654,30	1537,30	2672,90	2,34	5,7
	2	14,85	10,00	2654,30	1535,20	2670,40	2,34	5,7
	3	14,87	10,00	2653,20	1532,00	2666,00	2,34	5,6

(Fonte: elaborado pelo autor)

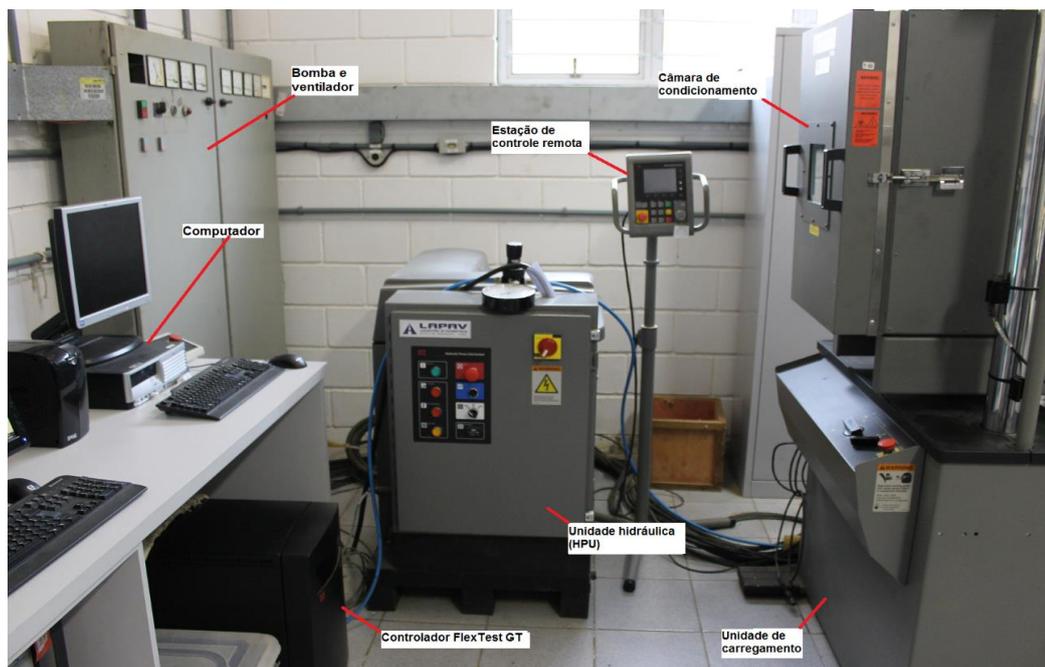
5.3 EQUIPAMENTO UTILIZADO PARA O ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

O equipamento utilizado para a realização do ensaio de Módulo Complexo, foi uma unidade de carregamento da MTS 810, modelo 318.25. Esta unidade possui uma força nominal máxima de 250 kN. Esta unidade apresenta componentes importantes como Servovalve (controla a taxa de fluxo e a direção de fluido que entra nos atuadores, determinando o quão rápido o atuador se estende e retrai), o 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 para esta unidade de carregamento é o FlexTest GT. Este controlador é executado com o software MTS 793 MultiPurpose TestWare® (MPT). Com ele é possível criar rotinas de ensaios complexos que incluam comandos, dados de aquisição, detecção de eventos e instruções de controle externo.

A carga aplicada durante o ensaio é gerada pela unidade hidráulica, modelo SilentFlo™ 505.07. Esta unidade fornece um fluido hidráulico de alta pressão para a operação do sistema de ensaio. A figura a seguir, elaborada por Mensch (2017) mostra o detalhamento do sistema completo.

Figura 16 – Esquemática do equipamento utilizado para o ensaio de módulo dinâmico



(Fonte: Mensch, 2017)

A câmara de condicionamento utilizada 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 câmara dispõem de isolamento com fibra de vidro, e na parte frontal existe uma abertura em vidro temperado que permite a visualização da amostra durante o ensaio.

5.4 ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

Os resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase foram determinados a partir de um carregamento senoidal, em diferentes temperaturas e frequências de ensaio.

A metodologia utilizada para a realização dos ensaios de Módulo Complexo uniaxial seguiu os procedimentos da AASHTO T 342/11, por não haver ainda norma brasileira para regimentar este ensaio.

Os ensaios foram realizados nas temperaturas de -10 , 4 , 21 , 37 e 54°C e nas frequências de 25 , 10 , 5 , 1 , $0,5$ e $0,1$ Hz, sendo ensaiadas as 3 amostras moldadas para cada mistura, exceto para a mistura com cal dolomítica. O ensaio foi realizado no modo tensão controlada, sendo que as

deformações lidas nos extensômetros deveriam estar na ordem de 50 a $100\mu\epsilon$, conforme procedimento proposto por Mensch (2107)

Segundo Mensch (2017), 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, bem como por questões de segurança do equipamento e do operador.

Como a rigidez do material mudava bruscamente com a variação de temperatura, fazia-se necessário o ajuste do 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 carga e deformação.

O procedimento, proposto por Mensch (2017), se divide nas seguintes partes:

- a) 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.
- b) Condicionamento do corpo de prova: 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 342/11. A tabela a seguir indica o tempo de condicionamento recomendado pela norma citada.

Tabela 5 - Tempo de condicionamento 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)

Figura 17 – Câmara de condicionamento e prensa de ensaio dos corpos de prova



(Fonte: elaborado pelo autor)

c) Inicialização do equipamento;

d) Instalação da amostra: Após a moldagem é necessário instalar os extensômetros. Os mesmos foram instalados com a utilização de elásticos.

Figura 18 – Instalação dos extensômetros no corpo de prova



(Fonte: elaborado pelo autor)

e) “*Tuning*” (ajuste PID): O “*Tuning*” é um ajuste do 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. 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. O ajuste PID é realizado com carga reduzidas que foram determinadas após testes.

- f) Procedimento teste: este procedimento é necessário para sejam 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 342/11.
- g) 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. Os ciclos de carregamento adotados para cada frequência são indicados na tabela 6.

Tabela 6 - 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)

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

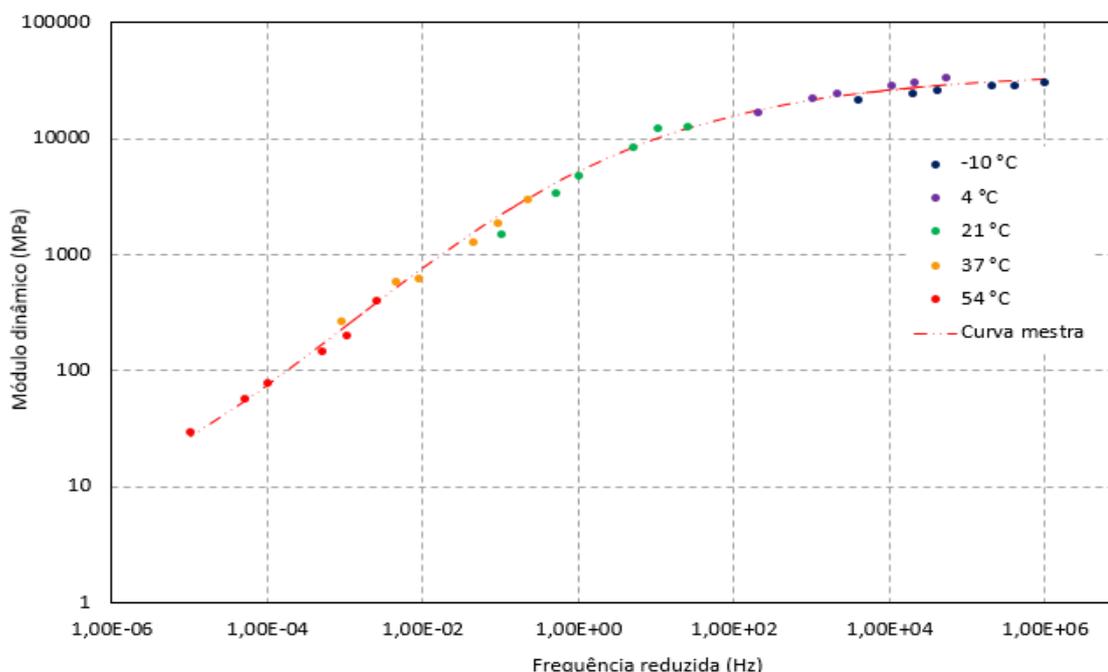
Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos. Além dos valores de módulo dinâmico, são apresentadas as curvas mestras, curvas isotermas, curvas isócronas, espaço de Black e a representação cole-cole de cada uma das misturas.

Tabelas com os valores de tensões, deformações, de módulo dinâmico e de ângulo de fase é apresentada em anexo. Todos os valores são valores médios das amostras de cada uma das misturas.

