

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

**Evelyn Paniz Possebon**

**ESTUDO LABORATORIAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE  
MISTURAS COM DIFERENTES CIMENTOS ASFÁLTICOS DE  
PETRÓLEO PRODUZIDOS NO BRASIL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Santa Maria, RS  
2018

Evelyn Paniz Possebon

**ESTUDO LABORATORIAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE  
MISTURAS COM DIFERENTES CIMENTOS ASFÁLTICOS DE  
PETRÓLEO PRODUZIDOS NO BRASIL**

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

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS  
2018

Possebon, Evelyn Paniz

Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil / Evelyn Paniz Possebon.- 2018.  
154 p.; 30 cm

Orientador: Luciano Pivoto Specht

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2018

1. Misturas asfálticas 2. Cimentos asfálticos de petróleo brasileiros 3. Propriedades mecânicas 4. Flow Number 5. Fadiga tração-compressão uniaxial I. Specht, Luciano Pivoto II. Título.

**Evelyn Paniz Possebon**

**ESTUDO LABORATORIAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE  
MISTURAS COM DIFERENTES CIMENTOS ASFÁLTICOS DE  
PETRÓLEO PRODUZIDOS NO BRASIL**

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

**Aprovado em 28 de fevereiro de 2018:**



---

**Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)**  
Orientador

---

**Luis Alberto Herrmann do Nascimento, Ph. D. (Petrobras/CENPES)**



---

**Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS

2018

## AGRADECIMENTOS

Quando é iminente o término de um trabalho de dois anos, a gratidão aflora. Escrevo esta página de agradecimento por todas as pessoas e instituições que participaram deste trabalho e da minha formação durante o período do mestrado.

Primeiramente, agradeço à UFSM, universidade pública e de qualidade na qual tive a oportunidade de ingressar em 2010 para a graduação e em 2016 para o mestrado. O ambiente propício para o desenvolvimento do conhecimento e relação com as pessoas na universidade com certeza impulsionou este trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Professor Luciano, pelos seus esforços para este trabalho acontecer e por confiar em mim para realização deste e de outros trabalhos que estão por vir. Sou realmente muito grata por ter um orientador que me desafia a aprender cada vez mais, sem cobranças, apenas com o bom exemplo. Fico grata pelas respostas de e-mail em tempo recorde e pela dedicação que sei que o senhor tem pelo nosso grupo de pesquisa.

Agradeço aos colegas e amigos do GEPPASV: Ana Helena, Jéssica, Kátia, Valdir, Pedro, Lucas Bueno, Renan, Chaveli e em especial ao Cléber por estar sempre disposto a ajudar, ao Fernando Boeira por implementar e me ensinar o ensaio de fadiga tração-compressão e ao Sílvio por me ajudar com as análises matemáticas de fadiga.

Agradeço aos voluntários Eduardo, Juliana e Tais e aos bolsistas Rômulo, Gustavo, Gerson e Karine por todo o apoio prestado durante a realização dos ensaios. Espero ter contribuído para a formação acadêmica de vocês.

Aos Professores: Tatiana, Deividi, Rinaldo, Francisco Thiago, Leni, Richard Kim e Lélío, muito obrigada pela inspiração e incentivo que me deram para seguir a vida de estudante e pesquisadora na área de pavimentação.

Agradeço ao Luis Alberto H. do Nascimento, ao Professor Deividi, e à Professora Tatiana pela disponibilidade de compor a banca examinadora deste trabalho.

Agradeço aos funcionários do PPGEC e do LMCC por serem tão solícitos: Rosa, Luciane, Marialva, Victor, João, José Pedro, Vilson, Mauro, Eduardo e Fernando Zucchi.

Agradeço às empresas Della Pasqua Engenharia e a Betunel (especialmente ao Dr. Osvaldo Tuchumantel Junior) que contribuíram com a doação dos materiais e transporte dos mesmos até o laboratório.

Agradeço à Petrobras pelos investimentos realizados em nosso grupo de pesquisa e à CAPES/CNPq pela bolsa de mestrado.

Agradeço aos meus pais, Elyta e Neri, por serem os primeiros a me ensinar o gosto pelo estudo, a emoção do saber e aprender. Obrigada por investirem na minha educação e por me darem carinho, amor e atenção sempre. Agradeço ao meu irmão Irvyn pela parceria e amizade e a todo restante da família.

Agradeço imensamente ao meu mestre de vida, Dr. Daisaku Ikeda, por ser meu maior incentivador e por proclamar o humanismo e a paz através da cultura e educação.

Por fim, agradeço ao meu marido Tainã pelo companheirismo e ajuda nos finais de semana de ensaios no laboratório, por preparar tudo para que eu chegasse em casa para escrever tranquila e por me apoiar incondicionalmente.

## RESUMO

### ESTUDO LABORATORIAL DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS COM DIFERENTES CIMENTOS ASFÁLTICOS DE PETRÓLEO PRODUZIDOS NO BRASIL

AUTORA: EVELYN PANIZ POSSEBON  
ORIENTADOR: PROF. DR. LUCIANO PIVOTO SPECHT

A avaliação do comportamento que diferentes cimentos asfálticos de petróleo (CAP) conferem às misturas torna-se importante devido à relação direta existente entre a qualidade do pavimento e o desempenho do ligante. O objetivo desta pesquisa é avaliar o comportamento mecânico de misturas originadas a partir de seis CAPs que representam a produção brasileira, produzidos nas refinarias REFAP (RS), REPAR (PR), REGAP (MG), LUBNOR (CE) e REVAP (SP). Para tal verificou-se, em laboratório, a influência desses CAPs nas propriedades de dosagem, rigidez, dano por fadiga e deformação permanente nas misturas asfálticas. Os CAPs usados em pavimentação variam em suas propriedades e constituição química, pelo fato de serem provenientes de diferentes petróleos ou misturas de petróleos e de diferentes rotas de produção. Para desenvolver o conhecimento da influência dos ligantes nas propriedades das misturas asfálticas é imprescindível conhecer a rigidez da mistura asfáltica quando submetida à diferentes carregamentos, temperaturas e frequências de carregamento e sua resistência à deformação permanente e fadiga. As seis misturas asfálticas produzidas a partir de CAPs diferentes e o mesmo esqueleto pétreo conforme a Faixa C do DNIT, dosadas pela metodologia Superpave, foram submetidas aos ensaios de: Módulo de Resiliência e Módulo Complexo para avaliar a rigidez das misturas; Resistência a tração por compressão diametral, *Flow Number* (FN) e Fadiga à Tração-Compressão uniaxial para avaliar o dano. As análises dos resultados de Módulo Complexo foram realizadas pela modelagem 2S2P1D e os resultados obtidos para as misturas com CAPs 50/70 foram similares enquanto a mistura com CAP 30/45 se mostrou mais rígida e menos suscetível à temperatura. Além da abordagem clássica pelas curvas de Wöhler, o S-VECD foi utilizado como premissa de ensaio e análise dos resultados de fadiga tração-compressão, onde a supremacia da mistura com CAP 30/45 é notável frente às misturas com CAPs 50/70, que se dispõem em três patamares de resistência sendo a com CAP 50/70 da REFAP a mais resistente e as menos resistentes foram as misturas de CAP 50/70 da LUBNOR, REVAP e REGAP. Com relação aos resultados de FN, a mistura com CAP 30/45 suportou maior número de ciclos quando comparada às de CAP 50/70, que apresentaram entre si diferentes patamares de comportamento sendo as misturas com CAP 50/70 da REFAP e da REVAP as com maior FN e a mistura com CAP 50/70 da REPAR com o menor FN. Ficou claro que, sob o ponto de vista da rigidez, todas as misturas com CAP 50/70 têm comportamentos similares. No entanto, sob o ponto de vista de dano há diferenças entre as misturas com CAPs 50/70, mostrando que mesmo com rigidezes similares elas apresentam diferentes comportamentos frente ao dano por fadiga e por deformação permanente.

**Palavras-Chaves:** Cimentos asfálticos de petróleo brasileiros (CAP). Misturas asfálticas. Fadiga tração-compressão uniaxial. *Flow Number*. 2S2P1D. S-VECD.

## ABSTRACT

### STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF MIXTURES WITH DIFFERENT PETROLEUM ASPHALT CEMENT PRODUCED IN BRAZIL

AUTHOR: EVELYN PANIZ POSSEBON

ADVISOR: PROF. DR. LUCIANO PIVOTO SPECHT

The evaluation of the behavior that different petroleum asphalt cements (CAP) give to the mixtures becomes important due to the direct relationship between the quality of the pavement and the performance of the binder. The objective of this research is to evaluate the mechanical behavior of mixtures originated from six CAPs representing Brazilian production, produced in refineries REFAP (RS), REPAR (PR), REGAP (MG), LUBNOR (CE) and REVAP (SP). For this, the influence of these CAPs on the dosage properties, stiffness, fatigue damage and permanent deformation in the asphalt mixtures was verified in the laboratory. The CAPs used in paving change their properties and chemical constitution, because they come from different oils or mixtures of oils and from different production routes. To develop the knowledge of the influence of the binders on the properties of the asphalt mixtures it is essential to know the stiffness of the asphalt mixture when subjected to different loads, temperatures and loading frequencies and their resistance to permanent deformation and fatigue. The six asphalt mixtures produced from different CAPs and the same aggregates (as DNIT C range), dosed by the Superpave methodology, were submitted to the following tests: Resilience Module and Complex Module to evaluate the stiffness of the mixtures; Diametral Tensile Strength, Flow Number (FN) and Direct Tension Cyclic Fatigue test to evaluate the damage. The analyzes of the Complex Modulus results were performed by the 2S2P1D modeling and the results obtained for the mixtures with CAPs 50/70 were similar while the mixture with CAP 30/45 showed to be stiffer and less susceptible to temperature. In addition to the classical Wöhler curves approach, S-VECD was used as testing and analysis premise of Direct Tension Cyclic Fatigue test results, where the supremacy of the mixture with CAP 30/45 is remarkable compared to mixtures with 50/70 CAPs, which are arranged in three resistance levels: the CAP 50/70 of REFAP being the strongest and the least resistant were the CAP 50/70 mixtures of LUBNOR, REVAP and REGAP. In the FN results, the mixture with CAP 30/45 supported a greater number of cycles when compared to CAP 50/70, which presented different levels of behavior among them, where the mixtures with CAP 50/70 of REFAP and REVAP which had the highest FN and the mixture with CAP 50/70 from REPAR which have the lowest FN. It is evident that, from the point of view of stiffness, all mixtures with CAP 50/70 have similar behaviors. However, from the point of view of damage there are differences between the mixtures with CAPs 50/70, showing that even with similar stiffness they present different behavior to the damage due to fatigue and permanent deformation.

**Key-words:** Brazilian petroleum asphalt cement (CAP). Asphalt mixtures. Direct Tension Cyclic Fatigue test. Flow Number. 2S2P1D. S-VECD.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma derivação dos CAP quanto ligantes betuminosos .....	21
Figura 2 - Localização das refinarias dos CAPs utilizados nesta pesquisa .....	24
Figura 3 - Representação esquemática da distribuição dos grupos químicos no asfalto (a) Normal e (b) após envelhecido.....	27
Figura 4 - Representação das estruturas químicas das quatro frações betuminosas: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos .....	28
Figura 5 - Representação do modelo de estrutura coloidal.....	30
Figura 6 - Desenho esquemático do efeito do tempo e da temperatura no LA .....	32
Figura 7 - Grau de desempenho sugerido para ligantes asfálticos por região do Brasil .....	38
Figura 8 - Influência dos agregados e do ligante nos principais defeitos de misturas asfálticas .....	43
Figura 9 - Efeito do percentual de ligante asfáltico sobre o comportamento da mistura.....	44
Figura 10 - Domínios típicos do comportamento mecânico de materiais asfálticos em função das deformações e da temperatura .....	46
Figura 11 - Domínios típicos do comportamento mecânico dos materiais asfálticos em função das deformações e do número de ciclos .....	46
Figura 12 - Domínios típicos do comportamento de concretos asfálticos convencionais.....	47
Figura 13 - Representação do modelo 2S2P1D .....	48
Figura 14 - Representação do modelo 2S2P1D no plano Cole-Cole .....	49
Figura 15 - Deformações permanentes em pavimentos asfálticos .....	52
Figura 16 - Demonstração das tensões de um pavimento .....	55
Figura 17 - Formações geológicas do Estado do RS .....	60
Figura 18 – Brita 3/4” (esquerda), Brita 3/8” (centro) e Pó de Pedra (direita) .....	60
Figura 19 – Depósito dos agregados pétreos da pesquisa no LMCC .....	61
Figura 20 - Curva granulométrica do material pétreo e da cal.....	61
Figura 21 - Curva da composição granulométrica - Faixa C DNIT 031/2006 .....	66
Figura 22 - Composição Granulométrica da mistura com pontos de controle Superpave para TM de 19mm versus diâmetro dos grãos elevados à potência 0,45 .....	67



Figura 23 - Composição Granulométrica da mistura com pontos de controle Superpave para TM de 19mm versus (d/D) elevados à potência 0,45 .....	67
Figura 24 – Misturador Infratest (direita) e Compactador Giratório Servopac (esquerda) .....	69
Figura 25 - Ensaio de MR realizado no equipamento UTM-25 .....	71
Figura 26 - Realização do ensaio de Módulo dinâmico na prensa UTM-25 no LMCC .....	74
Figura 27 – Realização do ensaio de resistência a tração por compressão diametral na prensa UTM-25.....	75
Figura 28 - Realização do ensaio de fadiga tração-compressão uniaxial .....	78
Figura 29 - Gráfico típico da curva característica de dano (C versus S), resultado do ensaio de Fadiga tração-compressão.....	81
Figura 30 – Posições das análises de deformação no fundo do revestimento asfáltico sob o carregamento das rodas do eixo padrão.....	82
Figura 31 - Realização do ensaio <i>Flow Number</i> na prensa UTM-25 do LMCC .....	85
Figura 32 - Curva de deformação permanente acumulada para o ensaio uniaxial de cargas repetidas .....	86
Figura 33 - Volume de vazios versus teor de ligante das misturas dosadas .....	89
Figura 34 - Resultados de MR para as misturas desta pesquisa.....	91
Figura 35 - Isoterma de Módulo dinâmico a 21°C.....	92
Figura 36 - Isoterma de ângulo de fase a 21°C .....	93
Figura 37 - Isócronas de módulo dinâmico a 10Hz.....	93
Figura 38 - Isócronas de ângulo de fase a 10 Hz .....	94
Figura 39 - Comparação das linhas de tendência lineares das curvas log [a(T)] para todas as misturas a 21°C.....	95
Figura 40 - Espaço Cole Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura com CAP 30/45 da REGAP .....	96
Figura 41 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura com CAP 30/45 da REGAP .....	96
Figura 42 - Diagrama Cole-cole obtido pelo 2S2P1D das misturas estudadas .....	97
Figura 43 - Diagrama de Black para todas as misturas obtido pelo 2S2P1D .....	98
Figura 44 - Curvas mestras de Módulo dinâmico para todas as misturas .....	100
Figura 45 - Curvas mestras de Módulo dinâmico para todas as misturas nas baixas frequências .....	101