6.1 Curva mestra

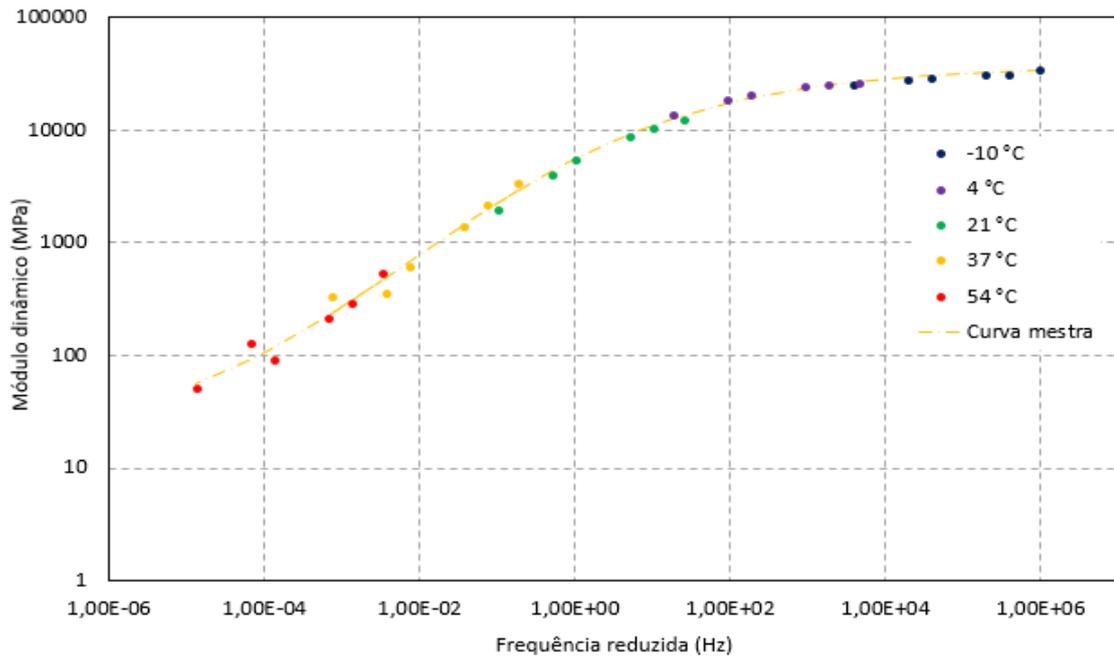
Por meio da curva mestra foi possível analisar a rigidez das misturas estudadas. As curvas são exibidas separadamente para que haja um melhor entendimento da influência da variação de temperatura e de frequência de carregamento, para cada uma das misturas (Figuras 19, 20 e 21). Após, será apresentado um resumo comparativo de todas as misturas (Figura 22).

Figura 19 – Curva mestra da mistura de referência, sem cal (SC)



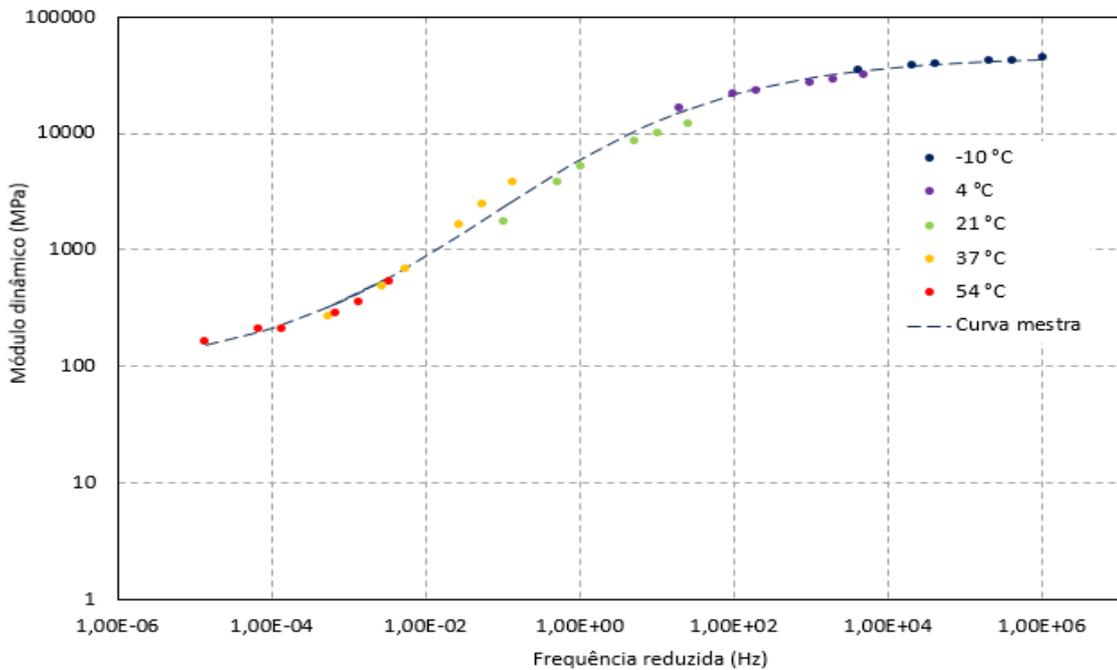
(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 - Curva mestra da mistura com incorporação de cal calcítica (CC)



(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 - Curva mestra da mistura com incorporação de cal dolomítica (CD)

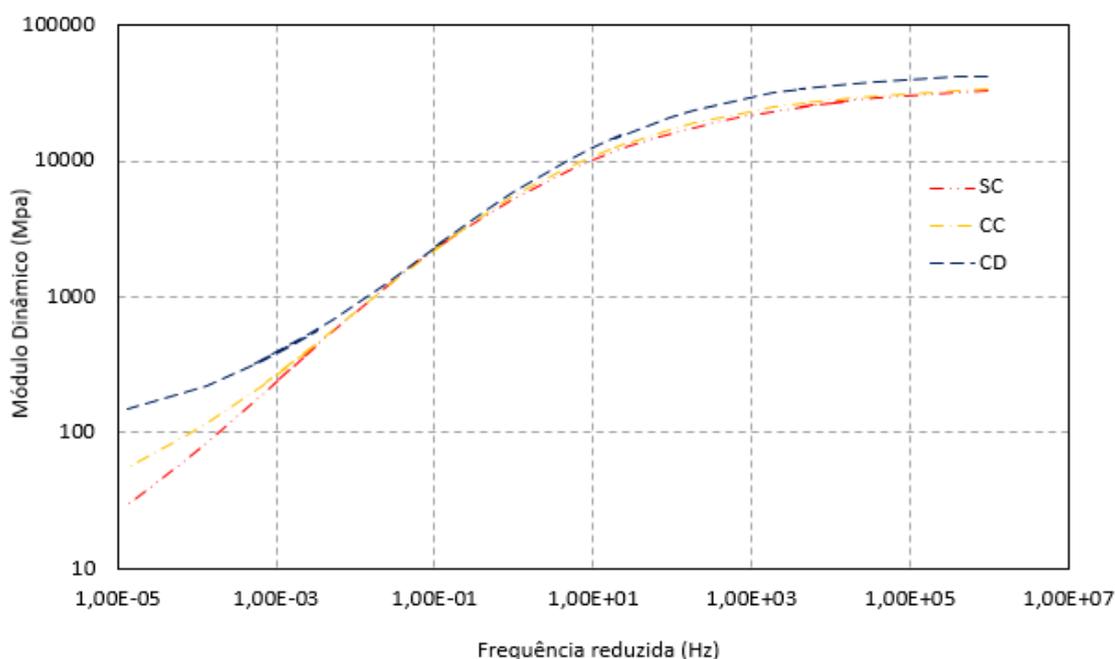


(Fonte: elaborado pelo autor)

Nota-se que, à medida que a frequência de carregamento aumenta e a temperatura diminui, o valor do módulo dinâmico aumenta, aumentando assim a sua rigidez. Este é o comportamento

esperado, não só para as misturas estudadas, mas para todas as misturas asfálticas, conforme a literatura estudada. A figura a seguir mostra o comparativo entre as misturas asfálticas estudadas, sobrepondo as três curvas mestras em um mesmo gráfico.

Figura 22 – Comparativo das curvas mestras das três misturas



(Fonte: elaborado pelo autor)

Sobrepondo as curvas, nota-se que a mistura contendo a cal dolomítica (CD) apresenta uma menor variação no valor de módulo, comparada com as demais curvas. Isso sugere que esta mistura tem a rigidez menos alterada com a variação de frequência e de temperatura, sendo menos susceptível termicamente. É possível verificar também que as misturas com cal apresentam valores de módulo mais elevados à temperaturas mais elevadas, sendo este aumento mais significativo na mistura com cal dolomítica.

6.2 Ângulo de fase

Os ângulos de fase obtidos com o ensaio representam a viscoelasticidade das misturas. Nas figuras 24, 25 e 26 são apresentados os valores de ângulo de fase em função do logaritmo das frequências reduzidas.

Figura 23 – Ângulo de fase em função da frequência reduzida da mistura de referência