Figura 46 - Curvas mestras de Ângulo de fase para todas as misturas .....	101
Figura 47 - Curva mestra de módulo dinâmico comparativa com outros autores....	103
Figura 48 - Inferência empírica ao dano por fadiga a 21°C .....	104
Figura 49 - Inferência empírica à deformação permanente a 37°C .....	105
Figura 50 - Resultados de RT para as misturas desta pesquisa .....	107
Figura 51 – Resultado de RT das misturas desta pesquisa e de outros autores ....	108
Figura 52 – Comparação entre os parâmetros adicionais obtidos no ensaio de RT .....	108
Figura 53 - Curvas de Wöhler para todas as misturas da pesquisa .....	111
Figura 54 - Curvas de Wöhler das misturas desta pesquisa comparadas às de Boeira (2018).....	112
Figura 55 - Módulo dinâmico e ângulo de fase versus número de ciclos de ensaio do CP 4 da mistura REVAP para 125 $\mu$ S de deformação alvo.....	114
Figura 56 - Curvas de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) de cada amostra e curva <i>fitting</i> da mistura de CAP 30/45 da REGAP .....	115
Figura 57 - Curvas de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) de cada amostra e curva <i>fitting</i> da mistura de CAP 50/70 da LUBNOR.....	116
Figura 58 - Curvas de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) de cada amostra e curva <i>fitting</i> da mistura de CAP 50/70 da REFAP.....	116
Figura 59 - Curvas de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) de cada amostra e curva <i>fitting</i> da mistura de CAP 50/70 da REGAP .....	117
Figura 60 - Curvas de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) de cada amostra e curva <i>fitting</i> da mistura de CAP 50/70 da REPAR .....	117
Figura 61 - Curvas de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) de cada amostra e curva <i>fitting</i> da mistura de CAP 50/70 da REVAP .....	118
Figura 62 - Curvas Gr versus Nf de cada mistura .....	119
Figura 63 - Curvas geradas pela união dos pontos (modelo) de Nf <sub>N</sub> calculados pela equação de Nascimento (2016) .....	121
Figura 64 - Superposição das curvas geradas pela união dos pontos (modelo) de Nf gerados pela equação de Nascimento (2016) e as curvas de Wöhler (experimental) .....	122
Figura 65 - Resultados de <i>Flow Number</i> para as misturas desta pesquisa.....	124
Figura 66 - <i>Flow Number</i> das misturas desta pesquisa e de misturas de outros autores .....	125

Figura 67 - Diagrama comparativo entre os resultados de todos os ensaios .....	127
Figura 68 - Comparação entre os resultados normalizados de todos os ensaios...	128
Figura 69 - Verificação da resistência ao dano por deformação permanente e fadiga das misturas e critérios de <i>Flow Number</i> .....	129
Figura 70 - Laudo do CAP 30/45 da REGAP.....	149
Figura 71 - Laudo do CAP 50/70 da LUBNOR .....	150
Figura 72 - Laudo do CAP 50/70 da REFAP .....	151
Figura 73 - Laudo do CAP 50/70 da REGAP.....	152
Figura 74 - Laudo do CAP 50/70 da REPAR.....	153
Figura 75 - Laudo do CAP 50/70 da REVAP .....	154

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Localização das refinarias brasileiras e capacidade de refino .....	22
Tabela 2 - Tipo de CAP comercializado pelas 9 refinarias que produzem asfalto no Brasil .....	23
Tabela 3 - Fracionamento SARA para CAP 50/70 produzidos em refinarias brasileiras.....	29
Tabela 4 - Especificação brasileira de CAP .....	33
Tabela 5 - Classificação do ligante em função do tráfego .....	35
Tabela 6 - Determinação do $N_{projeto}$ .....	41
Tabela 7 - Diferenças entre Módulo de Resiliência e Módulo Dinâmico .....	51
Tabela 8 – Nomenclatura das misturas e número de CPs por ensaio realizado na pesquisa .....	58
Tabela 9 – Propriedades do agregado em estudo .....	62
Tabela 10 - Resumo de resultados de análise morfológica pelo AIMS 2 .....	62
Tabela 11 - Resultados de ensaios da cal.....	63
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de especificação dos CAP conforme laudos ..	64
Tabela 13 - Resultados de ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade Brookfield realizados no GEPPASV .....	64
Tabela 14 - Limites de viscosidade para mistura e compactação .....	65
Tabela 15 - Composição granulométrica da mistura asfáltica conforme limites da Faixa C do DNIT ES-031/06.....	66
Tabela 16 - Limites do método Bailey e resultados para a composição das misturas miúdas.....	66
Tabela 17 - Requisitos volumétricos para as misturas dosadas pela metodologia Superpave.....	68
Tabela 18 - Temperaturas dos agregados, mistura e compactação para moldagem	70
Tabela 19 - Resumo dos dados de entrada no AEMC-Sispav .....	82
Tabela 20 - Resultados de $\epsilon t$ ( $\mu S$ ) no fundo do revestimento simulando o pavimento no AEMC com os $ E^* $ das misturas.....	83
Tabela 21 - Critérios de FN para diferentes níveis de tráfego para os autores .....	87
Tabela 22 - Resultados de densidade máxima medida e volume de vazios para as misturas do procedimento de dosagem.....	88
Tabela 23 - Resultado do teor de ligante de projeto, VAM, RBV, MEA e FAD .....	89

Tabela 24 - Resultados de MR para cada amostra, média por posição de ensaio, desvio padrão, coeficiente de variação e resultado de MR médio por mistura .....	90
Tabela 25 - Parâmetros 2S2P1D, C1 e C2 obtidos com a modelagem matemática	94
Tabela 26 - Parâmetros 2S2P1D, C1 e C2 de outros autores utilizados para comparação .....	102
Tabela 27 - Resultados do ensaio de RT e parâmetros de tenacidade, Energias, IT e IF para cada amostra bem como suas médias, DP e CV de cada mistura.....	106
Tabela 28 - Valores de deformação e Nf utilizados para gerar o gráfico das curvas de Wöhler .....	110
Tabela 29 - Resultados de $N_{f_w}$ utilizando as equações das curvas de Wöhler para simulações de pavimentos de cada mistura .....	113
Tabela 30 - Resultados de Nf e Gr para cada amostra .....	119
Tabela 31 - Parâmetros C11, C12, Y, $\Delta$ , $\alpha$ e $ E^* _{ve}$ utilizados para calcular $N_{f_N}$ pela equação de Nascimento (2016).....	120
Tabela 32 - Valores de deformação médias do ensaio e $N_{f_N}$ calculado.....	120
Tabela 33 - Resultados de Nf utilizando as equações das curvas geradas pelos pontos de Nf calculados por Nascimento (2016) para simulações de pavimentos de cada mistura .....	121
Tabela 34 - Resultados de FN, DP, CV e coeficientes do modelo de Francken.....	123
Tabela 35 - Resultados do ensaio de módulo complexo da mistura CAP 30/45 REGAP .....	143
Tabela 36 - Resultados do ensaio de módulo complexo da mistura CAP 50/70 LUBNOR.....	144
Tabela 37 - Resultados do ensaio de módulo complexo da mistura CAP 50/70 REFAP .....	145
Tabela 38 - Resultados do ensaio de módulo complexo da mistura CAP 50/70 REGAP .....	146
Tabela 39 - Resultados do ensaio de módulo complexo da mistura CAP 50/70 REPAR .....	147
Tabela 40 - Resultados do ensaio de módulo complexo da mistura CAP 50/70 REVAP.....	148

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABCR	Associação brasileira de concessionárias de rodovias
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfaltos Diluídos de Petróleo
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
AG	Agregados Graúdos
AIMS	<i>Aggregate Image Measurement System</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AMB	Asfalto Modificado por Borracha
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	Afundamento de Trilho de Rodas
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
BGS	Brita Graduada Simples
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Concreto Asfáltico de Petróleo
CAM	Cimento Asfáltico Modificado
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CENPES	Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia
CGS	Compactador Giratório Superpave
CP	Corpo de Prova
CV	Coeficiente de variação
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
DP	Desvio Padrão
DTT	<i>Direct tension tester</i>

E*	Módulo Complexo
E*	Módulo Dinâmico
EAP	Emulsões Asfálticas
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
ESAL	Carga Equivalente do Eixo Individual
EUA	Estados Unidos
FAD	Faixa de Agregado Dominante
FAF	Proporção Fina de Agregados Finos
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FN	<i>Flow Number</i>
GAF	Proporção Graúda de Agregados Finos
GEPPASV	Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
Gmm	Densidade máxima medida
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
HPA	Compostos Policíclicos Aromáticos
IDOT	Departamento de Transportes de Illinois
IF	Índice de flexibilidade
IT	Índice de tenacidade
LAM	Ligante Asfáltico Modificado
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LPAV/UFRGS	Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LUBNOR	Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transducer</i>
MEA	Massa Específica Aparente
MR	Módulo de Resiliência
MS	Macadame Seco
MSCR	<i>Multipe Stress Creep Recovery</i>
N	Número de Ciclos
NBR	Norma Brasileira
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>

PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
RBV	Relação Betume Vazios
REDUC	Refinaria Duque de Caxias
REFAP	Refinaria Alberto Pasqualini
REGAP	Refinaria Gabriel Passos
REPAR	Refinaria Presidente Getúlio Vargas
REPLAN	Refinaria de Paulínia
REMAN	Refinaria Isaac Sabbá
REVAP	Refinaria Henrique Lage
RLAM	Refinaria Landulpho Alves
RRt	Resistência Retida à Tração
RT	Resistência à Tração por Compressão Diametral
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
S-VECD	<i>Simplified Viscoelastic Continuum Damage</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
VAM	Vazios no Agregado Mineral
VI	Volume Intersticial
VOC	Compostos Orgânicos Voláteis
VV	Volume de Vazios
2S2P1D	<i>2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot</i>



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
2.1	LIGANTES ASFÁLTICOS .....	20
<b>2.1.1</b>	<b>Produção de asfalto no Brasil</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Composição química dos ligantes asfálticos</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Propriedades físicas dos ligantes asfálticos</b> .....	<b>31</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Comportamento dos ligantes asfálticos</b> .....	<b>31</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Especificação dos ligantes asfálticos</b> .....	<b>32</b>
2.1.5.1	Especificação brasileira para cimentos asfálticos de petróleo .....	33
2.1.5.2	Especificação segundo metodologia Superpave.....	34
2.2	MISTURAS ASFÁLTICAS.....	38
<b>2.2.1</b>	<b>Dosagem de misturas asfálticas</b> .....	<b>39</b>
2.2.1.1	Dosagem Superpave .....	40
2.2.1.2	Método Bailey .....	41
2.2.1.3	Metodologia Faixa de Agregado Dominante (FAD).....	42
2.2.1.4	Influência do teor de ligante asfáltico .....	42
<b>2.2.2</b>	<b>Propriedades mecânicas das misturas asfálticas</b> .....	<b>44</b>
2.2.2.1	Rigidez .....	44
2.2.2.2	Deformação permanente.....	52
2.2.2.3	Fadiga .....	55
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>58</b>
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA .....	58
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS.....	59
<b>3.2.1</b>	<b>Agregados</b> .....	<b>59</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Cimentos asfálticos de petróleo</b> .....	<b>63</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Misturas asfálticas</b> .....	<b>64</b>
3.3	ENSAIOS LABORATORIAIS .....	68
<b>3.3.1</b>	<b>Dosagem das misturas asfálticas</b> .....	<b>68</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Módulo de Resiliência</b> .....	<b>71</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Módulo Complexo</b> .....	<b>72</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Resistência à tração por compressão diametral</b> .....	<b>74</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Ensaio de Fadiga à Tração-Compressão Uniaxial</b> .....	<b>77</b>
<b>3.3.6</b>	<b>Flow Number</b> .....	<b>84</b>
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b> .....	<b>88</b>
4.1	DOSAGEM DAS MISTURAS .....	88
4.2	MÓDULO DE RESILIÊNCIA .....	90
4.3	MÓDULO COMPLEXO .....	92
4.4	RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	106

4.5	FADIGA TRAÇÃO-COMPRESSÃO.....	109
<b>4.5.1</b>	<b>Abordagem clássica.....</b>	<b>110</b>
<b>4.5.2</b>	<b>Abordagem pelo método S-VECD.....</b>	<b>113</b>
4.6	<i>FLOW NUMBER</i> .....	123
4.7	CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS.....	126
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>130</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	131
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>133</b>
	<b>APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO COMPLEXO.....</b>	<b>143</b>
	<b>ANEXO A – LAUDOS DOS CAP.....</b>	<b>149</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto asfáltico é o principal tipo de revestimento das rodovias pavimentadas do Brasil. Com a crescente frota de veículos e deterioração das pistas, assegurar a recuperação e a expansão da malha rodoviária brasileira é imprescindível para permitir o crescimento social e econômico.

O projeto de pavimentação deve cumprir todas as demandas estruturais e funcionais escolhendo materiais - dentre eles os ligantes asfálticos - adequados a todas as solicitações, incluindo carregamento dos veículos e o clima.

A avaliação do comportamento de diferentes ligantes asfálticos em misturas torna-se importante devido à relação direta existente entre qualidade do pavimento e desempenho do ligante. Embora na pavimentação sejam utilizados ligantes e agregados para formar a mistura asfáltica, a função do ligante é aglutinar os agregados conferindo propriedades de resistência e durabilidade ao revestimento.

King (1999) e Specht (2002) afirmam que os tipos mais comuns de deterioração dos pavimentos asfálticos são deformação permanente e formação de trincas por fadiga e baixas temperaturas. A formação de trilha de rodas geralmente leva à perda de regularidade e serventia dos pavimentos e resulta da deformação permanente causada pela deformação plástica destes sob carga cíclica, problema que se acentua quando as temperaturas são mais altas. Fissuras por fadiga no pavimento normalmente causam danos severos em sua estrutura.

Conforme Fernandes (2004) e Becker (2003), com o aumento do tráfego e cargas cada vez maiores foi necessário desenvolver ligantes asfálticos com melhor desempenho. Com as modificações do asfalto por polímeros foi possível aumentar a faixa de temperatura de uso e melhorar o desempenho dos pavimentos.

De acordo com Leite (1990) os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) usados em pavimentação variam bastante em suas propriedades e constituição química pelo fato de serem provenientes de diferentes petróleos ou misturas de petróleos e de diferentes rotas de produção.

Atualmente os CAPs aplicados nos pavimentos brasileiros são produzidos e comercializados por nove refinarias da Petrobras. Os principais produtos das refinarias são derivados do petróleo como combustíveis, óleos e lubrificantes. As refinarias estão localizadas em oito estados e são abastecidas por diferentes fontes de petróleo. Além da produção em cada refinaria possuir diferentes etapas, a matriz

do petróleo - que se trata de um material com estrutura química complexa - é diferente, conseqüentemente os CAPs que são produzidos nas nove refinarias brasileiras podem diferir em suas características físicas, químicas e de comportamento quando aplicados na pavimentação.

O atendimento das especificações do CAP não garante semelhança das demais propriedades e por isso é necessário conhecer de forma mais completa a influência que os CAPs produzidos em diferentes refinarias brasileiras têm nas misturas.

A diferença qualitativa entre os CAPs é sensível, tendo em vista que para diferentes regiões de produção, as propriedades dos CAPs variam embora respeitem a mesma especificação. Estas possíveis diferenças são o que impulsionaram a realização deste trabalho, que visa quantificar as propriedades mecânicas, quanto à rigidez e ao dano, das misturas produzidas com CAPs de mesma especificação produzidos em diferentes regiões brasileiras.

Este trabalho está inserido no escopo de pesquisa da Rede Temática de Asfalto da Petrobras, e se justifica pela necessidade de conhecer a fundo como diferentes CAPs atuam no comportamento mecânico das misturas asfálticas com prioridade na rigidez, deformação permanente e fadiga.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa é avaliar em laboratório as propriedades mecânicas fundamentais de misturas produzidas a partir de diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Considerando as misturas asfálticas obtidas utilizando seis diferentes CAPs produzidos e utilizados no Brasil, os objetivos específicos são:

- Avaliar a rigidez das misturas asfálticas por meio de abordagem elástica e viscoelástica;
- Avaliar a deformação permanente das misturas asfálticas;
- Avaliar a resistência ao dano por fadiga das misturas asfálticas;
- Consolidar a técnica de ensaio de fadiga e o S-VECD para misturas brasileiras.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

Para alcançar os objetivos propostos, a dissertação está organizada em capítulos conforme segue.

O Capítulo 1, tem a função de introduzir ao tema, apresentar os objetivos e descrever a pesquisa.

O Capítulo 2 versa sobre a revisão de literatura de alguns temas relevantes para estudo da influência dos CAP em misturas asfálticas: definições, produção, especificações, constituição química, bem como sua dosagem, reologia e o comportamento frente ao dano em misturas asfálticas.

O Capítulo 3 trata do planejamento, dos materiais e de métodos de ensaios aplicados para o estudo, visando atingir os objetivos.