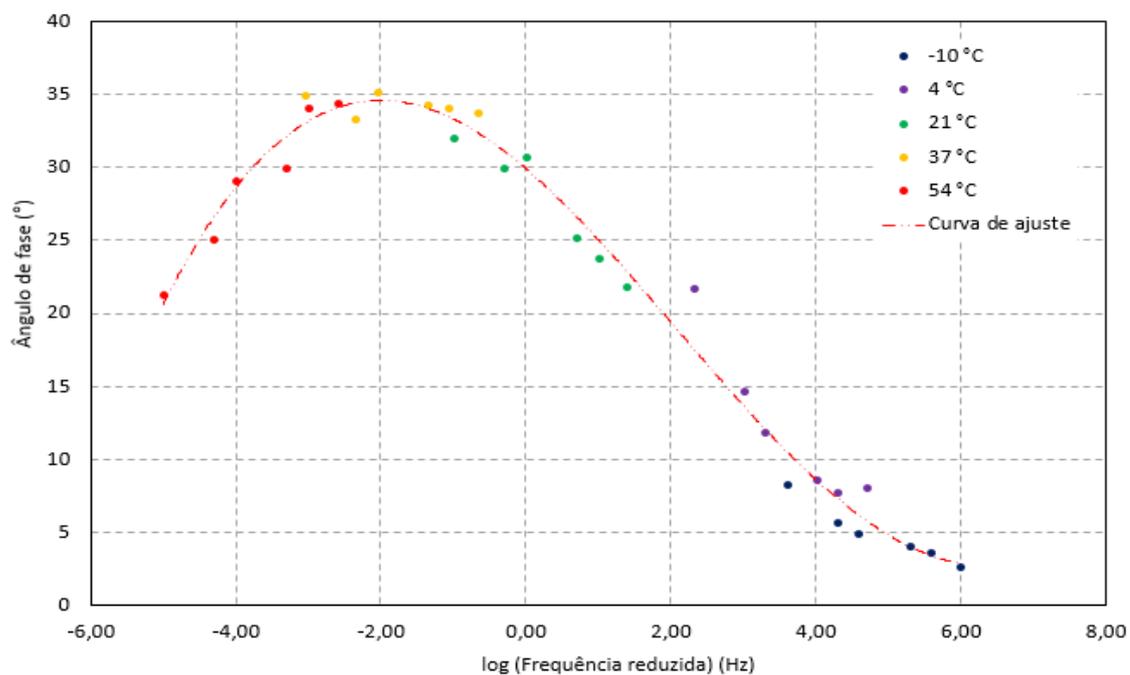
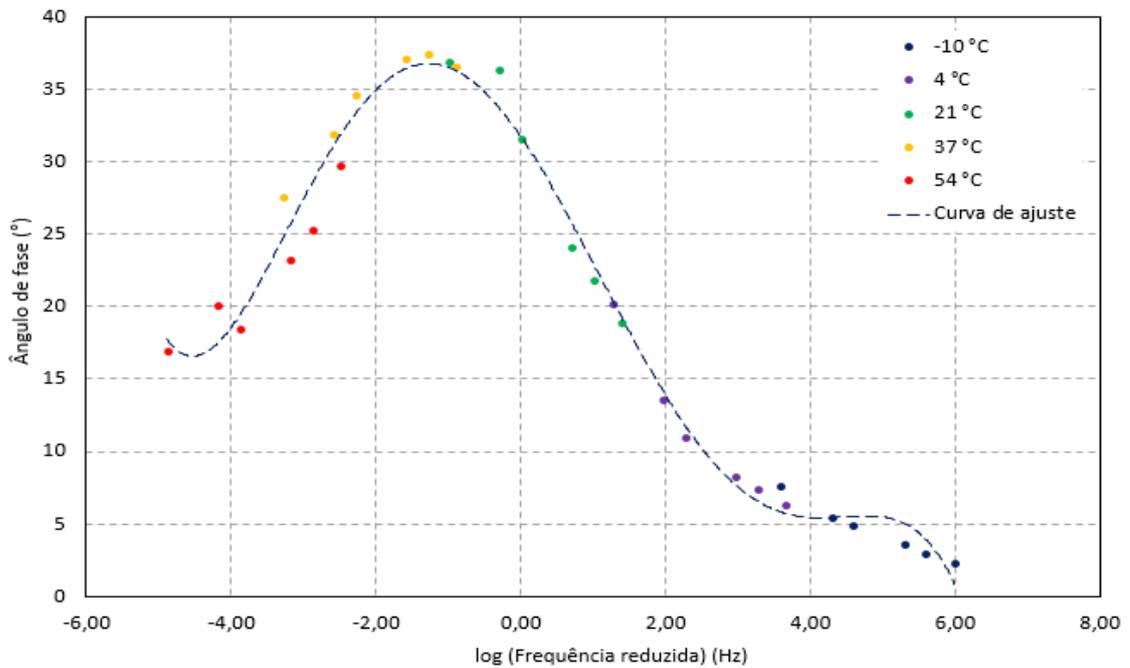


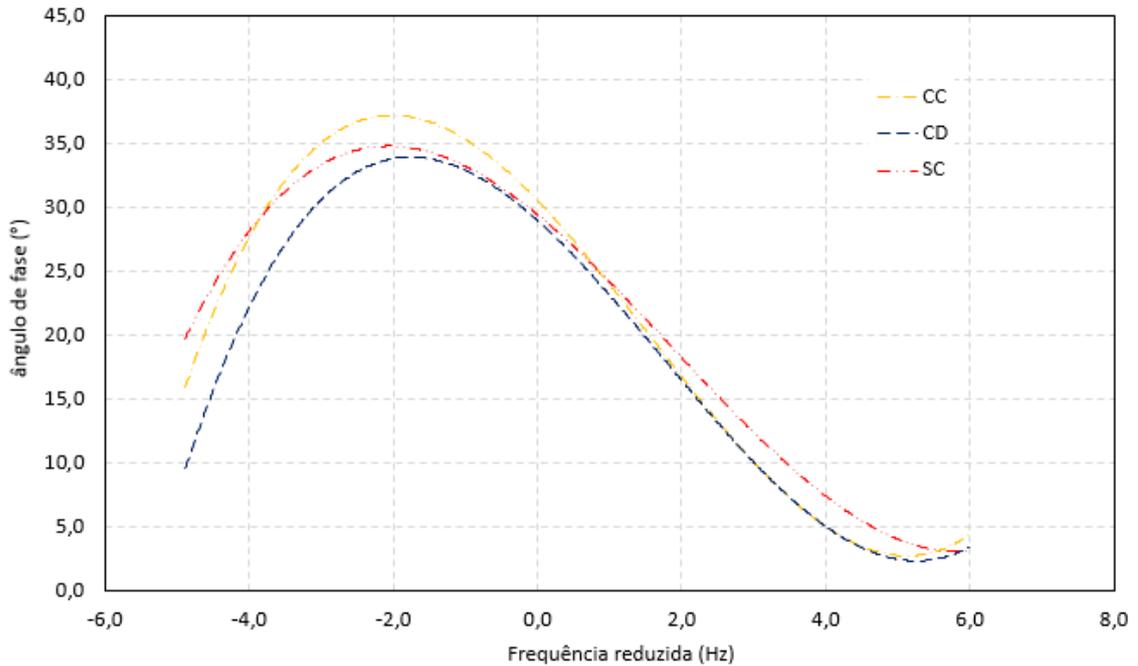
Figura 25 - Ângulo de fase em função da frequência reduzida da mistura com cal dolomítica



(Fonte: elaborado pelo autor)

Os gráficos sugerem um comportamento semelhante para todas as misturas, com os valores mais altos de ângulo de fase correspondendo a temperaturas de 21 e 37 °C. Os resultados apresentam valores de ângulo de fase mais baixos para a temperatura de 54 C em relação aos valores de pico, causada pela falta de rigidez do ligante e influência do esqueleto pétreo. Para as temperaturas de -10 e 4 °C, os valores de ângulo de fase foram os menores apresentados, resultando em uma viscosidade mais baixa. A figura 26 permite comparar os resultados correspondentes às três misturas.

Figura 26 – Comparativo do comportamento do ângulo de fase das misturas asfálticas



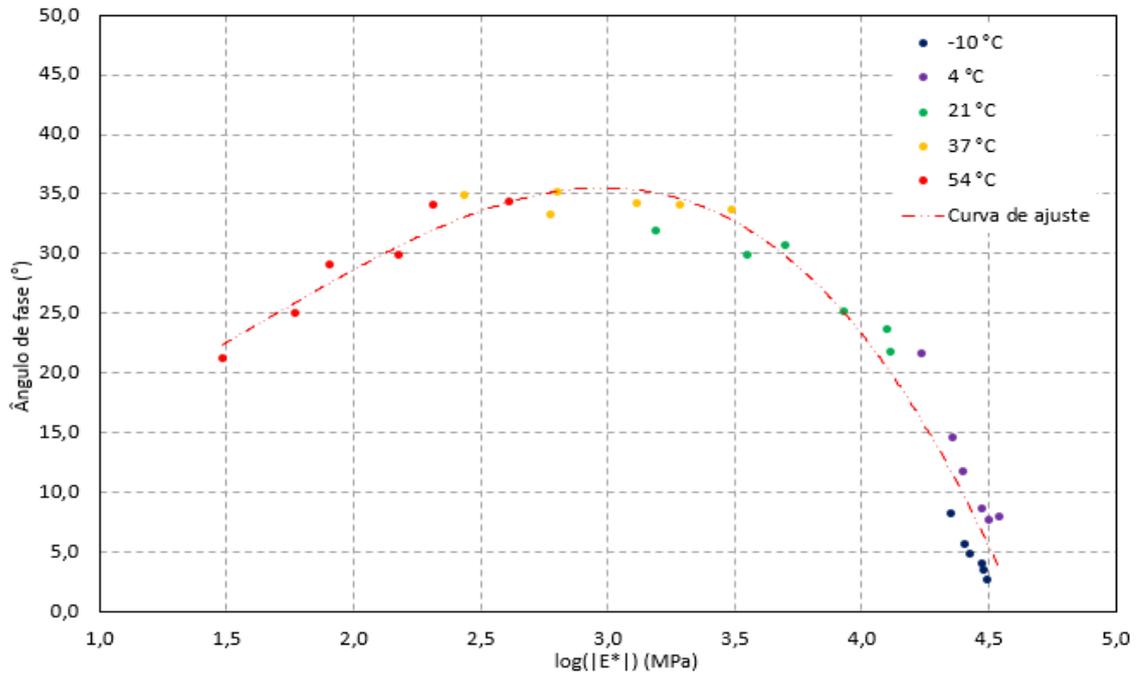
(Fonte: elaborado pelo autor)

O gráfico sugere que a mistura de referência apresenta menor variação de viscosidade em relação às outras duas. Já a mistura contendo a cal calcítica mostrou-se mais sensível a este aspecto, apresentando uma amplitude maior no gráfico.