No Capítulo 4 estão dispostos os resultados obtidos nos ensaios realizados e a sua discussão, o último item deste capítulo resume e compara os resultados de todos os ensaios.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Esta dissertação possui ainda um apêndice com resultados de ensaios e um anexo com os laudos dos CAPs.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão da literatura aborda primeiramente sobre os ligantes asfálticos, a sua produção nas refinarias, principais características e comportamento reológico. A segunda parte da revisão versa acerca das misturas asfálticas quanto a sua dosagem e seu comportamento com relação à rigidez e ao dano.

### 2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS

Para Whiteoak (1991), o ligante asfáltico é basicamente um hidrocarboneto composto por moléculas de hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio. A fórmula exata do ligante asfáltico é muito variável, pois é um resíduo derivado do refino do petróleo cru e depende do tipo de petróleo disponível para o refino. O asfalto também é chamado de piche e betume, e sua produção no Brasil iniciou-se em 1956 na Refinaria Presidente Bernardes, em Cubatão (SP).

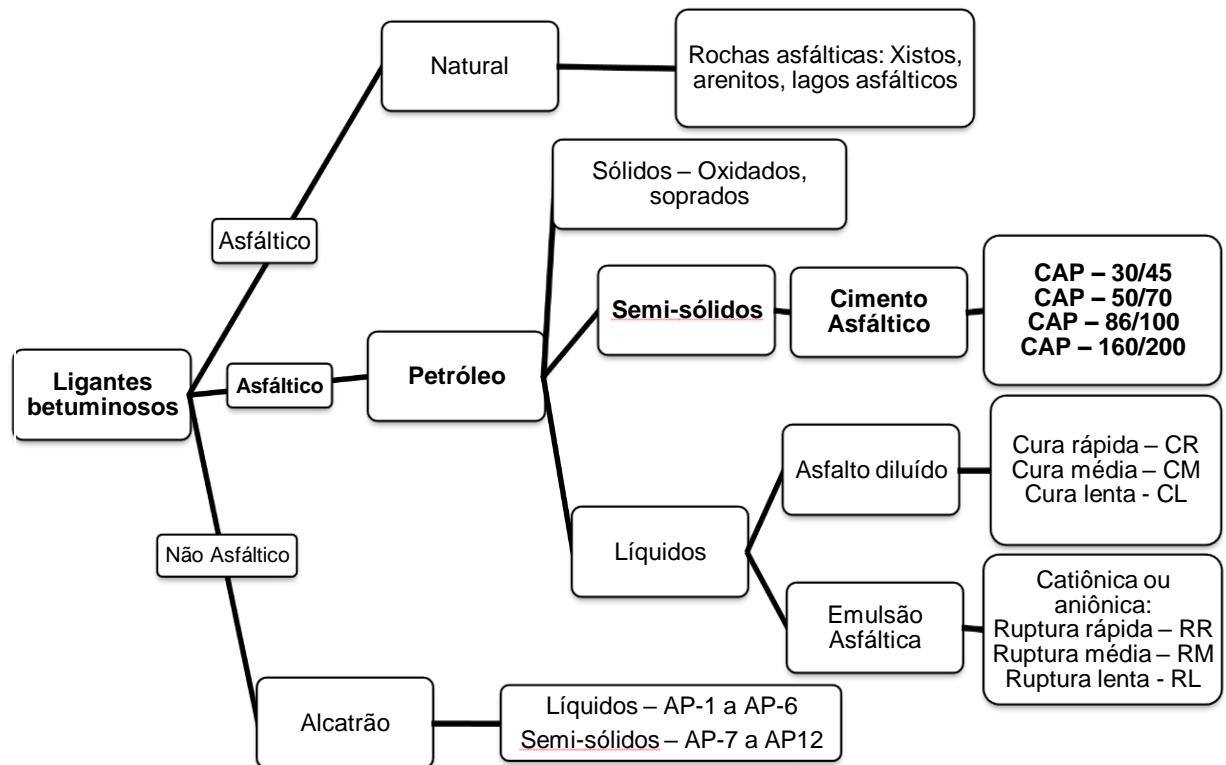
O uso dos combustíveis e produtos derivados de petróleo são responsáveis por grande parte do consumo energético do planeta. Dessa forma, a intensificação na pesquisa tecnológica para o aproveitamento de todos os produtos provenientes da destilação é cada vez mais incentivada. Dentre esses produtos pode-se citar o asfalto, que é obtido pelo refino do óleo cru, e é a matéria-prima principal na indústria de pavimentação.

Os asfaltos podem ser encontrados em estado sólido, viscoso e líquido quando diluídos ou aquecidos. Do ponto de vista da aplicação, há duas classificações básicas para os asfaltos: de pavimentação, objeto deste estudo e industrial, onde se encaixam os asfaltos oxidados os quais são utilizados para impermeabilizações, por exemplo.

Sobre a classificação de materiais betuminosos, é conveniente citar que existem basicamente dois tipos de asfalto: Asfalto natural mineral e asfalto de petróleo.

A Figura 1 demonstra um fluxograma com a classificação básica dos materiais betuminosos, onde é sinalizada em **negrito** a origem dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) que são objeto deste trabalho.

Figura 1 - Fluxograma derivação dos CAP quanto ligantes betuminosos



Fonte: (Adaptado de Bernucci et al., 2010).

O produto obtido no fundo da torre de destilação de vácuo é denominado de Resíduo Asfáltico e quando está de acordo com as especificações das normas brasileiras passa a ter o nome de CAP, objeto deste estudo. O elemento aglutinante que constitui o asfalto é o betume. O CAP é um material ideal para aplicação em trabalhos de pavimentação pelas suas propriedades aglutinantes, impermeabilizantes, flexibilidade e resistência a ácidos. É utilizado em misturas a quente (CBUQ – Concreto Betuminoso Usinado a Quente, PMQ – Pré-misturado a quente); Tratamentos superficiais por penetração invertida e Macadame betuminoso. A temperatura ideal de mistura é obtida em função da sua viscosidade.

### 2.1.1 Produção de asfalto no Brasil

As refinarias Brasileiras transformam o petróleo bruto em produtos como diesel, gasolina, GLP, óleo combustível, querosene de aviação, solventes (hexano, aguarrás e petrosolve), asfalto, coque, enxofre, propeno, CAPs (objeto deste estudo), entre

outros. Segundo a Agência Nacional de Petróleo, gás natural e biocombustíveis – ANP – (2014), a maioria das refinarias brasileiras são controladas pela Petrobras e possuem a capacidade de refino conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Localização das refinarias brasileiras e capacidade de refino

Refinaria	Município (UF)	Capacidade Nominal barril/dia
Replan - Refinaria de Paulínia	Paulínia (SP)	433.997
Rlam - Refinaria Landulpho Alves	S. F. do Conde (BA)	377.389
Revap - Refinaria Henrique Lage	S. J. dos Campos (SP)	251.592
Reduc - Refinaria Duque de Caxias	Duque de Caxias (RJ)	251.592
Repar - Refinaria Presidente Getúlio Vargas	Araucária (PR)	213.853
Refap - Refinaria Alberto Pasqualini S.A.	Canoas (RS)	220.143
RPBC - Refinaria Presidente Bernardes	Cubatão (SP)	169.825
Regap - Refinaria Gabriel Passos	Betim (MG)	166.051
Recap - Refinaria de Capuava	Mauá (SP)	62.898
Reman - Refinaria Isaac Sabbá	Manaus (AM)	45.910
RPCC - Refinaria Potiguar Clara Camarão	Guamaré (RN)	44.658
Rnest - Refinaria Abreu e Lima	Ipojuca (PE)	115.009
FASF - Refinaria Landulpho Alves Fábrica de Asfalto	Madre de Deus (BA)	3.774
Riograndense - Refinaria de Petróleo Riograndense S.A.	Rio Grande (RS)	17.014
Manguinhos - Refinaria de Petróleos de Manguinhos S.A.	Rio de Janeiro (RJ)	14.000
Univen - Univen Refinaria de Petróleo Ltda.	Itupeva (SP)	9.158
Lubnor - Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste	Fortaleza (CE)	10.378
Dax Oil - Dax Oil Refino S.A.	Camaçari (BA)	2.095

Fonte: (ANP, 2018).

Segundo as planilhas disponíveis no site da ANP (2018), no ano de 2015 foram produzidos mais de 2.015.366 m<sup>3</sup> de asfalto no país, em 2016 foram produzidos 2.152.075 m<sup>3</sup> divididos entre CAP 30/45, CAP 50/70 e asfalto diluído CM-30. Em 2017 a produção de CAP caiu para 1.778.448 m<sup>3</sup>. Conforme a Tabela 2, de todas as refinarias brasileiras apresentadas na Tabela 1, nove produzem CAP 50/70 e apenas três produzem CAP 30/45, em função da logística e demanda de mercado.

Conforme a ANP (2018) em 2014 os municípios brasileiros consumiram mais de 3 milhões de toneladas de asfalto. Os produtos de asfalto provenientes das refinarias da Petrobras são basicamente os CAPs 30/45 e 50/70 (são a base de praticamente todos os produtos de asfalto) e os asfaltos diluídos (CM-30). Os demais produtos de asfalto como outros tipos de asfaltos diluídos (ADP), emulsões asfálticas (EAP), asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial, asfaltos modificados por polímero (AMP) ou por borracha (AMB) e agentes rejuvenescedores (AR e ARE) são produzidos a partir de modificações ou adições nos CAPs.



Tabela 2 - Tipo de CAP comercializado pelas 9 refinarias que produzem asfalto no Brasil

<b>Refinaria</b>	<b>Localização</b>	<b>CAP 50/70</b>	<b>CAP 30/45</b>
REDUC	Duque de Caxias, RJ	Sim	Sim
REGAP	Betim, MG	Sim	Sim
REVAP	São José dos Campos, SP	Sim	Não
REPLAN	Paulínia, SP	Sim	Sim
REPAR	Araucária, PR	Sim	Não
REFAP	Canoas, RS	Sim	Não
REMAN	Manaus, AM	Sim	Não
LUBNOR	Fortaleza, CE	Sim	Não
RLAM	Mataripe, BA	Sim	Não

Fonte: (Petrobras, 2018).

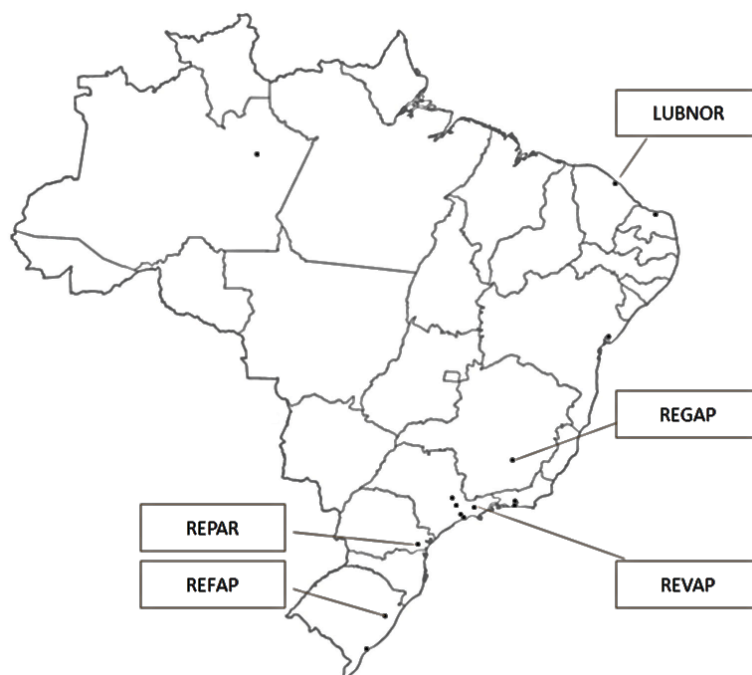
Conforme Leite (1990) as propriedades do CAP variam com o tipo de petróleo e os processos químicos que lhe deram origem.

De acordo com a ANP (2016), poucos compostos derivados do petróleo saem da coluna de destilação prontos para serem comercializados. A maioria deles deve ser processada quimicamente para criar outras frações, melhorar a qualidade ou atender as necessidades do mercado. Dependendo do processo e do tipo de petróleo, pode-se obter mais gasolina ou mais diesel, sendo possível adequar a produção dos derivados às demandas de mercado. Para tal, são aplicados processos físico-químicos que podem alterar as características do resíduo no fundo da torre, entre eles o craqueamento que divide grandes cadeias de hidrocarbonetos em cadeias menores; a alquilação que rearranja várias cadeias para fazer os hidrocarbonetos desejados e o hidrotreatamento que trata cataliticamente com hidrogênio frações leves e médias, como gasolinas e diesel, visando melhorar as respectivas qualidades.

Desta forma, nem para uma mesma refinaria seria possível garantir que os lotes de CAPs sejam idênticos, pois a origem e os processos químicos que o petróleo é submetido variam conforme a retirada do petróleo dos poços e a necessidade de produção.

Neste trabalho foram utilizados CAPs de cinco refinarias diferentes, controladas pela Petrobras e localizadas conforme a Figura 2.

Figura 2 - Localização das refinarias dos CAPs utilizados nesta pesquisa



Fonte: (Autora).

Os aspectos da produção, localização e comercialização dos CAP de cada uma das cinco refinarias selecionadas, conforme Petrobras (2016) são:

I. Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP): Instalada no município gaúcho de Canoas-RS. Processa 32 mil m<sup>3</sup>/dia e atende principalmente ao mercado regional, com foco na maximização da produção de óleo diesel. Os principais produtos são: Diesel, gasolina, GLP, óleo combustível, querosene de aviação, solventes (hexano, aguarrás e petrosolve), asfalto, coque, enxofre, propeno. Esta refinaria atende o Rio Grande do Sul, parte de Santa Catarina e Paraná, além de outros estados, destinando o excedente para exportação.

II. Refinaria Gabriel Passos (REGAP): Está localizada em Betim, na região metropolitana de Belo Horizonte. Os principais produtos são: Gasolina A, diesel, combustível marítimo (bunker), querosene de aviação (QAV), gás liquefeito de petróleo (GLP), asfaltos, coque verde de petróleo, óleo combustível, enxofre e aguarrás. Atende grande parte do mercado mineiro e eventualmente o Espírito Santo.

III. Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR): Tem capacidade de processamento de 33 mil m<sup>3</sup> de petróleo por dia. Localizada no município de Araucária, no Paraná, é responsável por aproximadamente 12% da produção nacional de derivados de petróleo. Seus produtos atendem principalmente os mercados do

Paraná, Santa Catarina, sul de São Paulo e do Mato Grosso do Sul. Os principais produtos são: Diesel, gasolina, GLP, coque, asfalto, óleos combustíveis, QAV, propano, óleos marítimos.

IV. Refinaria Henrique Lage (REVAP): Está localizada em São José dos Campos, no Vale do Paraíba. Atualmente responde, principalmente, pelo abastecimento do mercado paulista e do centro-oeste do país. A refinaria destaca-se pela localização geográfica, às margens da Rodovia Presidente Dutra, com acesso aos principais centros consumidores: São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e ao Porto de São Sebastião, no litoral norte Paulista. Seus principais produtos são: Asfalto diluído, cimento asfáltico, coque, enxofre, gás carbônico, gasolina, GLP, hidrocarboneto leve de refinaria (HLR), nafta, óleo combustível, óleo diesel, propano, querosene de aviação (QAV-1) e solvente médio.

V. Refinaria Lubrificantes e Derivados do Nordeste (LUBNOR): É uma das líderes nacionais em produção de asfalto e a única no país a produzir lubrificantes naftênicos, um produto próprio para usos nobres, tais como, isolante térmico para transformadores de alta voltagem, amortecedores para veículos e equipamentos pneumáticos. Produz 235 mil toneladas/ano de asfaltos e 73 mil metros cúbicos por ano de lubrificantes naftênicos. A refinaria responde por cerca de 13% da produção de asfaltos do Brasil. Além de produtora, é também distribuidora de asfalto para nove estados das regiões Norte e Nordeste, principalmente do Ceará, parte de Pernambuco e parte do Pará. Todo o petróleo utilizado pela Lubnor é do tipo ultra pesado: 85% provenientes do Espírito Santo e o restante, 15%, do Ceará. Do total processado, 62% do volume é destinado à produção de asfalto, abastecendo todos os estados do Nordeste.

### **2.1.2 Composição química dos ligantes asfálticos**

A forma com que os átomos compõem o ligante asfáltico é extremamente complexa e a proporção das moléculas formadas por esses átomos e a maneira como eles interagem entre si afetam o comportamento do material (Roberts, 1991). Por se tratar de uma matriz complexa, os ligantes asfálticos são de difícil caracterização pois essas características também dependem de onde e como o CAP foi extraído. Geralmente são compostos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de

heteroátomos como oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais como níquel, ferro e vanádio (Whiteoak, 1991).

Segundo AASHTO SP-1 (1997), as ligações químicas entre as moléculas explicam a natureza viscoelástica dos ligantes, uma vez que elas são relativamente fracas e se quebram facilmente em função da temperatura e de esforços cisalhantes.

A composição química do asfalto tem grande importância nas propriedades físicas do CAP e afetam diretamente o desempenho das misturas asfálticas. Lesueur (2009), Faxina (2006) e Pinheiro (2004) defendem que o CAP pode ser dividido em asfaltenos e maltenos.

Os asfaltenos são compostos aromáticos com mais de cinco anéis benzênicos condensados e possuem grande polaridade. São obtidos por precipitação na presença de n-heptano, um solvente não polar e consistem de componentes cíclicos e parafínicos ao redor de anéis aromáticos. Algumas de suas propriedades têm grande influência na estrutura do asfalto. Devido a sua alta polaridade, os asfaltenos têm a tendência de se associarem, aumentando a viscosidade do CAP.

Conforme Lewandowski (1994), os maltenos são subdivididos em resinas e óleos. As resinas funcionam como agentes peptizantes que dispersam os asfaltenos nos óleos. Os óleos, saturados e aromáticos, possuem estrutura parafínica-aromática. Na oxidação, as resinas transformam-se em asfaltenos, enquanto os óleos transformam-se em moléculas de resinas ou asfaltenos. A fase que circunda os asfaltenos dá ao asfalto um comportamento newtoniano e mantém os asfaltenos em uma solução coloidal como mostrado na Figura 3.

Atualmente, o tipo de classificação química mais utilizado nos centros de pesquisa dos EUA e Europa é o fracionamento SARA, que foi definido pelos autores Corbett (1969), Lesueur (2009); Di Benedetto & Corté (2005); Whiteoak (1991) e Leite (1990), como o fracionamento químico do CAP que consiste em isolar os tipos de componentes moleculares em termos de solubilidade e tamanho da molécula. São eles: saturados (S), aromáticos (A), resinas (R) e asfaltenos (A). Conforme os autores, algumas características dos compósitos SARA são:

- I. Saturados: São óleos viscosos não polares de coloração clara, constituídos por hidrocarbonetos alifáticos e representam entre 5% e 20% da massa total de betume. Têm influência negativa na suscetibilidade térmica e em maior concentração podem amolecer o produto;

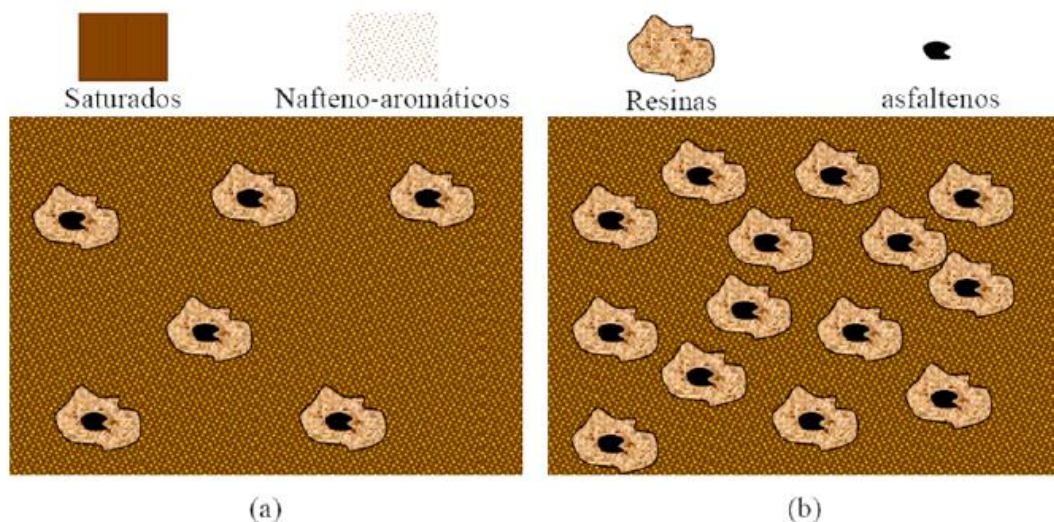
II. Aromáticos: Estas moléculas aromáticas são o constituinte principal do betume (40-65%). O seu aspecto é um líquido que varia do amarelo ao vermelho e é viscoso à temperatura ambiente. A massa molecular média está compreendida entre 300 e 2000g/mol. Agem como plastificantes, contribuindo para a melhoria das propriedades físicas do CAP;

III. Resinas: Representam de 13% a 25% da massa do CAP. O aspecto é sólido ou semi-sólido, com uma cor escura. A sua massa molecular média está compreendida entre 500 e 50000g/mol e a sua dimensão está compreendida entre 1 e 5nm. Este tipo de molécula tem natureza polar, que é responsável pelas propriedades adesivas do betume. Geralmente têm influência negativa na suscetibilidade térmica, mas contribuem na melhoria da ductilidade e dispersão dos asfaltenos;

IV. Asfaltenos: São de 5% a 25% da massa total do CAP. É uma fase sólida escura, amorfa, insolúvel em n-heptano. A massa molecular média é elevada, entre 1000 e 100000 g/mol, enquanto o tamanho está entre 5 e 30 nm. Geralmente é associado à melhoria da suscetibilidade térmica e aumento da viscosidade.

As resinas, os aromáticos e os saturados são referidos como "maltenos".

Figura 3 - Representação esquemática da distribuição dos grupos químicos no asfalto (a) Normal e (b) após envelhecido

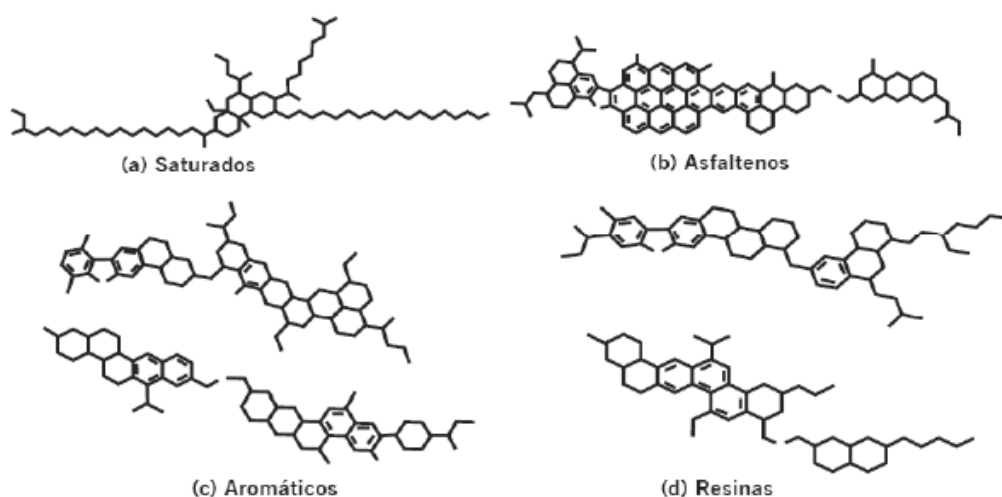


Fonte: (Pinheiro, 2004).

A Figura 4 demonstra a representação química das estruturas das quatro frações betuminosas.

Mangiafico (2014) concorda que o isolamento de cada um dos quatro tipos moleculares realizado pelo método SARA consiste em separar asfaltenos por precipitação em n-heptano e os maltenos são divididos em saturados, aromáticos e resinas por cromatografia em sílica gel ou alumina.

Figura 4 - Representação das estruturas químicas das quatro frações betuminosas: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos



Fonte: (Bernucci et al., 2010).

A pesquisa encomendada em 2002 e publicada em 2004 pela Associação Brasileira de concessionárias de rodovias (ABCR) objetivou verificar principais propriedades dos CAP brasileiros e até 2018 esta pesquisa não foi repetida. Entre os ensaios de caracterização foi realizado um estudo da variação entre os valores do fracionamento SARA para alguns CAP brasileiros. Em 2002 os CAP brasileiros foram caracterizados quimicamente por porcentagem do fracionamento SARA segundo o método ASTM D 4124. A Tabela 3 resume os dados obtidos em resultados de fracionamento de CAP coletados diretamente em cinco refinarias e CAP coletados após a usinagem.

Ainda é possível inferir da Tabela 3 que os dados de amostras da mesma refinaria possuem variações entre si, o que comprova que a produção não é constante quando se fala em frações químicas. Um dos motivos é que por se tratar de uma matriz orgânica complexa, dependendo da temperatura e condições de refino e usinagem o asfalto se reorganiza quimicamente, formando novos compostos que se enquadram em frações diferentes. Desta forma é iminente que quando a produção

varia de refinaria o fracionamento também varia mesmo para CAP de mesma nomenclatura e especificações.

Tabela 3 - Fracionamento SARA para CAP 50/70 produzidos em refinarias brasileiras

Referência		Resultados			
Refinaria	Tipo de amostra	Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfaltenos
REVAP	Refinaria	9,70	37,8	31,6	20,9
	Usina	8,90	34,1	36,6	20,7
	Refinaria	11,2	33,0	35,6	20,4
	Usina	9,30	30,1	41,3	19,4
	Refinaria	8,70	41,2	30,8	19,4
	Usina	7,80	36,9	32,0	23,3
REPLAN	Refinaria	9,80	37,1	35,3	17,8
	Usina	10,7	33,6	40,2	15,4
	Refinaria	11,4	40,5	32,1	16,1
	Usina	10,1	32,0	41,5	16,4
REPAR	Refinaria	13,8	40,6	28,9	16,7
	Usina	13,0	32,7	35,8	18,6
	Refinaria	12,5	38,8	30,6	18,1
	Usina	12,5	33,6	35,3	18,6
REDUC	Refinaria	4,30	54,6	25,6	15,5
	Usina	3,70	53,4	26,7	16,2
	Refinaria	2,60	58,9	23,2	15,3
	Usina	2,80	52,3	28,2	16,7
REFAP	Refinaria	8,50	49,5	26,6	15,4
	Usina	9,00	38,7	33,7	18,7

Fonte: (ABCR, 2004).

Brülé et al. (1986) consideraram que a reologia e a composição química se inter-relacionam, quando se compreende a estrutura do CAP.

A variação na proporção entre as frações químicas do ligante asfáltico origina asfaltos com diferentes estruturações (organização) de composições químicas e estruturação. A organização das frações químicas SARA foram estudadas através da elaboração de alguns modelos, cujo mais famoso e utilizado é o de Yen, desenvolvido na década de 60 após a visualização das moléculas de asfalteno por difusão de raios X. Yen et al. (1961), mostraram que os planos de anéis aromáticos são ligados por ligações de hidrogênio ou pontes de Enxofre (S) e Oxigênio (O), formando pilhas de 3 e 5 planos, ou folhas que se associam em partículas coloidais, seja sob forma de micelas ou sob a forma de aglomerados de micelas. Dessa forma Yen definiu pela primeira vez um arranjo tridimensional para o CAP. Esses sistemas coloidais constituídos por uma suspensão de micelas de asfaltenos, peptizadas pelas resinas num meio oleoso (óleos saturados e aromáticos), representados na Figura 5. Dessa forma o CAP pode ser definido quimicamente como um meio coloidal complexo onde

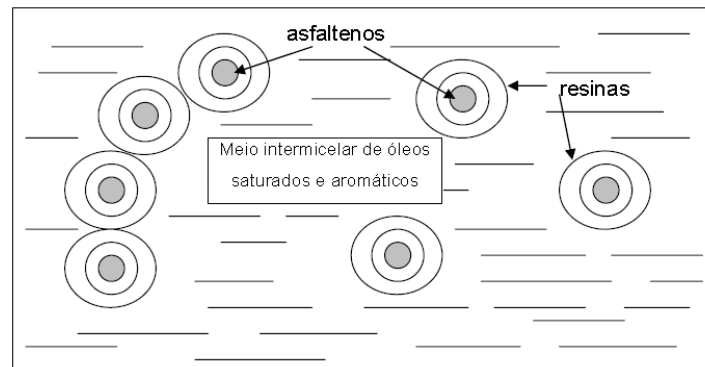
as moléculas isoladas constituem a fase contínua e as micelas e aglomerados de micelas constituem a fase dispersa que possui o equilíbrio: moléculas ↔ micelas ↔ aglomerados. Este equilíbrio está relacionado com as propriedades físicas e reológicas do CAP além de ser importante a previsão da estabilidade coloidal do asfalto e sua compatibilidade com aditivos. Gaestel (1971), definiu o Índice de Instabilidade coloidal,  $I_c$ , calculado através da Equação 1, para caracterizar o equilíbrio coloidal entre as fases.

$$I_c = \frac{S+A}{R+Ar} \quad (1)$$

Onde: S = Saturados, A = Asfaltenos, R = Resinas e Ar = Aromáticos.

Considera-se que quanto maior o  $I_c$  maior é a instabilidade global do asfalto e mais difícil a incorporação de um modificador como polímeros ou borracha. Conforme Yen, os ligantes com  $I_c$  inferior a 0,1 são pouco estruturados e o comportamento é conhecido como SOL. Quando os valores de  $I_c$  são superiores a 0,5, representam um ligante muito estruturado, comportamento chamado de GEL. Quando os valores são entre 0,1 e 0,5 representam os ligantes SOL-GEL de comportamento intermediário.

Figura 5 - Representação do modelo de estrutura coloidal



Fonte: (Adaptado de Yen et. al, 1961).

Existem outros modelos, por exemplo o modelo do *Strategic Highway Program* (SHRP) que desconsidera o conceito de asfaltenos e maltenos e prevê o comportamento reológico e também o envelhecimento, no entanto o modelo de Yen e o Índice de estabilidade coloidal continuam sendo amplamente utilizados principalmente na previsão de compatibilidade do CAP com agentes modificadores.



### 2.1.3 Propriedades físicas dos ligantes asfálticos

As propriedades físicas sob o ponto de vista de características do material são comumente associadas à sua temperatura. Além de ser um material que tem suas propriedades alteradas de acordo com a temperatura, os ligantes asfálticos são viscosos, a combinação destas propriedades o torna um material termoviscoelástico no domínio das pequenas deformações.

Bernucci et al. (2010) explicam que o modelo estrutural do ligante como uma dispersão de moléculas polares em meio não polar, ajuda a entender o efeito da temperatura nos ligantes asfálticos. Em temperaturas muito baixas, as moléculas não têm condições de se mover umas em relação às outras e a viscosidade fica muito elevada; nessa situação o ligante se comporta como um sólido. À medida que a temperatura aumenta, algumas moléculas começam a se mover podendo mesmo haver um fluxo entre elas. O aumento do movimento faz baixar a viscosidade e, em temperaturas altas, o ligante se comporta como um líquido. Esta transição pode ser reversível quando no domínio da viscoelasticidade linear.

Segundo Hunter (1994) e Asphalt Institute (2007), as principais propriedades físicas do CAP são: durabilidade, adesividade, suscetibilidade térmica e endurecimento.

### 2.1.4 Comportamento dos ligantes asfálticos

A característica de termoviscoelasticidade desse material manifesta-se no comportamento mecânico, sendo suscetível à velocidade, ao tempo e à intensidade de carregamento, e à temperatura de serviço conforme Bernucci et al. (2010).