6.3 Espaço de Black

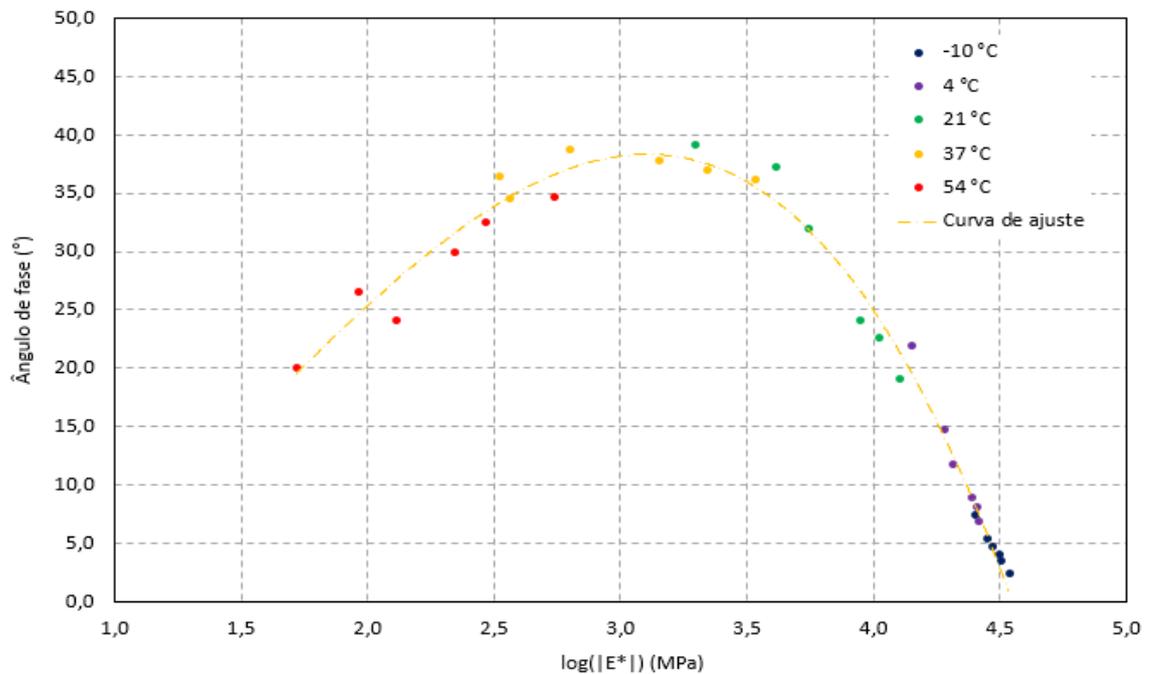
O espaço de Black representa a variação do ângulo de fase em função do logaritmo do módulo dinâmico. Esta análise permite observar que, quanto mais baixa a temperatura, maior será a rigidez da mistura, com o aumento do valor do módulo. Os comportamentos das misturas estudadas estão representados nas figuras 28, 29 e 30.

Figura 27 – Espaço de Black da mistura de referência.



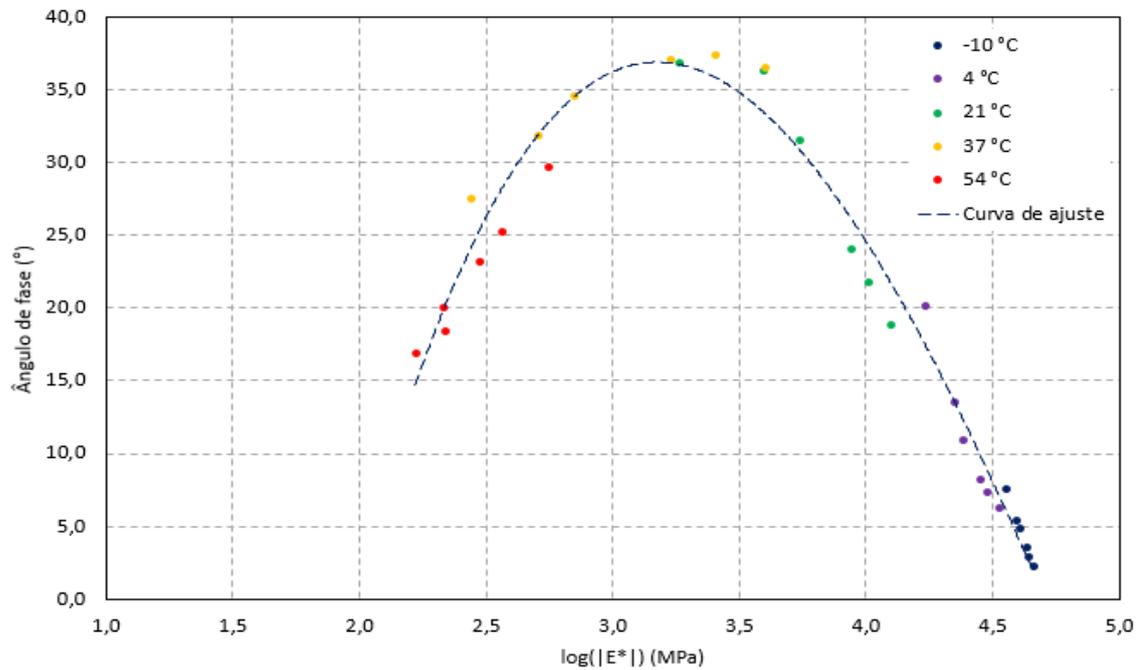
(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 28 – Espaço de Black da mistura com cal calcítica.



(Fonte: elaborado pelo autor)

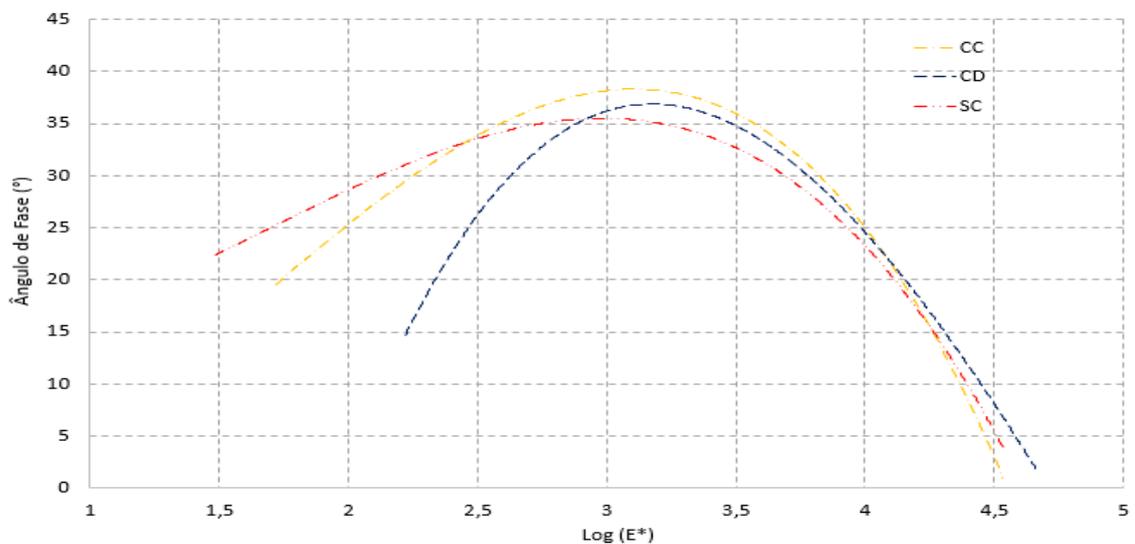
Figura 29 – Espaço de Black da mistura com cal dolomítica



(Fonte: elaborado pelo autor)

Os gráficos, assim como os gráficos de ângulo de fase em função da frequência reduzida, mostram que a temperatura que apresenta valores de ângulo de fase mais altos (viscosidade mais alta) é a temperatura de 37 °C e não a temperatura mais alta ensaiada (54 °C). Entretanto, o espaço de Black mostra também que o módulo dinâmico é mais baixo nesta temperatura, ou seja, rigidez mais baixa. A figura 30 compara as curvas do espaço de Black das três misturas.

Figura 30 – Comparativo do Espaço de Black para as três misturas



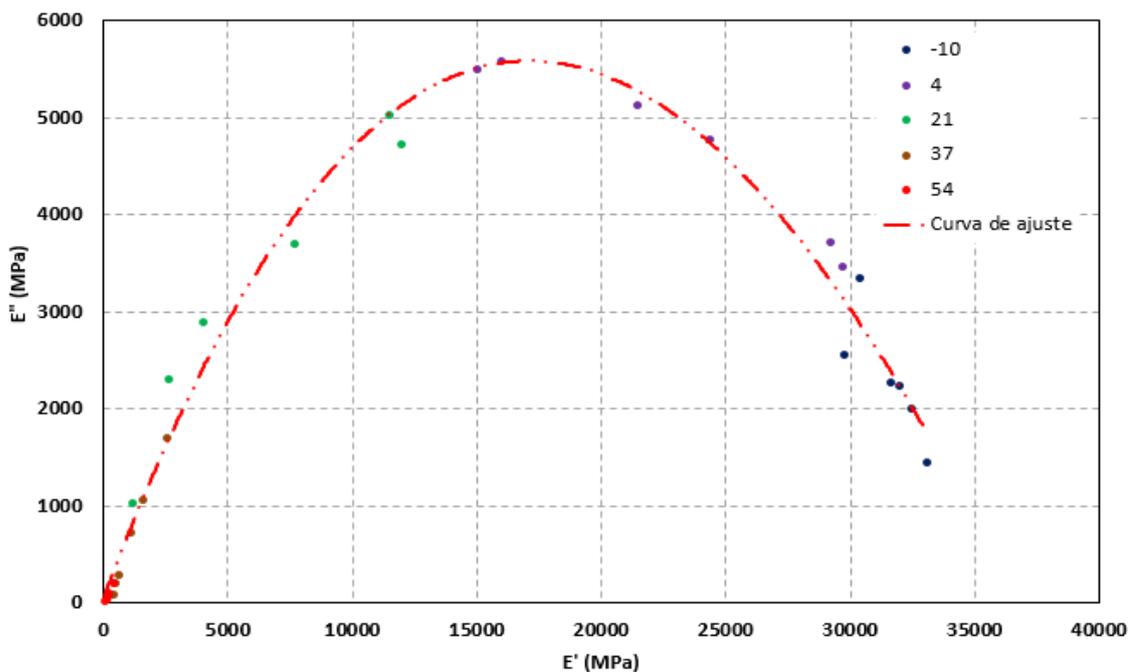
(Fonte: elaborado pelo autor)

No comparativo das misturas, observa-se que a curva da mistura sem cal (SC) está mais aberta, o que sugere menor rigidez desta mistura, ou seja, a temperatura influencia na rigidez da mistura mais consideravelmente na mistura sem cal.