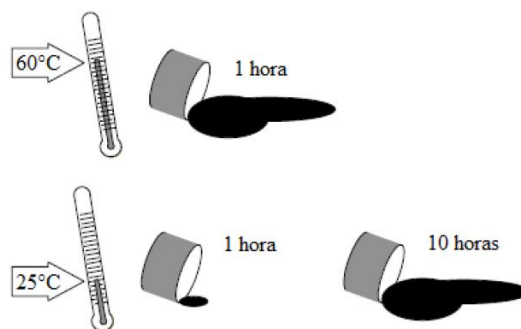
O comportamento dos ligantes asfálticos foi descrito no material *Asphalt Institute* (1995), o qual será alvo desta revisão. Os efeitos do tempo e da temperatura estão relacionados com as propriedades do ligante asfáltico. Por exemplo, o comportamento que o ligante apresenta quando mantido a altas temperaturas por um curto período de tempo é semelhante ao que apresenta quando mantido por longos períodos a temperaturas amenas. A Figura 6 ilustra um exemplo de comportamento de ligantes asfálticos, onde quando aquecido a 60°C durante uma hora o ligante tem o mesmo comportamento que quando aquecido a 25°C durante dez horas. Esta figura

representa um conceito importante no estudo do asfalto: o princípio da superposição tempo e temperatura.

Quando solicitado por carregamentos estacionários (veículos trafegando a baixas velocidades ou cargas estacionadas), em altas temperaturas, o CAP se assemelha a um líquido viscoso. Muitas vezes os líquidos viscosos são chamados de plásticos devido à parcela de deformação que o material não consegue recuperar após o carregamento ser retirado. A estrutura do CAP é responsável por resistir às solicitações na mistura asfáltica.

Os ligantes asfálticos, quando submetidos a temperaturas intermediárias, apresentam comportamento tanto viscoso quanto elástico. Quando submetido a temperaturas baixas o CAP apresenta comportamento elástico e pode se tornar frágil quando excessivamente carregado podendo ocasionar rompimento. Assim sendo, a suscetibilidade à temperatura e ao tempo de carregamento do CAP, a reologia (ou viscoelasticidade) é uma variável importante no desempenho dos pavimentos asfálticos.

Figura 6 - Desenho esquemático do efeito do tempo e da temperatura no LA



Fonte: (Adaptado de Asphalt Institute, 1995).

### 2.1.5 Especificação dos ligantes asfálticos

Os ensaios realizados para medir as propriedades físicas dos ligantes asfálticos têm temperatura especificada e alguns também definem o tempo e a velocidade de carregamento. Para se caracterizar um determinado asfalto como adequado para pavimentação, a maioria dos países utiliza medidas simples de propriedades físicas do ligante, pela facilidade de execução nos laboratórios de obras. As duas principais propriedades utilizadas são: a “dureza”, medida pela penetração de uma agulha

padrão na amostra de ligante e a resistência ao fluxo, medida nos ensaios de viscosidade.

### 2.1.5.1 Especificação brasileira para cimentos asfálticos de petróleo

A especificação brasileira é de acordo com o sistema de classificação das normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). No Brasil, os ligantes convencionais são classificados em: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200. Eles recebem essa nomenclatura de acordo com os resultados do ensaio de penetração, descrito na norma para ligantes asfálticos DNIT 155/2010-ME: determinação da penetração – método de ensaio.

Para caracterizar os CAP é comum realizar ensaios convencionados pelas normas brasileiras, as quais preconizam os ensaios de especificações do material e os resultados limites para CAPs 50/70 e 30/45 conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Especificação brasileira de CAP

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES		MÉTODOS		
		CAP 30/45	CAP 50/70	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	NBR 6576	D 5	ME 003/99
Viscosidade Brookfield	cP	-	-	NBR 15184	D 4402	-
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín		374	274	NBR 15184	D 4402	-
a 150 °C, SP21, mín.		203	112	NBR 15184	D 4402	-
a 177 °C, SP 21		76 - 285	57 - 285	NBR 15184	D 4402	-
Índice de susceptibilidade térmica	-	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	-	X 018	-
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín	%	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min	-	-	-	-	D 2872	-
Varição em massa, máx	%	0,5	0,5	-	-	-
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	NBR 6560	D 36	-
Penetração retida, mín	%	60	55	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: (Adaptado de DNIT 095/2006 – EM).

### 2.1.5.2 Especificação segundo metodologia Superpave

Conforme Bernucci et al. (2010), a metodologia Superpave é um conjunto de ensaios pra ligantes asfálticos normatizados nos Estados Unidos. Essa metodologia surgiu a partir de estudos realizados inicialmente em 1987 pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP). O produto final deste programa americano foi sistema Superpave, especificações as quais foram unidas para privilegiar a avaliação do desempenho da mistura asfáltica. A proposta é que os ligantes sejam avaliados em ampla faixa de temperaturas, que cubra todas as etapas do processo de mistura, espalhamento e compactação, além de considerar as temperaturas às quais o pavimento asfáltico estará sujeito ao longo de sua vida útil.

As especificações de ligantes que seguem essa metodologia podem ser utilizadas tanto para ligantes convencionais como para ligantes modificados, incluindo ligantes com aditivos dispersos, dissolvidos ou que reagem com CAP (SHRP, 1994).

A especificação de ligantes asfálticos foi desenvolvida durante o SHRP e ficou conhecida como “Grau de desempenho” (PG – *performance grade* em inglês) e os procedimentos para obtê-lo estão na norma AASHTO PP 42/2000. A proposta principal desta seleção e classificação é agrupar os ligantes asfálticos conforme o seu comportamento em função do ambiente onde será implantado, levando em conta as temperaturas do pavimento ao longo de sua vida útil, e do tráfego previsto para a rodovia (NCHRP 673). O resultado obtido após análise segundo metodologia Superpave é dado em faixas de temperaturas em Graus Celsius e ambiente (tráfego) indicado para o ligante asfáltico ser aplicado. A classificação é apresentada na Tabela 5, na qual ESAL (*Equivalent Single Axle Load*) corresponde ao somatório de passagens do eixo padrão de 8,2 toneladas durante a vida de projeto. Recentemente foi adicionado outro parâmetro na nomenclatura, que é o tráfego aconselhado representado por letras (S, H, V e E).

Os testes buscam quantificar o desempenho dos ligantes em três estágios da sua vida: no estado original, depois da fase de mistura, espalhamento e compactação e o envelhecimento ocorrido durante a vida de serviço do pavimento.

A especificação Superpave vem sendo utilizada no Brasil em diversos trabalhos, no entanto não se estende à prática ficando restrita a pesquisas.

Os métodos de avaliação dos CAP envolvem ensaios de envelhecimento, aplicação e desempenho.

Tabela 5 - Classificação do ligante em função do tráfego

Limites $J_{nr3200}, J_{nr,diff} < 0,75$	Classificação MSCR	ESAL
$\leq 4,5 \text{ kPa-1}$	S – <i>Standard</i> (tráfego padrão)	< 10 milhões e velocidades > 70 km/h
$\leq 2,0 \text{ kPa-1}$	H – <i>Heavy</i> (tráfego pesado)	> 10 até 30 milhões ou tráfego lento (20 a 70 km/h)
$\leq 1,0 \text{ kPa-1}$	V – <i>Very Heavy</i> (tráfego muito pesado)	> 30 milhões ou tráfego permanente (< 20 km/h)
$\leq 0,5 \text{ kPa-1}$	E – <i>Extreme</i> (tráfego extrapesado)	> 30 milhões e tráfego permanente (< 20 km/h)

Fonte: (Adaptado da AASHTO M323, 2013).

Os principais métodos de envelhecimento são:

- Envelhecimento de curto prazo (RTFOT - *Rolling Thin Film Oven Test*): simula o envelhecimento do asfalto durante a usinagem e transporte da massa.

- Envelhecimento de longo prazo (PAV - *Pressure Aging Vessel*): simula o envelhecimento em serviço do ligante por 7 a 10 anos. São 20 horas em temperaturas de 90°C (para ligantes usados em temperaturas baixas de pavimento), 100°C (para ligantes usados em temperaturas intermediárias de pavimento) e 110°C (para ligantes usados em temperaturas altas de pavimento). Utiliza o ligante envelhecido no RTFOT, e pressão de 305psi (2,10MPa ou 20,7atm). A massa em cada prato é de 50±0,5g. Não há especificação de variação de massa. O ligante envelhecido é usado em ensaios (DSR e BBR) para obtenção de parâmetros Superpave. Ainda não há norma brasileira. A norma usada é a AASHTO R 028/2002: *Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel* (PAV).

Para determinar a aplicabilidade dos ligantes asfálticos, a metodologia Superpave utiliza uma norma para ensaio de viscosidade rotacional, seguida também pela especificação brasileira, a qual determina o comportamento reológico do ligante na faixa de temperatura de bombeio, usinagem e aplicação.

Os ensaios para determinação do grau de desempenho dos ligantes asfálticos pela metodologia Superpave são:

- BBR (*Bending Beam Rheometer* – Reômetro de Flexão em Viga): determina a temperatura inferior do PG a qual pode ocorrer o trincamento térmico. As duas amostras são moldadas em forma de viga com 6.25 x 12.5 x 127 mm. Essa viga é apoiada em 2 pontos separados por 102 mm em um banho mantido na temperatura do ensaio. O carregamento de 100g é feito no ponto médio. A flexão da viga é medida

a 8, 15, 30, 60, 120 e 240 segundos. A rigidez da viga (*creep stiffness*) é calculada para esses tempos. A norma vigente é a AASHTO T313-2006.

- DTT (*Direct tension tester*) que é feito no ligante após envelhecimento no RTFOT e PAV fornece uma medida de rigidez e propriedades de relaxamento à baixa temperatura. O ensaio é realizado nas temperaturas de -36°C a 0°C. Com esses dados aliados aos resultados do BBR é possível prever a capacidade do ligante de resistir à fissuração em baixas temperaturas. É realizado conforme AASHTO T 314.

- DSR (*Dynamic Shear Rheometer* - Reômetro de cisalhamento dinâmico): determina parâmetros do ligante asfáltico relacionados com deformação permanente e fadiga. Pode gerar a curva-mestra, uma representação do comportamento reológico do material em função da frequência (ou tempo) de carregamento. A amostra é colocada entre duas placas paralelas; uma fixa e a outra oscilante (frequência 10 rad/s ou 1.59 Hz) em onda senoidal. A amostra e as placas são mantidas em temperatura constante. O Reômetro mede o torque aplicado, a deformação máxima sofrida e o atraso de tempo entre eles. Então calcula-se o módulo complexo ( $G^*$ ) e o ângulo de fase ( $\phi$ ). O tamanho das placas e a temperatura de ensaio dependem da condição do ligante sendo testado: Amostra virgem e envelhecida no RTFOT - temperaturas mais altas com placas de 25mm de diâmetro e espessura de amostra de 1mm e amostra envelhecida no PAV - temperaturas mais baixas, espessura de amostra de 2mm e placas de 8mm de diâmetro. Ainda não há norma brasileira. A norma americana que preconiza este ensaio é a AASHTO T315-06.

Recentemente foi inserido na metodologia Superpave o ensaio de MSCR e adicionalmente está sendo discutida a inclusão do LAS para classificar os ligantes de forma mais racional quanto à deformação permanente e à fadiga.

- MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*): Fluência e recuperação sob múltipla tensão. Este ensaio tem como objetivo caracterizar a resistência dos ligantes asfálticos à deformação permanente. A norma para sua realização é a ASTM 7405. Consiste em utilizar o DSR para aplicar uma carga constante de 1s em amostra de ligante asfáltico removendo-a e permitindo o repouso por 9s. Repete-se este ciclo dez vezes em onze níveis de tensão sem intervalos de tempo entre ciclos. O resultado do ensaio permite classificar o ligante asfáltico em função do tráfego (Tabela 5).

- LAS (*Linear Amplitude Sweep*): Ensaio de estimativa da tolerância ao dano de ligantes asfálticos utilizando a varredura linear de amplitude e deformação. É rápido de executar e permite classificar os ligantes quanto à fadiga através do dano (3100

ciclos – 10Hz – 310 segundos) da seguinte forma: o DSR mede tensão, deformação, torque,  $G^*$ ,  $d$ , e calcula a evolução do dano pela área não trincada. Após determina o comprimento da trinca na falha e determina os parâmetros da equação de fadiga. É regido pela norma AASHTO TP-101-12-UL. Através deste ensaio é possível fazer correlações de  $G^*$  com o ângulo de fase. Martins (2014) verificou que existe concordância entre os resultados dos ligantes e das misturas asfálticas quanto à previsão de fadiga.

Leite e Tonial (1994) estudaram as características climatológicas brasileiras e desenvolveram um estudo para definir o PG em cada estado brasileiro. Este estudo caracterizou os estados do Brasil por temperaturas do ar/clima obtidas das Normais Climatológicas de 1961 a 1990, com dados de 209 estações climatológicas brasileiras e classificou o grau de desempenho (PG) para ligantes asfálticos brasileiros. No entanto este estudo ficou ultrapassado devido à atualização das equações e critérios da metodologia Superpave.

Neste sentido, Cunha et al. (2007) realizaram um novo estudo com o objetivo de classificar o PG para ligantes asfálticos brasileiros, aplicando as novas equações da classificação Superpave na mesma base de dados de Leite e Tonial (1994). Os autores aplicaram as equações desenvolvidas pelo Superpave para que os modelos representassem melhor as condições reais de temperatura do pavimento. Como resultados dos ensaios e do uso das equações do Superpave foi possível encontrar o PG sugerido para ligantes asfálticos em cada estado do Brasil conforme a Figura 7.

O Rio Grande do Sul conforme a análise de Cunha et al. (2007), sugere a utilização de ligantes asfálticos com PG 70-10 ou maior. No entanto, Bruxel (2016) em sua dissertação, encontrou para o CAP 50/70 um PG de 58-16. Paniz et al. (2015) também encontraram os valores de PG de 58-16 para este mesmo ligante, produzido e coletado em 2015.

Nascimento (2008) encontrou os PG 64-22 e 58-22 para os CAP 20 da REVAP e CAP 20 da REGAP. Osmari (2016) utilizou nas suas pesquisas um CAP 50/70 e um CAP 30/45, ambos provenientes da Refinaria Duque de Caxias (Reduc) cujos PGs foram 64-22 S e 70-22 S respectivamente. Observa-se que o CAP 30/45 da autora possui um PG com espectro maior de temperaturas.

Figura 7 - Grau de desempenho sugerido para ligantes asfálticos por região do Brasil



Fonte: (Cunha et al., 2007).

Após desenvolver esta revisão bibliográfica foi possível perceber que na especificação Brasileira de Ligantes Asfálticos são realizados ensaios empíricos sem correlação direta com o desempenho para caracterizar os ligantes. Já na especificação PG Superpave são utilizados ensaios semi-empíricos, que estão relacionados ao desempenho. Estão em estudos novos métodos de análise e parâmetros de desempenho para resíduos de emulsões. Deve-se ressaltar que a classificação PG deve ser usada em conjunto com o *Superpave Mix Design* e novo método de dimensionamento de pavimentos utilizado nos Estados Unidos.

## 2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS

A estrutura do pavimento geralmente é formada por camadas sobrepostas de materiais com diferentes propriedades, compactadas a partir do subleito. Esta estrutura deve ser adequada para atender ao tráfego tanto estrutural quanto operacionalmente, de maneira durável. Na maioria dos pavimentos brasileiros, a camada superior do pavimento é o revestimento asfáltico, que consiste basicamente em uma mistura de agregados pétreos e CAP.



O revestimento asfáltico deve resistir à abrasão causada pelo tráfego, tornar o pavimento impermeável, proporcionar uma superfície resistente ao deslizamento e melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança). Para que isso aconteça é necessário obter uma mistura asfáltica equilibrada, com uma granulometria adequada e porcentagem de ligante ideal para as condições de clima e tráfego impostos.