6.4 Plano Cole-Cole

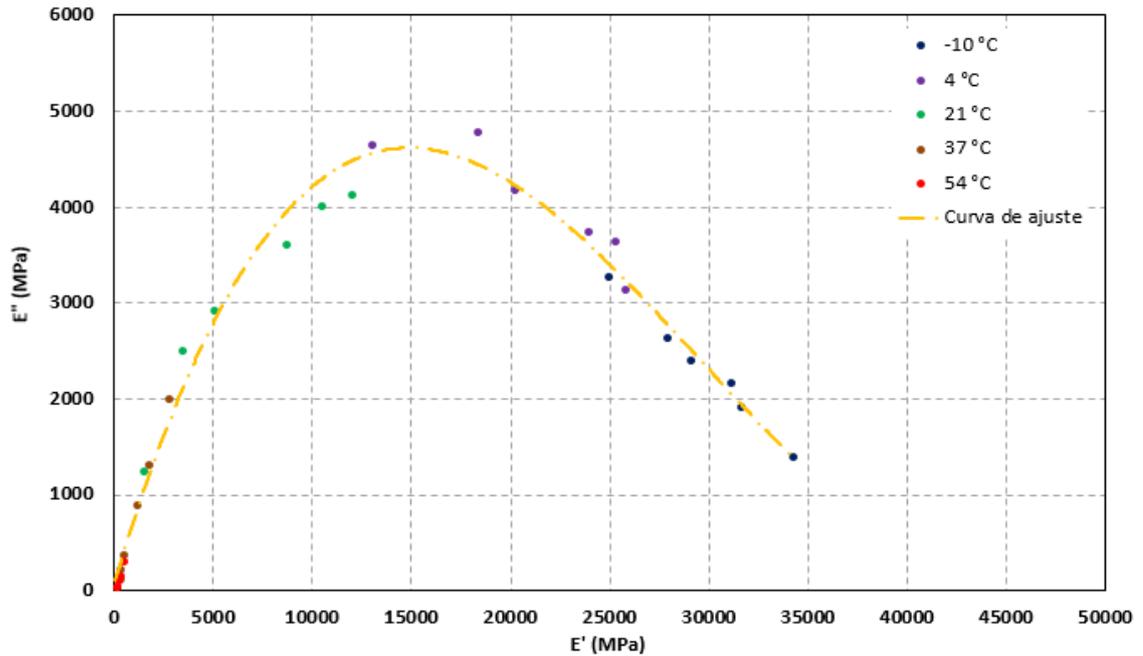
A análise do plano Cole-Cole possibilita comparar os módulos de perda (E'') e de armazenamento (E') de energia das misturas. Isto permite observar a elasticidade e do material, ou seja, quanto maior o E'' , mais energia é dissipada quando aplicado o carregamento e, conseqüentemente, maior a deformação. A figuras 31,32 e 33 sugerem o comportamento viscoelástico das misturas SC, CC e CD.

Figura 31 – Plano Cole-Cole da mistura de referência.



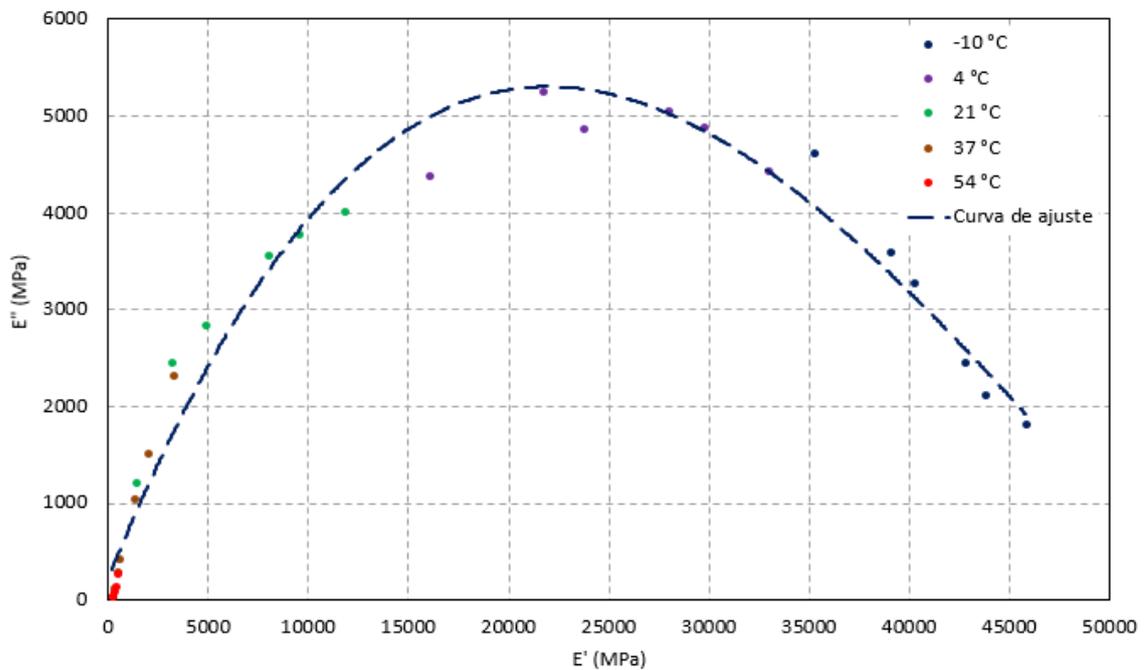
(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 32 - Plano Cole-Cole da mistura com cal calítica.



(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 33 - Plano Cole-Cole da mistura com cal dolomítica

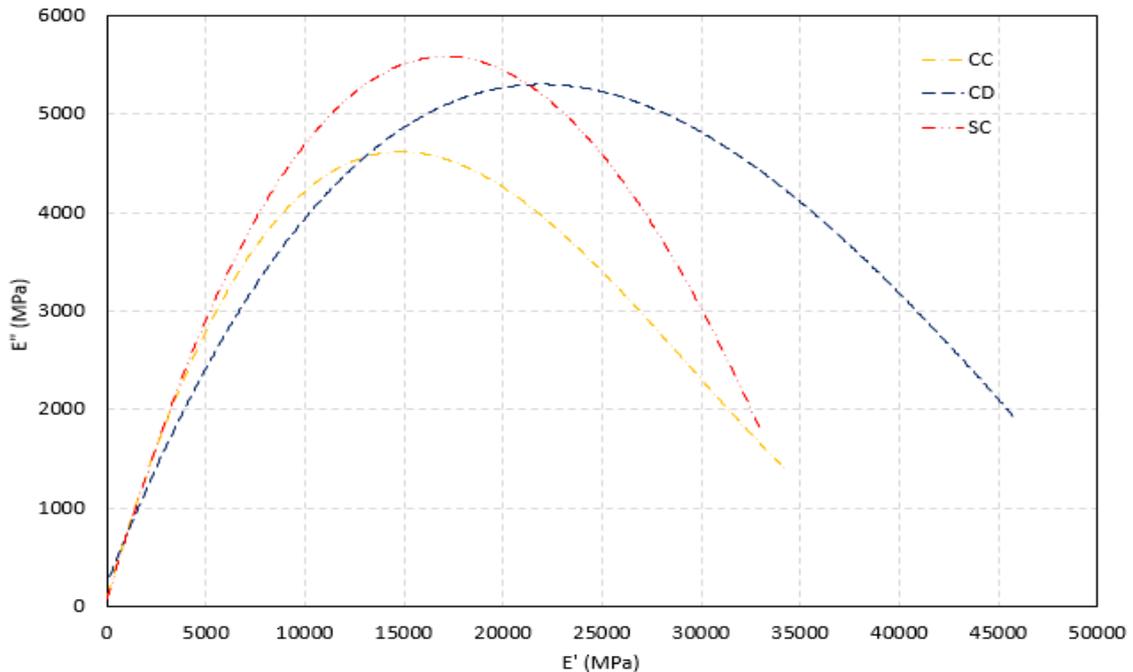


(Fonte: elaborado pelo autor)

As figuras sugerem que nas temperaturas mais altas, tanto E' como E'' têm valores baixos. Entretanto, a declividade de uma suposta reta formada pelos valores encontrados nessas

temperaturas é maior, o que mostra maior dissipação de energia e, portanto, tendência a maiores deformações. O comparativo do comportamento viscoelásticos das misturas é mostrado na figura 34.