### 2.2.1 Dosagem de misturas asfálticas

As misturas asfálticas devem apresentar algumas propriedades básicas como: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, e resistência ao cisalhamento. Para atingir estes critérios satisfatoriamente é necessário, entre outros fatores como qualidade dos materiais e execução correta, ter uma boa dosagem. Normalmente são dosadas baseadas nos seguintes critérios:

- Escolha dos materiais: agregados, cal (caso houver) e ligante asfáltico;
- Determinação das porcentagens de agregados na composição da mistura, atendendo as especificações impostas, de acordo com as camadas do pavimento;
- Determinação do teor de ligante de projeto; e
- Comparação da mistura dosada com as exigências das especificações de parâmetros como: volume de vazios, vazios do agregado mineral, relação betume vazios e estabilidade.

Dentre os métodos de dosagem de misturas betuminosas, destacam-se os métodos Marshall - utilizado nos projetos de rodovias brasileiras desde a década de 60 e Superpave pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP), que apesar de ser utilizado e aprimorado em obras nos Estados Unidos há duas décadas (norma AASHTO M 323 -2013 – *Superpave volumetric mix design*), seu uso no Brasil ainda é restrito a pesquisas.

Ainda é importante ressaltar que além dos parâmetros de dosagem, os métodos de escolha da granulometria da estrutura de agregados devem ser considerados para obtenção de um pavimento de boa performance. Os métodos mais relevantes para este trabalho são o método Bailey e Metodologia Faixa de Agregado Dominante (FAD).

### 2.2.1.1 *Dosagem Superpave*

Conforme Motta et al. (1996), a metodologia de dosagem Superpave foi desenvolvida em 1987 pelo Programa Estratégico de Pesquisa Rodoviária (SHRP) americano. Os pesquisadores do SHRP desejavam um equipamento que compactasse a mistura betuminosa realisticamente, em que as densidades finais fossem aquelas obtidas no pavimento através de condições reais de clima e carregamento, além disso, o equipamento deveria fornecer uma medida de compatibilidade, de modo a identificar problemas de compactação e prever comportamento de misturas potencialmente frágeis. Este método de dosagem visa produzir misturas com a mesma densidade e índice de vazios obtidas no pavimento acabado e ainda aproximar-se das condições de degradação do pavimento durante sua vida útil.

O princípio de funcionamento compactador giratório Superpave utilizado no método se compara a um rolo compactador giratório. Os parâmetros utilizados na moldagem dos corpos de prova durante a dosagem são: ângulo externo de rotação igual a  $1,25^{\circ} \pm 0,02^{\circ}$ , ângulo interno de rotação de  $1,16^{\circ}$ , taxa de 30RPM, tensão de compressão aplicada no corpo de prova regulada para 600kPa.

Tanto os ligantes quanto os agregados devem respeitar os parâmetros da metodologia Superpave para ser possível realizar a dosagem adequadamente. Logo, a mistura deve se enquadrar na faixa da metodologia Superpave. Os ligantes asfálticos devem ser ensaiados conforme os ensaios do grau de performance (PG) revisados no item “2.1.5.2”. A especificação dos agregados utiliza um gráfico que possui uma abscissa com aberturas de peneiras em milímetros elevadas a potência 0,45 e no eixo das ordenadas, a passante do agregado. Este gráfico apresenta três parâmetros que balizam a seleção granulométrica:

- Linha de densidade máxima: representa teoricamente o máximo empacotamento ou densidade de agregados.
- Pontos de controle: Funcionam como limites dentro dos quais a curva granulométrica deve passar para satisfazer os requisitos de dosagem de mistura asfáltica pela metodologia;
- Zona de restrição (ZR): fica sobre a linha de densidade máxima e serve para evitar misturas com alta proporção de areia fina natural em relação ao total de

agregados finos, o que reduz o VAM. A norma AASHTO M 323 -13 – *Superpave volumetric mix design* não faz mais referência à zona de restrição que constava na norma AASHTO MP 2 - 01 – *Standard Specifications for Superpave volumetric mix design*. Ainda assim, é considerada relevante quando se quer limitar o uso da areia nas misturas asfálticas.

A dosagem baseia-se em moldar CPs com teor pré-determinado de ligante (teor estimado, teor estimado +0,5% e +1%, teor estimado -0,5%) no CGS até um número de giros de projeto ( $N_{projeto}$ ). O  $N_{projeto}$  é determinado de acordo com o tráfego (N) e pode ser definido pela Tabela 6. O critério de projeto é atingir o teor de ligante para o volume de vazios de 4%.

Tabela 6 - Determinação do  $N_{projeto}$

Número de giros	Tráfego
50	Muito leve (local)
75	Médio (vias principais e rodovias rurais)
100	Médio a alto (vias principais e rodovias rurais)
125	Alto volume de tráfego (interestaduais, muito pesados)

Fonte: (Adaptado de Bernucci et al., 2010).

### 2.2.1.2 Método Bailey

Conforme Mendes (2011) o método Bailey foi criado na década de 1980 nos EUA a fim de proporcionar um revestimento com resistência às deformações permanentes, às trincas por fadiga e ao desgaste, através da seleção sistemática da granulometria de misturas asfálticas. Para tal o método propõe o intertravamento das partículas através de uma graduação contínua e balanceada. Este método faz correlações com as características de compactação de cada fração de agregado, considerando os Vazios no Agregado Mineral (VAM) e também com os vazios de ar ( $V_v$ ) e conforme Nascimento (2008) possibilita selecionar uma estrutura de agregados da mistura buscando maior intertravamento dos agregados graúdos e pode ser usado com qualquer metodologia de dosagem de misturas asfálticas (Superpave, Marshall, entre outros).

Após a determinação da distribuição granulométrica, avalia-se a mistura dividindo-a em três porções distintas: porção de agregados graúdos (AG), porção graúda do agregado fino (GAF) e porção miúda do agregado miúdo (FAF).

Os três parâmetros (Proporção AG, GAF e FAF) são calculados por equações que correlacionam as porcentagens passantes em peneiras (PM – peneira média, PCP - peneira de controle primário, PCS - peneira de controle secundário e PCT - peneira de controle terciário) que determinam o tamanho máximo nominal dos agregados (TMN).

#### 2.2.1.3 *Metodologia Faixa de Agregado Dominante (FAD)*

A metodologia Faixa de Agregados Dominantes (FAD) foi proposta por Kim (2006) e baseia-se nos conceitos da mecânica dos solos. A metodologia FAD considera para todas as misturas asfálticas que a faixa de agregados dominantes (FAD) é a parcela interativa de tamanhos de partículas que forma uma rede estrutural primária de agregados. O autor formulou a hipótese de que o FAD deve ser composta de partículas maiores que 1,18 mm (consideradas grossas) e a sua porosidade não deve ser superior a 50% para que uma mistura resista à deformação permanente. Tamanhos de partícula menores do que o FAD, servem para preencher os espaços vazios entre as partículas, denominado Volume Intersticial (VI), juntamente com ligantes e finos. Os Agregados flutuantes são as partículas maiores que o FAD e simplesmente flutuam na matriz e não desempenham um papel importante na estrutura.

A teoria do empacotamento de partículas esféricas de vários tamanhos é uma das bases metodológicas da teoria, não considerando as características de formas, textura e angularidade dos agregados. O padrão de distribuição das partículas adotado no modelo é o hexagonal.

#### 2.2.1.4 *Influência do teor de ligante asfáltico*

O ligante asfáltico é um componente do revestimento asfáltico que exerce grande influência no comportamento das misturas, principalmente no que diz respeito à rigidez a aos danos de fadiga e deformação permanente. Diversos estudos apontam o teor de ligante como um dos fatores cruciais para deformação permanente. O emprego de quantidades excessivas de ligante asfáltico é um dos grandes causadores do ATR (afundamento de trilha de rodas). Quando em excesso, o ligante age como

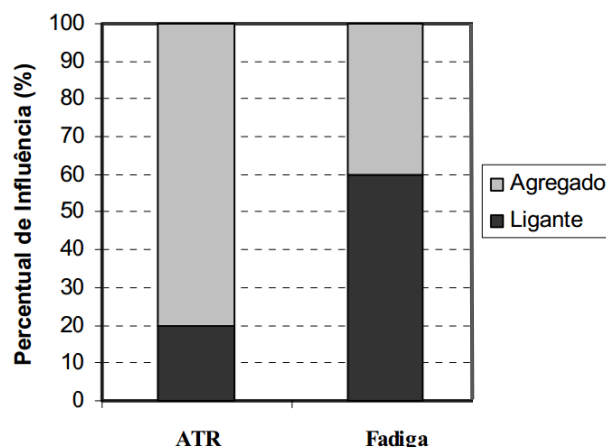
lubrificante reduzindo o atrito interno e o intertravamento da estrutura pétreo da mistura. Quando o teor de ligante é menor que o necessário, é constatado que nesta redução se expõe a mistura a uma menor resistência à tração, diminuindo assim a vida de fadiga do concreto asfáltico. Logo, para proteger o pavimento dos danos de deformação permanente e fadiga deve-se além de definir corretamente o tipo de ligante, projetar a mistura com teor equilibrado. A Figura 8 ilustra a influência dos agregados e do ligante nos defeitos de misturas asfálticas. Se observa que embora o desempenho do ligante seja considerado fator discreto quando comparado com a influência do agregado no ATR, é apontado como elemento preponderante com relação à fadiga e ao trincamento térmico. Almeida Jr. (2016) concluiu que a influência do ligante pode ser maior do que a do esqueleto pétreo quando se trata de deformação permanente quando em condições de intertravamento ideal dos agregados, pois uma pequena variação na quantidade de ligante pode ser significativa.

Kamel & Miller (1994) indicaram que misturas contendo ligante acima do teor ótimo de projeto podem apresentar problemas como escorregamento da massa asfáltica e volume de vazios insuficiente, levando a redução da estabilidade.

Por outro lado, Nascimento (2008) afirma que baixos teores de asfalto comprometem a durabilidade do material em termos de fadiga e envelhecimento precoce, além de tornar a mistura segregável e de difícil aplicação, conferindo baixa trabalhabilidade e um volume de vazios mais elevado.

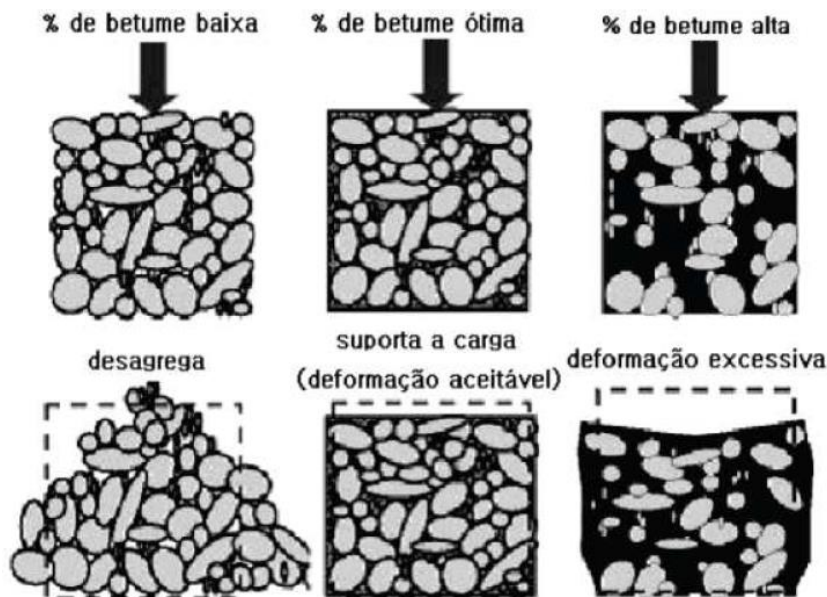
É possível observar na Figura 9 o efeito do teor de ligante asfáltico sobre o comportamento da mistura.

Figura 8 - Influência dos agregados e do ligante nos principais defeitos de misturas asfálticas



Fonte: (Adaptado de FHWA, 2002).

Figura 9 - Efeito do percentual de ligante asfáltico sobre o comportamento da mistura



Fonte: (Erkens, 2002).

## 2.2.2 Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

Assim como o estudo das propriedades dos ligantes asfálticos, as propriedades mecânicas das misturas asfálticas também são importantes para dominar o conhecimento a respeito das características e desempenho dos pavimentos. As propriedades mecânicas destacadas neste trabalho são: rigidez, dano por fadiga e por deformação permanente.

### 2.2.2.1 Rigidez

O termo rigidez, utilizado principalmente no estudo de misturas asfálticas, indica a capacidade de o material resistir às deformações.

Para Kim (2009) a rigidez em concretos asfálticos é um parâmetro do material, onde nada mais é que a inclinação de curva de tensão-deformação, sendo essa uma propriedade única (independente do ensaio, do tamanho ou geometria da amostra). Kim também afirma que a rigidez em concreto asfáltico é influenciada por diversos fatores tais como: a taxa de deformação, temperatura, o estado de tensão, as partículas do agregado, o tipo de ligante, a película de ligante asfáltico que envolve os

agregados, os finos na massa, os vazios, o envelhecimento da mistura asfáltica, a reatividade com o oxigênio, e os modificadores que foram adicionados à mistura asfáltica.

Um aspecto importante do estudo da pavimentação é compreender o comportamento viscoso linear, onde o material dissipa a energia acumulada sem que haja deformação permanente. Assim a tensão está ligada à taxa de deformação pela lei de proporcionalidade linear relacionada ao coeficiente de viscosidade ( $\eta$ ). Os comportamentos de elasticidade e de plasticidade desconsideram esta parcela que possui grande participação no comportamento dos materiais asfálticos.

As misturas asfálticas não possuem a capacidade de armazenar e dissipar totalmente a energia que lhes é fornecida, sendo representadas satisfatoriamente por modelos diferenciados de Elasticidade (mola) e Viscosidade (amortecedor). Os materiais viscoelásticos possuem características de materiais elásticos e viscosos, onde a deformação depende do tempo.

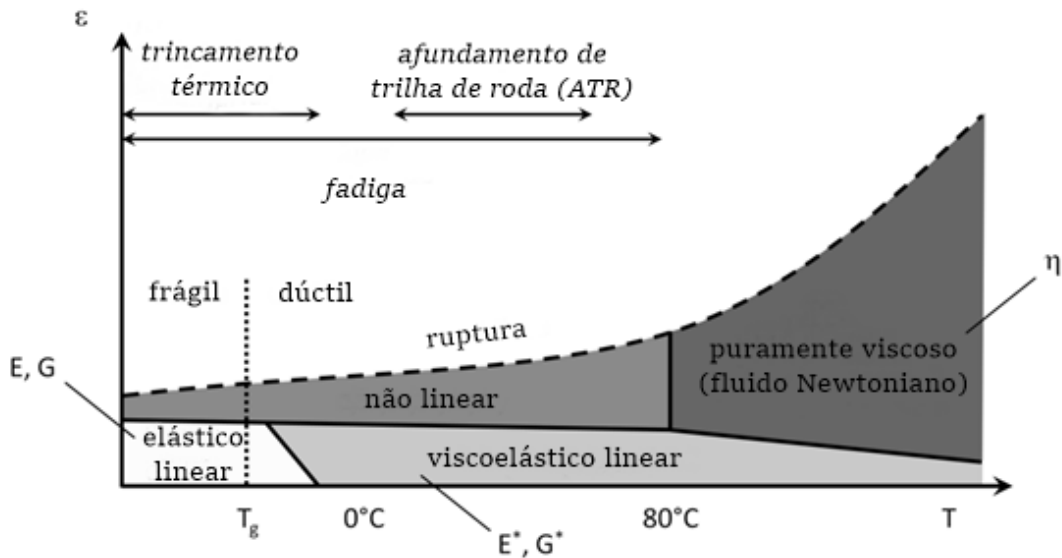
Bahia et al. (1999) afirmam que quando submetidos a pequenas deformações, os materiais asfálticos apresentam comportamento viscoelástico linear. A linearidade se dá quando são desconsiderados os efeitos do tempo, dessa forma a relação tensão deformação do material fica proporcional.