Figura 34 – Comparativo do Plano Cole-Cole das três misturas.



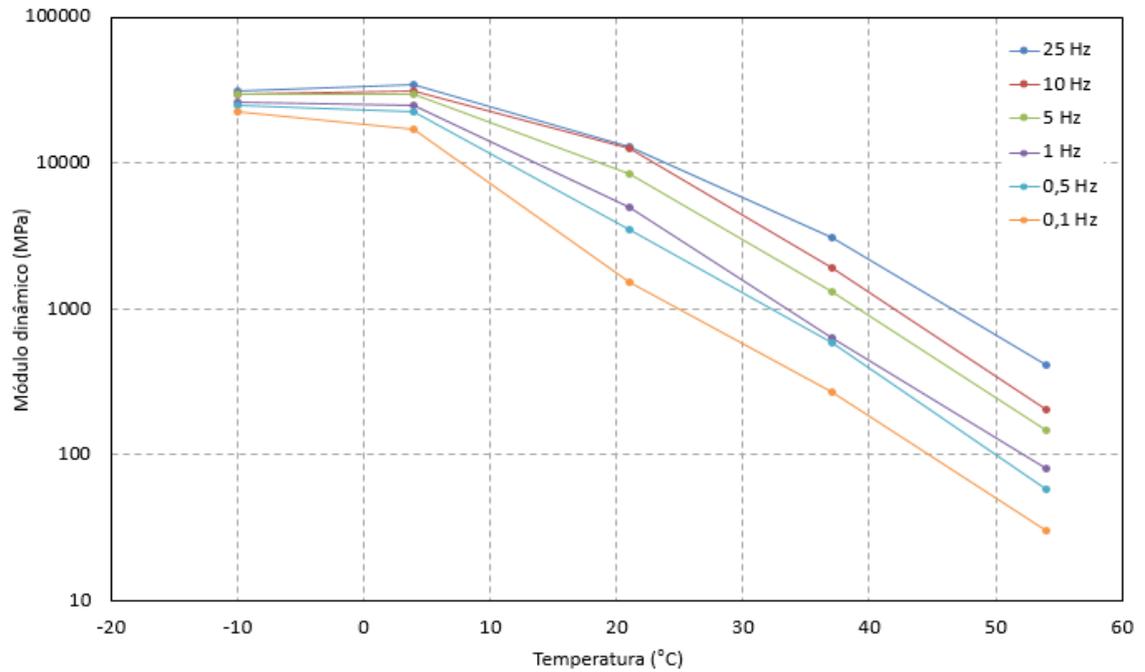
(Fonte: elaborado pelo autor)

A figura comparativa apresenta a curva da mistura com cal dolomítica mais aberta e com tangentes menos inclinadas, podendo explicar uma menor dissipação de energia e uma menor viscosidade deste material. Já a curva da mistura de referência sugere que este material está mais suscetível a dissipação de energia, obtendo maiores deformações.

6.5 Curvas Isócronas

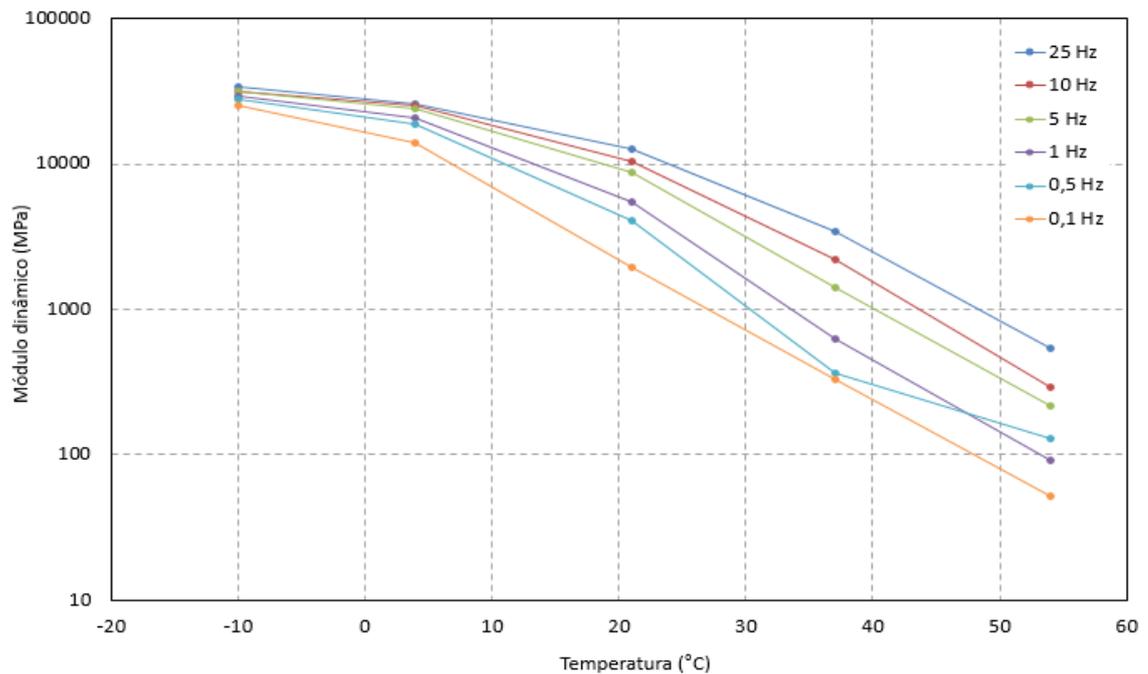
As curvas isócronas permitem analisar a taxa de variação do módulo dinâmico em função da temperatura. Os gráficos que esboçam o comportamento de cada uma das misturas estudadas são mostrados nas figuras 35, 36 e 37.

Figura 35 – Curva isócrona da mistura de referência



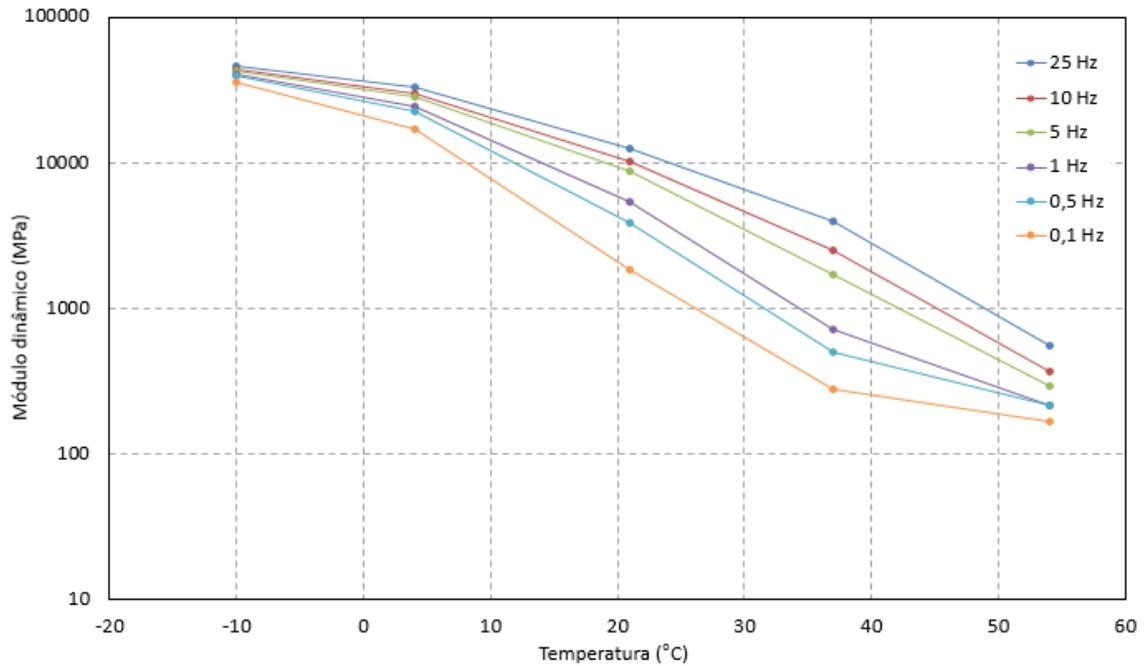
(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 36 – Curvas isócrona da mistura com cal calcítica



(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 37 – Curvas isócronas da mistura com cal dolomítica