Assim como o comportamento dos ligantes asfálticos, o comportamento mecânico das misturas asfálticas é extremamente complexo, estando este sujeito a uma gama de fatores externos e as suas propriedades intrínsecas. De acordo com Mangiafico (2014), pode-se considerar que o concreto asfáltico é um material contínuo, homogêneo e isotrópico, e seu comportamento seja influenciado por três fatores, em nível macroscópico: temperatura, amplitude das deformações, e ao número de ciclos de carga solicitados. O comportamento mecânico dos materiais asfálticos pode assumir diferentes domínios dependendo dos valores assumidos para cada um destes fatores. Na Figura 10, é possível observar o comportamento dos materiais asfálticos para diferentes intervalos de deformação ( $\epsilon$ ) e temperatura (T), e na Figura 11 verifica-se os diferentes domínios de comportamento para relações de deformação ( $\epsilon$ ) e número de ciclos (N).

A Figura 12 de autoria de Di Benedetto et al. (2013), apresenta, de acordo com a amplitude da deformação aplicada e a quantidade de ciclos de carga, os diferentes tipos de comportamento observados para misturas betuminosas. Para um domínio de

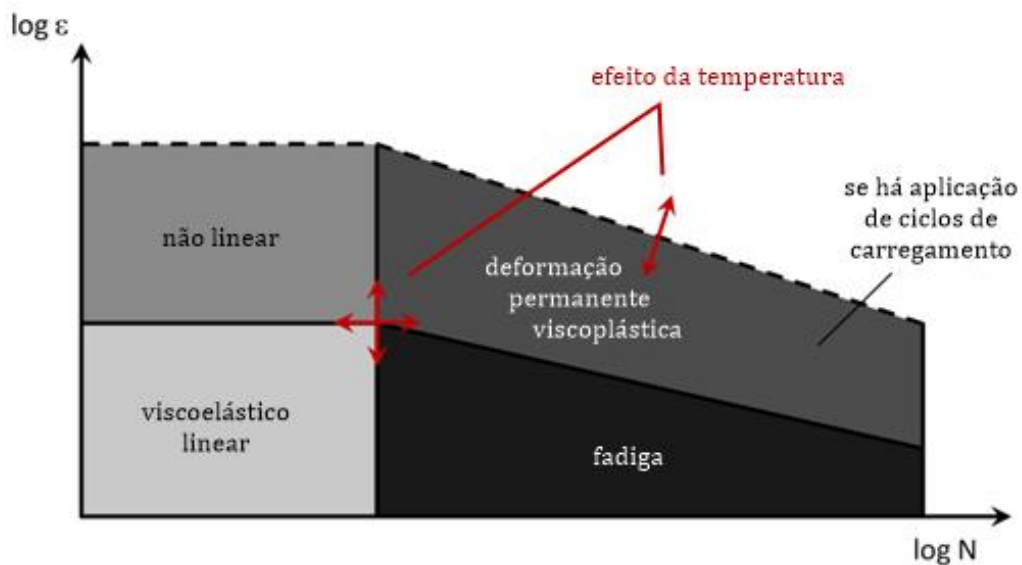
pequena deformação ( $\epsilon < 100\mu\text{m} / \text{m}$ ) e número pequeno de ciclos, os materiais betuminosos apresentam comportamento viscoelástico linear.

Figura 10 - Domínios típicos do comportamento mecânico de materiais asfálticos em função das deformações e da temperatura



Fonte: (Adaptado de Mangiafico, 2014).

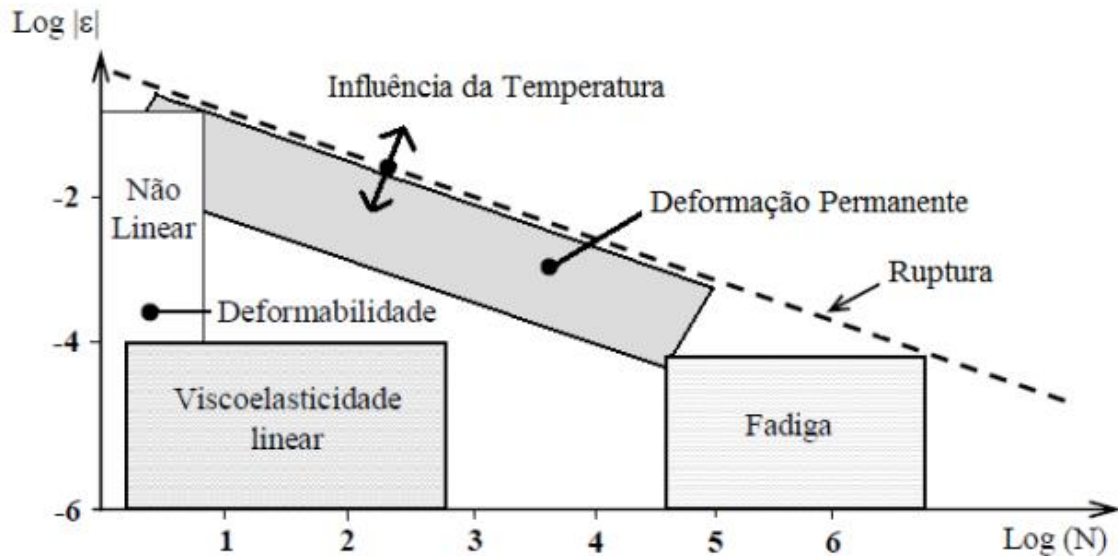
Figura 11 - Domínios típicos do comportamento mecânico dos materiais asfálticos em função das deformações e do número de ciclos



Fonte: (Adaptado de Mangiafico, 2014).



Figura 12 - Domínios típicos do comportamento de concretos asfálticos convencionais

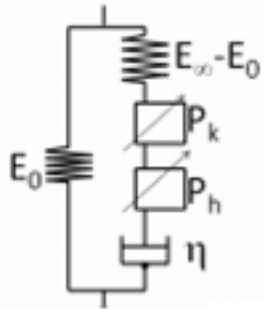


Fonte: (Adaptado de Di Benedetto et al., 2013).

A reprodução dos carregamentos e das deformações de campo em laboratório restringem as condições que os pavimentos estão submetidos. Além disso, as modelagens baseadas na teoria da elasticidade e viscosidade limitam ainda mais as condições de campo, deixando de considerar temperatura, variação de carga e recuperação da deformação da mistura. Dentro deste contexto é necessário utilizar modelos matemáticos que se aproximem das variáveis reais, como por exemplo, o 2S2P1D (2 *Springs* - molas, 2 *Parabolic* – elementos parabólicos, 1 *Dashpot* - amortecedor) desenvolvido por Di Benedetto *et al.* (2004).

O modelo foi desenvolvido para simulação de propriedades viscoelásticas lineares tanto de ligantes quanto de misturas asfálticas. Di Benedetto *et al.* (2004) experimentaram variadas misturas a fim de compreender seu comportamento viscoelástico linear. Caracterizaram as misturas através da interpretação dos testes de módulo complexo, em temperaturas e frequências variadas, que forneceram dados para utilização do modelo 2S2P1D desenvolvido pelos autores. Este modelo 2S2P1D utiliza uma generalização do modelo análogo Heut-Savegh, onde há uma adaptação devido ao acréscimo de um amortecedor linear em série com dois elementos parabólicos e uma mola de rigidez. A Figura 13 representa o sistema descrito.

Figura 13 - Representação do modelo 2S2P1D



Fonte: (Adaptado de Somé et al., 2015).

O modelo 2S2P1D possui parâmetros de calibração para representação correta do comportamento viscoelástico do material em termos de módulo, ângulo de fase e coeficiente de Poisson para temperatura e frequência de carregamento variado. O módulo ( $E^*$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu^*$ ) complexos são demonstrados pelas Equações 2 e 3. Neste modelo o coeficiente de Poisson atua de forma a modelar tridimensionalmente o comportamento da mistura frente ao carregamento.

$$E^*(\omega) = E_{00} \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(j\omega\tau)^{-k} + (j\omega\tau)^{-h} + (j\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (2)$$

$$\nu^*(\omega) = \nu_{00} + (\nu_0 - \nu_{00}) \frac{E^*(\omega) - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad (3)$$

Onde:

$\omega$  = pulsação,  $\omega=2\pi f$  (sendo  $f$  a frequência);

$k, h$  = expoentes,  $0 < k < h < 1$ ;

$\beta$  = constante;

$E_{00}$  = módulo estático  $\omega \rightarrow 0$ ;

$E_0$  = módulo em transição vítrea  $\omega \rightarrow \infty$ ;

$\eta$  = viscosidade Newtoniana,  $\eta = (E_0 - E_{00}) \beta \tau$ ;

$\tau$  = tempo característico, o qual varia com a temperatura  $T$ ,  $\tau(T) = a_T(T) \tau_0$  onde

$\tau_0 = \tau(T_{ref})$  é determinado na temperatura de referência;

$\nu_{00}$  = coeficiente de Poisson estático,  $\omega \rightarrow 0$ ;

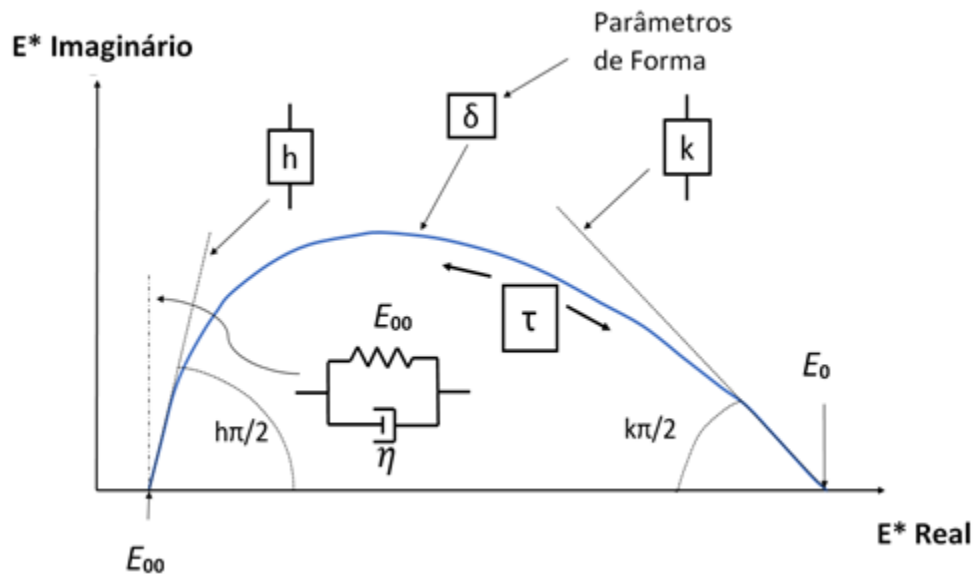
$\nu_0$  = coeficiente de Poisson estático em transição vítrea,  $\omega \rightarrow \infty$ .

Há também duas constantes  $C_1$  e  $C_2$ , responsáveis pela translação, como é demonstrado na Equação 4.

$$\log(a_T) = -\frac{C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (4)$$

Olard et al. (2003) afirmam que o modelo 2S2P1D permite melhorar a aproximação das simulações com as curvas reais, encontradas através dos dados colhidos durante a realização de testes em laboratório. Após a inserção dos resultados no 2S2P1D são geradas e ajustadas as curvas no plano Cole-Cole, diagrama de Black, curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase. O Cole-Cole é a representação dos dados colhidos em escala aritmética de  $E_1$  (parte real) juntamente com  $E_2$  (perda) ou parte imaginária, dando origem a uma curva na forma de semicírculo, conforme a Figura 14.

Figura 14 - Representação do modelo 2S2P1D no plano Cole-Cole



Fonte: (Adaptado de Olard et al., 2003).

O diagrama de Black é originado a partir dos valores de ângulo de fase e módulo dinâmico. Este diagrama permite compreender as mudanças no comportamento do material em diferentes temperaturas, relacionando o módulo dinâmico e o ângulo de fase.

Além disso, são geradas duas curvas mestras, uma de ângulo de fase que proporciona a verificação do comportamento viscoso do material em diferentes temperaturas e frequências e outra de módulo dinâmico que permite a análise da variação do módulo em diferentes temperaturas e frequências.

Onofre (2012) afirma que no módulo complexo há uma curva de frequência ou tempo por módulo dinâmico ou ângulo de fase para cada temperatura. O módulo complexo é dado pela divisão entre a amplitude da tensão aplicada e a amplitude da deformação correspondente de cada mistura, e, quanto maior for o módulo dinâmico da mistura, mais rígida tende a ser. Já o ângulo de fase varia de 0 a 90°, o qual quanto mais perto de 0°, a mistura tende a apresentar um comportamento elástico (maior a parcela elástica), e valor estiver próximo de 90°, a mistura tende a apresentar um comportamento mais viscoso (maior a parcela viscosa).

No Brasil, a avaliação de rigidez dos pavimentos é pelo ensaio de Módulo de Resiliência (MR), também conhecido como módulo de elasticidade (E), tendo a mesma definição pela teoria da elasticidade, porém, determinado a partir de cargas repetidas. O MR em misturas asfálticas pode ser obtido com diversos tipos de cargas repetidas entre elas o ensaio de tração uniaxial; ensaio de compressão uniaxial; ensaio de viga à flexão; ensaio de tração por compressão diametral (tração indireta) e ensaio de compressão triaxial. O ensaio mais utilizado no Brasil é o MR de Tração por Compressão Diametral (MR por tração indireta), em função da difusão deste ensaio no país e na dificuldade de aquisição de equipamentos mais sofisticados como os que realizam o ensaio de módulo complexo. Atualmente o ensaio MR é essencial para o dimensionamento de pavimentos (após o desenvolvimento dos métodos mecanísticos). Em alguns países é utilizado corriqueiramente o módulo complexo para avaliar rigidez, enquanto no Brasil o módulo complexo está restrito ao meio acadêmico e de pesquisas. No ensaio de módulo complexo podem-se contabilizar os efeitos da temperatura e principalmente o tempo de carregamento nas propriedades dos materiais asfálticos. Características viscoelásticas lineares são obtidas por meio deste ensaio que consiste na aplicação de um carregamento de compressão axial senoidal em CPs cilíndricos e na medição dos deslocamentos verticais correspondentes.

Apesar dos ensaios de MR e  $E^*$  medirem a rigidez das misturas asfálticas, são métodos com características diferentes. Specht et al. (2017) discutem e comparam ambos ensaios, considerando diferentes misturas. A Tabela 7 resume as principais diferenças entre o MR e o  $E^*$ .

Tabela 7 - Diferenças entre Módulo de Resiliência e Módulo Dinâmico

Parâmetro	Módulo de resiliência	Módulo complexo
Carga	Carregamento repetido (0,1 s e 0,9 s de repouso)	Carregamento dinâmico (tempo de aplicação e repouso dependente da frequência utilizada)
Carregamento	Compressão diametral gerando um estado de tensão biaxial	Carregamento de compressão axial senoidal
Temperatura (°C)	25	-10; 4; 21; 37 e 54
Frequência (Hz)	10	25; 20; 10; 5; 2; 1; 0,5; 0,2; 0,1 e 0,01
Dimensão do corpo de prova	100 mm de diâmetro por 63,5 mm de altura	100 mm de diâmetro por 150 mm de altura ou uma relação altura-diâmetro 2 para 1

Fonte: (Adaptado de Boeira, 2018).

Conforme a norma DNER 135/2010 o Módulo de Resiliência é obtido a uma temperatura (geralmente 25°C) e uma aplicação de carga de 0,1s e 0,9s de repouso, é realizado com carregamento de compressão diametral e gera um estado de tensão biaxial, assim, as análises estruturais dos pavimentos utilizando o Módulo de Resiliência do revestimento devem ser consideradas apenas nesta condição. Por outro lado, o Módulo Complexo considera diferentes frequências, temperaturas, carregamentos de compressão axial senoidal. Com as curvas mestras dos materiais, é possível estabelecer uma comparação entre as curvas mestras obtidas de diversas misturas de acordo com suas inclinações, de forma que as maiores inclinações ocorrem para materiais mais elásticos. Babadopulos (2013) afirma que desta forma, pode-se dizer que o Módulo Complexo é uma característica mais próxima do material.