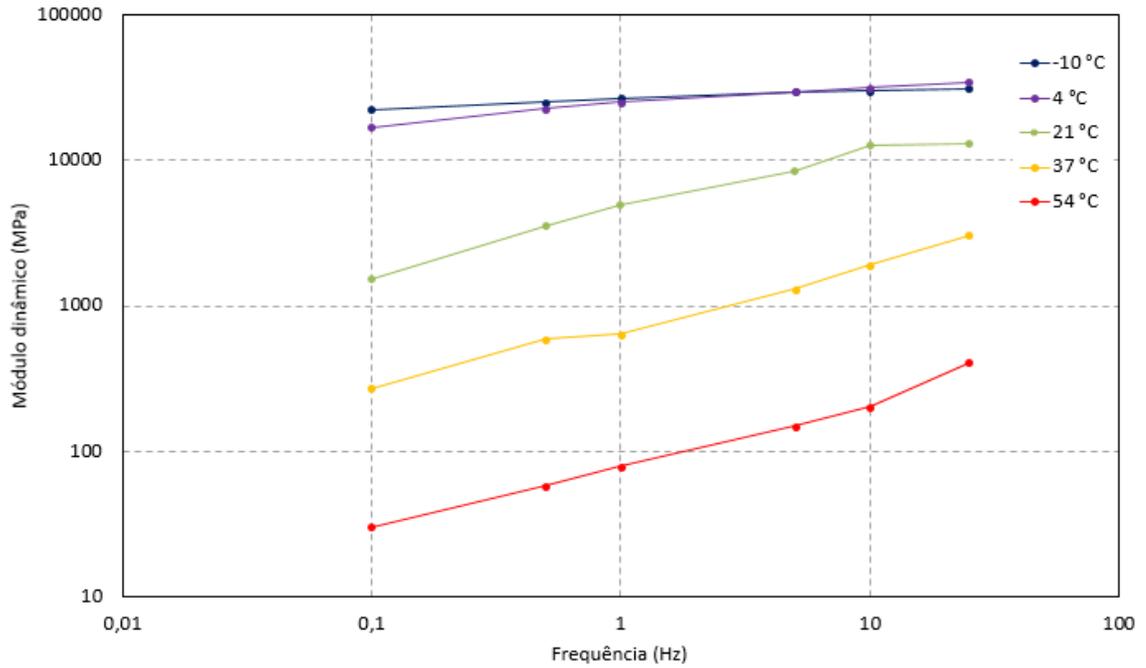
(Fonte: elaborado pelo autor)

Os gráficos analisados sugerem que nas misturas com cal há uma redução maior no módulo, no intervalo de temperatura entre -10 e 4 °C. Na mistura sem cal observa-se uma taxa de variação de módulo similar para todas as frequências de ensaio, a partir da temperatura de 21 °C. Já para as misturas com cal, as taxas variam conforme o aumento da temperatura, com os valores de módulo tendendo a um valor próximo, para todas as frequências.

6.6 Curvas Isotérmicas

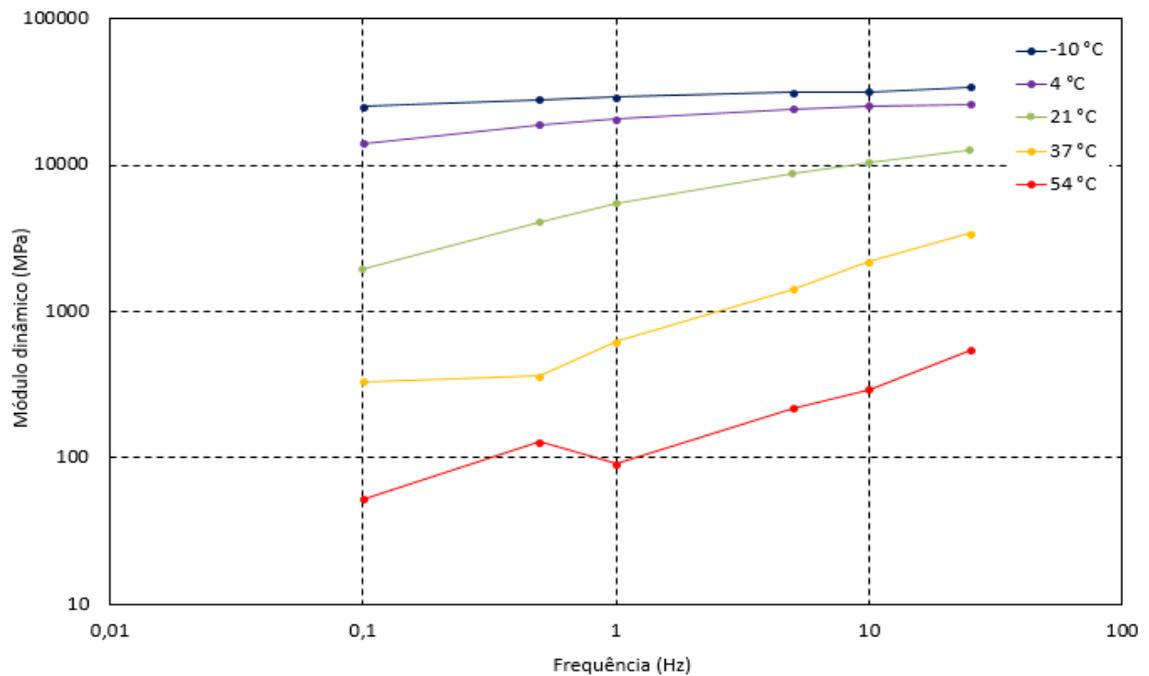
Este tipo de curva foi de suma importância para avaliar a variação do módulo dinâmico em função da frequência de carregamento. As figuras 38, 39 e 40 indicam o comportamento das misturas em função da variação de frequência.

Figura 38 – Curvas isotérmicas da mistura de referência



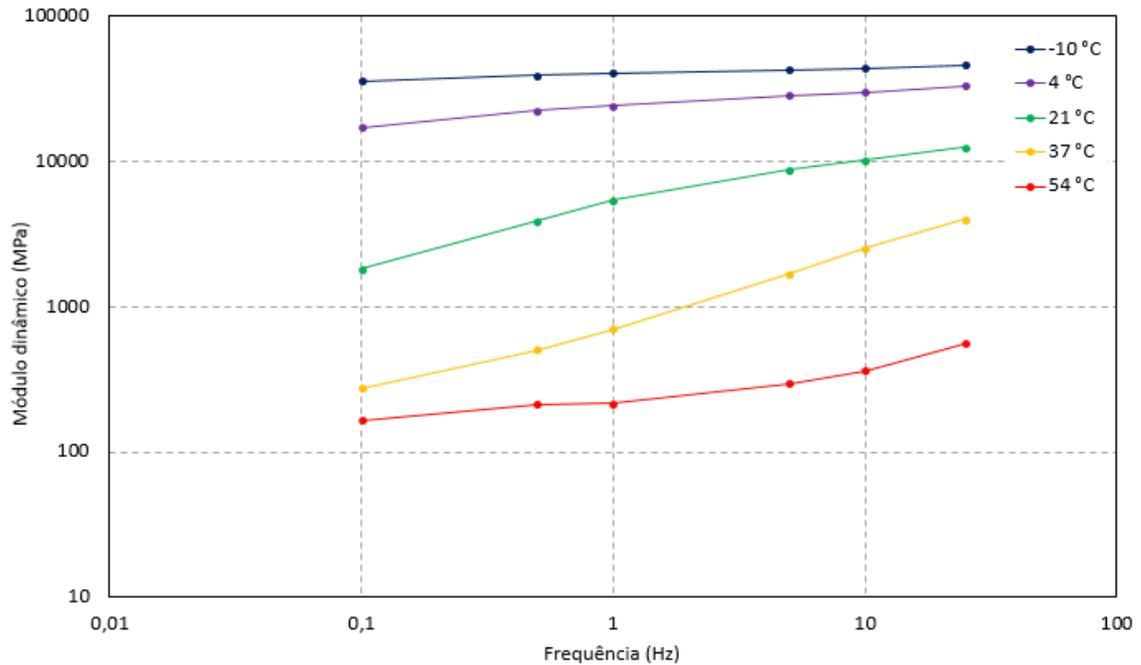
(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 39 – Curvas isotérmicas da mistura com cal calcítica



(Fonte: elaborado pelo autor)

Figura 40 – Curvas isotérmicas da mistura com cal dolomítica



(Fonte: elaborado pelo autor)

Todas as misturas apresentaram comportamento semelhante em relação à variação de módulo em função da frequência, para todas as temperaturas. Nas temperaturas mais baixas, à medida que se aumentou a frequência de ensaio, os valores de módulo pouco variaram, tendendo a um valor próximo. Já nas temperaturas mais elevadas, a taxa de variação de módulo aumentou, sugerindo uma influência maior do aumento da frequência (com exceção da mistura com cal dolomítica que apresentou uma taxa baixa de variação à 54 °C).

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas ao longo desta pesquisa, considerando os ensaios realizados e as análises dos mesmos. Também são sugeridos temas para pesquisas futuras que podem contribuir para as conclusões aqui apresentadas.

7.1 CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento de uma mistura asfáltica com a incorporação de cal hidratada por meio do ensaio de Módulo Complexo. A partir dos resultados obtidos chegou-se às conclusões a seguir.

Por meio das curvas mestras geradas para cada mistura, foi possível observar que as misturas contendo cal mostraram-se mais rígidas à temperaturas mais elevadas, apontando módulos mais altos à temperatura de 54 °C. Este fato pode ser explicado pela capacidade da cal de diminuir o teor de ligante, enrijecendo a mistura. A mistura com a cal dolomítica (CD) mostrou uma menor variação nos valores de módulo dinâmico, apresentando uma curva mestra mais “achatada” e com maiores valores de módulo na temperatura mais alta. A mistura sem cal foi a que apresentou maior variação no módulo, sendo considerada a mistura de maior variação em relação à rigidez.

A comparação entre as curvas de ângulo de fase em função do logaritmo da frequência de carregamento sugere que a mistura com cal calcítica apresenta maior viscosidade, atingindo valores de ângulo de fase maiores. Já a mistura sem cal mostrou uma menor amplitude, indicando que a incorporação de cal aumenta a viscosidade do mástique, influenciando no comportamento mecânico da mistura.

O espaço de Black mostra a maior influência das temperaturas na variação do módulo novamente na mistura sem cal. Essa mistura, além de ser menos rígida, se mostra mais suscetível à variação de temperatura. Por esse motivo, conclui-se que a incorporação da cal, principalmente a dolomítica, interfere positivamente na rigidez da mistura.

Analisando o comparativo do plano Cole-Cole, conclui-se que a mistura contendo cal dolomítica, em temperaturas mais baixas, apresenta maior armazenamento de energia (taxa de variação de E' mais alta), o que resulta numa mistura mais elástica, se comparada às outras duas

misturas nas mesmas temperaturas. Nas temperaturas mais altas, as três misturas tiveram o mesmo comportamento, variando o E'' e dissipando energia mais rapidamente. Isto significa que todas as misturas apresentam comportamento viscoso semelhante em altas temperaturas, suscetíveis às deformações permanentes.

As curvas isotérmicas sugerem que, em temperaturas mais baixas, o módulo dinâmico das três misturas é pouco influenciado pelo aumento da frequência de carregamento. A partir da temperatura de 21 °C a variação torna-se mais acentuada. Isso significa que a deformação da mistura é diretamente proporcional ao tempo de aplicação de carga. Porém, comparando as misturas, observou-se que nas misturas com cal, nas temperaturas mais altas, houve menor variação de módulo em função da frequência de carregamento, mostrando-se misturas mais rígidas, novamente.

Na comparação das curvas isócronas das misturas, observou-se um comportamento diferente para as misturas com e sem cal, até 4 °C. Nesta faixa de temperatura, a mistura sem cal não apresentou variação no módulo dinâmico, ao contrário das misturas com cal, que experimentaram redução. Acima desta temperatura, as misturas tiveram um comportamento semelhante em todas as frequências, sendo que a mistura com cal dolomítica mostrou um comportamento onde os valores de módulo tendiam a um único valor, na temperatura de 54 °C, independente da frequência.

Após as conclusões obtidas por meio das análises de resultado do ensaio de Módulo Complexo, pode-se concluir que, para as misturas estudadas, as cales influenciam no comportamento até uma determinada temperatura, onde os materiais apresentam naturalmente rigidez e elasticidade mais elevadas. Conclui-se também que os dois tipos de cales analisadas influenciaram, embora não significativamente, no comportamento mecânico no campo onde as deformações permanentes predominam, observando o aumento no valor do módulo dinâmico nas temperaturas mais elevadas, principalmente para a mistura com cal dolomítica.

7.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- a) Analisar o módulo dinâmico de misturas com cal e ligante modificado, para avaliar se a cal influencia nas propriedades viscoelásticas dos ligantes modificados.
- b) Avaliar a influência do teor de cal no ensaio de módulo dinâmico, variando os teores de cal.
- c) Analisar outro tipo de cal, para determinar se as cales estudadas são as mais adequadas para se obter as informações significativas que o ensaio de módulo dinâmico oferece.
- d) Avaliar a trabalhabilidade das misturas com cal, verificando que a influência da cal na compactabilidade da mistura interfere no seu desempenho mecânico.
- e) Realizar o ensaio de Flow Number para verificar o comportamento mecânico dessas misturas frente às deformações permanentes.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Santa Maria, RS, 2016.

QUINTERO, C. F. Q. **Influência da temperatura e da consistência do ligante na fadiga e no módulo complexo de misturas asfálticas.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, RS, 2016.

GRANICH, A. R. **Efeitos da adição de cales na vida de fadiga de concretos asfálticos com agregados de basalto e ligantes convencional e modificado.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS, 2015.

PAVIANI, T.M. **Efeitos da incorporação de cal hidratada no comportamento mecânico de concretos asfálticos produzidos com agregado granítico.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS, 2015.

BOCK, A. L. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS, 2012.

CASTRO, S. F. **Misturas asfálticas com incorporação de cal: análise volumétrica e mecânica.** Trabalho de conclusão (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre, RS, 2011.

BOEIRA, F. D.. **Estudo laboratorial do desempenho de misturas asfálticas com diferentes tipos e teores de cal.** Trabalho de conclusão (graduação) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Ijuí, RS, 2011

WITCZAK, M. W. **Development of a máster curve (E*) database for lime modified asphaltic mixtures.** Graduate research. Arizona State University Research Project. Arizona, EUA, 2004.

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.

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 15617**: Misturas asfálticas - Determinação do dano por umidade induzida. Rio de Janeiro, 2015.

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 6296**: Produtos betuminosos semi-sólidos - Determinação da massa específica e densidade relativa. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água, Rio de Janeiro, 1984.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

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

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos pavimentos**. 3ª ed. Rio de Janeiro. Editora Interciência, 2015

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica – materiais, projeto e restauração**. 1ªed. São Paulo. Editora Oficina de Textos, 2007.

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 78**: agregado graúdo: adesividade a ligante betuminoso. 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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 135/2010**: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

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.

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.

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.

APÊNDICE

Resultados de módulo dinâmico, ângulo de fase e desvio padrão

Tabela 7 – Módulo dinâmico, ângulo de fase e desvios padrões da mistura sem cal.

Dados do ensaio				Desvio padrão	
Temp. (°C)	Frequência (Hz)	E* (MPa)	δ (°)	S (E*)	S (δ)
-10	25	31055	2,7	2844,7	0,1
	10	29683	3,6	2525,1	0,3
	5	29342	4,1	1873,1	0,4
	1	26437	4,9	1715,4	0,4
	0,5	25050	5,7	1756,5	0,5
	0,1	22181	8,3	1560,6	0,5
4	25	34265	8,0	113,7	0,8
	10	31478	7,8	2322,1	0,8
	5	29509	8,7	2040,7	0,6
	1	24875	11,9	1451,0	0,3
	0,5	22631	14,7	968,7	0,9
	0,1	16907	21,8	5,6	1,3
21	25	12819	21,8	763,8	0,9
	10	12505	23,8	11,1	0,1
	5	8472	25,3	738,2	1,0
	1	4938	30,7	362,0	2,5
	0,5	3491	30,0	328,8	1,5
	0,1	1539	32,0	71,4	0,8
37	25	3053	33,8	132,2	2,1
	10	1904	34,1	141,4	2,6
	5	1300	34,3	74,4	1,5
	1	633	35,2	51,6	1,6
	0,5	590	33,4	12,1	1,4
	0,1	270	35,0	5,9	0,7
54	25	408	34,4	26,2	2,2
	10	203	34,1	21,1	2,0
	5	149	30,0	7,8	2,7
	1	79	29,1	7,8	2,1
	0,5	58	25,1	2,8	1,9
	0,1	30	21,3	7,8	1,0

(Fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 8 - Módulo dinâmico, ângulo de fase e desvios padrões da mistura com cal calcítica.

Dados do ensaio				Desvio padrão	
Temp. (°C)	Frequência (Hz)	E* (MPa)	δ (°)	S (E*)	S (δ)
-10	25	34228	2,5	1287,6	0,2
	10	31638	3,6	1303,2	0,2
	5	31126	4,1	828,0	0,3
	1	29169	4,8	876,1	0,4
	0,5	27971	5,5	446,2	0,3
	0,1	25148	7,5	900,1	0,2
4	25	25961	7,0	1668,2	0,1
	10	25501	8,2	1798,3	0,5
	5	24194	9,0	2365,1	0,3
	1	20567	11,9	1054,3	0,9
	0,5	18924	14,8	1185,8	1,4
	0,1	13996	22,1	1767,7	3,0
21	25	12640	19,1	1145,6	0,2
	10	10458	22,6	1163,3	0,3
	5	8823	24,2	970,9	0,9
	1	5521	32,0	545,1	0,2
	0,5	4075	37,4	397,8	1,8
	0,1	1955	39,2	181,5	2,5
37	25	3412	36,2	288,5	0,6
	10	2191	37,1	190,9	0,3
	5	1416	37,8	190,2	2,3
	1	623	38,8	38,7	4,7
	0,5	363	34,6	19,6	2,6
	0,1	331	36,5	0,0	3,5
54	25	544	34,8	5,5	0,9
	10	292	32,5	36,8	0,3
	5	218	30,0	19,8	1,7
	1	91	26,6	12,7	1,2
	0,5	128	24,2	3,5	0,8
	0,1	52	20,2	2,1	1,3

(Fonte: elaborado pelo autor)

Tabela 9 - Módulo dinâmico, ângulo de fase e desvios padrões da mistura com cal dolomítica.

Dados de ensaio			Desvio Padrão		
Temp. (°C)	Frequência (Hz)	E* (MPa)	δ (°)	S(E*)	S(δ)
-10	25	45303	2,3	526,8	0,0
	10	43504	3,0	743,9	0,2
	5	42879	3,7	173,2	0,5
	1	40495	4,9	888,1	0,4
	0,5	39371	5,5	869,0	0,7
	0,1	33880	7,6	1039,4	0,4
4	25	33629	6,4	1597,7	0,2
	10	30982	7,5	1778,6	0,2
	5	29937	8,2	783,7	0,0
	1	25324	11,0	1100,2	0,3
	0,5	23272	13,6	1312,5	0,3
	0,1	17706	20,2	1111,9	0,0
21	25	12460	18,9	343,5	1,1
	10	10192	21,8	270,8	1,7
	5	8718	24,2	330,2	0,3
	1	5427	31,6	375,0	1,1
	0,5	3901	36,3	219,8	3,5
	0,1	1815	36,9	127,8	5,6
37	25	3987	36,3	152,5	0,5
	10	2513	37,4	60,4	2,1
	5	1692	36,5	58,6	0,8
	1	705	34,8	42,4	0,3
	0,5	506	32,3	40,3	0,6
	0,1	275	27,6	76,7	2,9
54	25	555	29,7	10,5	2,8
	10	353	25,3	26,8	2,1
	5	294	23,3	105,0	12,1
	1	217	18,5	17,7	0,9
	0,5	213	20,1	8,5	2,3
	0,1	173	17,0	10,6	1,5

(Fonte: elaborado pelo autor)