O Módulo de Resiliência (MR) e o Módulo Complexo ( $E^*$ ) possuem, além das diferenças listadas na Tabela 7, outra importante diferença: no MR são utilizados carregamentos de ondas semi-seno-verso quadradas em compressão diametral ou flexão onde somente a parcela elástica é levada em conta no cálculo do módulo. Já no  $E^*$  consideram-se as parcelas elásticas e não elásticas das deformações, e se utilizam carregamentos *haversine*.

Sides et al. (1985) declaram que a determinação das propriedades viscoelásticas em misturas asfálticas é de fundamental importância para o estudo do comportamento mecânico. Esta propriedade é uma herança do ligante asfáltico que acaba tornando as misturas asfálticas suscetíveis à variação de temperatura e de frequência de aplicação da carga. Desta forma os autores acreditam que o comportamento é dependente da taxa de aplicação de carga e seu desempenho

mecânico pode variar de elástico a viscoelástico linear, para baixas temperaturas e altas taxas de carregamento e, viscoelástico não linear a viscoplástico, para altas temperaturas e baixas taxas de carregamento.

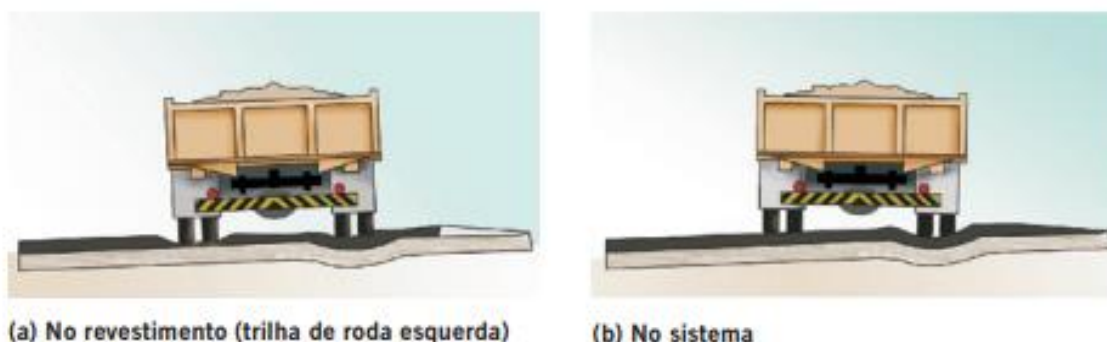
#### 2.2.2.2 *Deformação permanente*

A deformação permanente ou afundamento de trilha de roda (ATR), é um dos defeitos mais comuns encontrados nos pavimentos asfálticos. Ela pode ser definida como o acúmulo irrecuperável de pequenas quantidades de deformações, levando a uma distorção da superfície do pavimento, resultante da aplicação de carga dos veículos. Esta distorção aparece tipicamente como depressões longitudinais em trilhas de roda, geralmente acompanhadas de elevações laterais adjacentes ao trilho.

Dependendo da significância do carregamento e das condições de campo, a deformação permanente pode ocorrer no subleito, nas camadas de base, ou nas camadas asfálticas do revestimento. Neste trabalho será destacada a deformação permanente das camadas de revestimento, pois são estas que recebem o ligante asfáltico que é alvo desta pesquisa.

De acordo com Yoder & Witczac (1975), a deformação permanente ser definida como uma distorção na superfície do pavimento causado pela consolidação de uma ou mais camadas do pavimento. Na Figura 15 pode-se verificar deformação permanente apenas no revestimento (a) e no sistema de camadas (b).

Figura 15 - Deformações permanentes em pavimentos asfálticos



Fonte: (Adaptado de Bernucci et al., 2008).

A norma DNIT 005/2003-TER demonstra que a deformação permanente é caracterizada por uma depressão na superfície do pavimento. Pode ser

acompanhada, ou não, de elevação e pode, ainda, apresentar afundamento plástico ou de consolidação. Na referida norma ainda consta que os afundamentos plásticos ou por consolidação são classificados como locais, quando apresentam até 6m de comprimento, ou ao longo da trilha de rodas, quando acima de 6m. Os afundamentos por consolidação se originam pela deformação acentuada das camadas inferiores granulares, ou de solo, com a diminuição de volume, ou ainda pela perda de resistência e possível ruptura quando há saturação dos materiais. Já a causa dos afundamentos plásticos, é a excessiva fluência da mistura asfáltica devido à ação do tráfego e elevadas temperaturas, ou a canalização/baixa velocidade e intensa ação do tráfego; ou ainda a excessiva deformação plástica das camadas inferiores do pavimento.

A deformação permanente causa desconforto e insegurança para os usuários, prejudicando a serventia, uma vez que nesses locais, pode haver depósito de água, dificultando a dirigibilidade dos veículos. A solução para as deformações permanentes, na maioria dos casos, é a escolha e dosagem correta na composição das misturas asfálticas, bem como dos materiais das camadas inferiores ao revestimento.

Devido às características visco-elasto-plásticas do material do revestimento asfáltico acontece a deformação permanente. A origem desse efeito está associada à variação de volume de vazios ocasionada pela ação do tráfego e pela temperatura, notadamente devido ao comportamento plástico do material quando submetido a determinado estado de tensão. Assim sendo é uma instabilidade do concreto asfáltico ocasionada pela excessiva fluência da mistura, e agravada por temperaturas elevadas e/ou velocidade baixa de operação dos veículos.

Joliet e Malot (2000) afirmam que a deformação permanente é simultaneamente a deformação viscosa do ligante asfáltico e a deformação plástica da estrutura mineral.

Além da influência dos materiais e suas proporções outros fatores devem ser investigados pois nas misturas asfálticas os problemas são complexos. Nascimento (2008) apresentou detalhadamente alguns fatores, dentre eles pode-se citar dois grupos:

I. Agregados: Granulometria dos agregados - as misturas com agregados de maior dimensão e granulometria contínua apresentam melhor resistência à deformação permanente devido ao melhor intertravamento das partículas de

agregado, oferecendo maior resistência; Forma dos Agregados - as misturas com agregados cúbicos são mais resistentes à deformação permanente do que as compostas de agregados rolados, pois os agregados cúbicos fornecem melhor resistência por atrito;

II. Ligante Asfáltico: Excesso de ligante - tende a funcionar como lubrificante facilitando o movimento relativo entre as partículas; Viscosidade do ligante asfáltico - o uso de ligantes mais duros ou modificados aumenta a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas.

Nascimento (2008) afirma que tanto o ligante, como o agregado exercem papel fundamental no comportamento mecânico da mistura asfáltica. O teor de asfalto na mistura, a viscosidade e principalmente a modificação, são fatores importantes e que dependem diretamente do ligante asfáltico. De maneira geral, ligantes menos viscosos tornam misturas menos rígidas e mais propensas ao acúmulo de deformações permanentes.

Almeida Jr. (2016) constatou que o fator que mais alterou a rigidez e a resistência à deformação permanente das misturas foi o tipo de ligante asfáltico, no qual o ligante modificado por polímero aumentou tanto a rigidez quanto a resistência ao dano. O método Bailey de seleção granulométrica também melhorou o comportamento das misturas em menor escala quando comparado à influência do ligante e ao tipo de dosagem. O autor comprovou que o tipo de dosagem (Marshall ou Superpave) alteraram os resultados das misturas, sendo as misturas dosadas pelo método Superpave mais resistentes à deformação permanente por terem menor teor de ligante.

Motta et al. (1996) dissertam que são sempre necessários ensaios laboratoriais para a caracterização dos materiais, independentemente do método ou modelo de previsão utilizado. Para a avaliação de misturas asfálticas a tendência é utilizar ensaios que consigam mensurar e representar os dois tipos de solicitações que tratam da deformação permanente: compressão e o cisalhamento.

Para caracterizar o comportamento das misturas asfálticas frente à deformação permanente os principais ensaios são: ensaios fundamentais (triaxial com carregamento repetido e compressão uniaxial não-confinada - *creep* estático e *creep* dinâmico); e ensaios de simulação (simuladores de laboratório).

Os ensaios triaxiais dinâmicos visam reproduzir em laboratório os carregamentos impostos pelas cargas dos veículos na estrutura do pavimento. Os



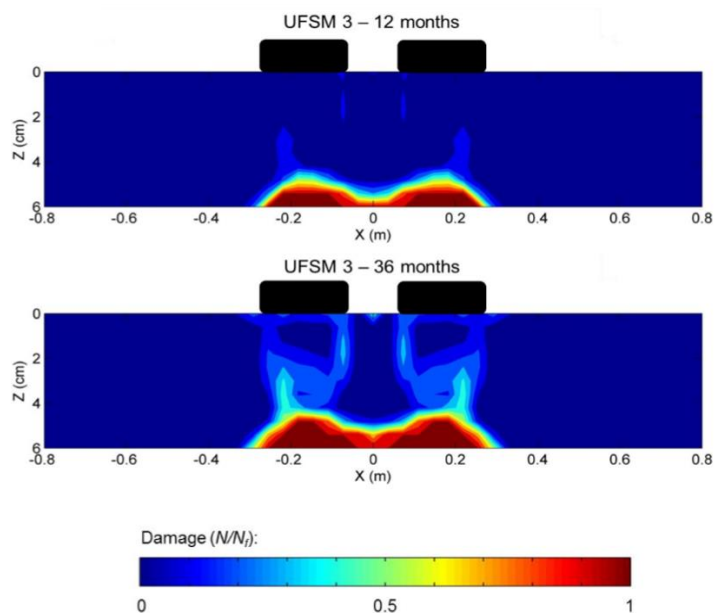
ensaios de cargas repetidas, onde a força aplicada atua no mesmo sentido de compressão (de forma cíclica, de zero até um valor máximo com tempos de repouso), objetivam simular as condições supracitadas, onde a velocidade e fluxo de tráfego são simulados em laboratório, respectivamente, pelo tempo de pulso e frequência da aplicação da carga em simuladores de tráfego com rodas. No Brasil, o único ensaio normalizado é o *Flow Number*, pela recente NBR 16505:2016.

### 2.2.2.3 Fadiga

De acordo com Di Benedetto et al. (2004), as misturas asfálticas estão submetidas em um curto espaço de tempo, a carregamentos resultantes dos veículos. Com o carregamento surgem micro trincas na superfície inferior do revestimento asfáltico, resultando na perda de rigidez do material e o acúmulo destas resulta no fenômeno de fadiga.

O fenômeno de fadiga é a degradação do material sob carregamento repetido, reconhecido como uma das principais causas da deterioração ou degradação dos materiais dos pavimentos. As trincas por fadiga iniciam nas regiões de máximas tensões ou deformações de tração, já que se verifica que os materiais são mais resistentes a carregamento repetidos de compressão do que de tração (Figura 16).

Figura 16 - Demonstração das tensões de um pavimento



Fonte: (Nascimento, 2015).

A carga das rodas é considerada uma carga vertical de compressão aplicada na superfície do pavimento, que geram nas fibras inferiores da camada asfáltica tensões de tração e de compressão devido ao carregamento e descarregamento repetido. As trincas geralmente surgem primeiro na superfície inferior camada asfáltica, onde as forças de tração são maiores, e, posteriormente, propagam-se para a superfície do pavimento na forma de trincas interligadas danificando o pavimento.

Segundo Preussler (1983), os comportamentos à tensão ou deformação dependem tanto da espessura e da rigidez da camada de revestimento quanto da rigidez da estrutura subjacente. E, assim como as propriedades de rigidez e de deformação permanente em misturas asfálticas, o fenômeno de fadiga pode ser afetado por vários fatores.

Momm (1998) faz um apanhado sobre os principais fatores que afetam o comportamento a fadiga, divididos em três famílias:

I. Fatores de solicitação: Durante a evolução do teste de fadiga à tensão controlada a deformação cresce continuamente até a ruptura. No teste à deformação controlado a tensão reduz progressivamente; Os concretos asfálticos tendem à duração de vida menor nos ensaios com tensão controlada que com deformação controlada; Os resultados de duração de vida nos testes de tensão controlada, em geral, são menos dispersos que nos ensaios de deformação controlada; Os módulos de rigidez mais altos tendem a produzir duração de vida maior nos ensaios de tensão controlada do que nos ensaios de deformação controlada; Nos ensaios de tensão controlada, a deterioração do corpo de prova é forte e a propagação das fissuras é rápida, enquanto que nos ensaios de deformação controlada a deterioração é moderada e mais longa;

II. Fatores de formulação do concreto asfáltico: Existem muitos fatores de formulação que influenciam a fadiga dos concretos asfálticos, a seguir são apresentados os mais importantes: Natureza do Cimento Asfáltico; Teor de Cimento Asfáltico; Tempo de Repouso; Compacidade ou Percentagem de Vazios; Granulometria; e, A Forma e a Textura dos Granulares;

III. Fatores do meio ambiente: Os dois principais fatores do meio ambiente que afetam a resistência à fadiga dos concretos asfálticos são a temperatura e a velocidade da aplicação da carga (ou frequência).

Medina e Motta (2015) afirmam ainda que as variações diárias e sazonais de temperatura também causam variações na rigidez e envelhecimento da mistura

asfáltica. Assim, a deformabilidade da mistura é condicionada pelas variações da temperatura do ar ou das condições climáticas de um modo geral.

É importante caracterizar o dano por fadiga das misturas asfálticas onde é necessário avaliar seu comportamento sob estado de tensão parecido com o encontrado em campo. No entanto é um objetivo complexo visto que existem muitas variáveis e ainda a dimensão das deformações e das tensões obtidas pela passagem do eixo variam em função do tipo de tráfego e das condições climáticas

Os principais ensaios laboratoriais para determinação do desempenho à fadiga são:

- I. Compressão diametral (Tração Indireta): método mais difundido no Brasil;
- II. Flexão em corpos de prova trapezoidais;
- III. Flexão em barras prismáticas ou vigas;
- IV. Tração-Compressão uniaxial.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda o planejamento da pesquisa, características das misturas asfálticas e seus componentes (agregados e CAPs). Trata ainda dos procedimentos laboratoriais que serão empregados de modo a alcançar os objetivos.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

O planejamento laboratorial da pesquisa seguiu as seguintes etapas:

- I. Coleta, separação e caracterização dos CAPs, cal e agregados;
- II. Ensaios do processo de dosagem de misturas asfálticas;
- III. Moldagem dos corpos de prova para realização dos ensaios;
- IV. Realização de ensaios para verificação do comportamento das misturas quanto à rigidez e ao dano: Módulo de Resiliência, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo Dinâmico, *Flow Number* e Fadiga à Tração-Compressão uniaxial.

Foram moldados corpos-de-prova utilizando misturas convencionais a quente formadas pelo mesmo esqueleto pétreo e seis CAPs produzidos em 5 refinarias brasileiras diferentes. Os seis CAPs escolhidos para esta pesquisa representam, de modo geral, a produção brasileira de cimentos asfálticos convencionais em um dado momento.

De forma a contemplar os objetivos (avaliar a rigidez e os danos por fadiga e deformação permanente) foram selecionados os ensaios listados na Tabela 8, que apresenta também o número de CPs por ensaio realizado na pesquisa.

Tabela 8 – Nomenclatura das misturas e número de CPs por ensaio realizado na pesquisa

Tipo de CAP e refinaria	Dosagem	Ensaios para avaliar rigidez		Ensaios para avaliar dano			Total
		Módulo de Resiliência	Módulo Complexo	Fadiga tração-compressão	Resistência a tração *	<i>Flow Number</i>	
30/45 REGAP	15	3	3	5	3	3	29
50/70 LUBNOR	15	3	3	5	3	3	29
50/70 REFAP	15	3	3	5	3	3	29
50/70 REGAP	15	3	3	5	3	3	29
50/70 REPAR	15	3	3	5	3	3	29
50/70 REVAP	15	3	3	5	3	3	29
Total de corpos de prova moldados							174

\*No ensaio de RT foram utilizados os mesmos CPs do ensaio de MR.

Fonte: (Autora).

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na pesquisa são os convencionalmente aplicados em obras rodoviárias: agregados virgens e CAP. As misturas foram compostas por agregados pétreos, cal e cinco CAP 50/70 de diferentes refinarias brasileiras e um CAP 30/45.

### 3.2.1 Agregados

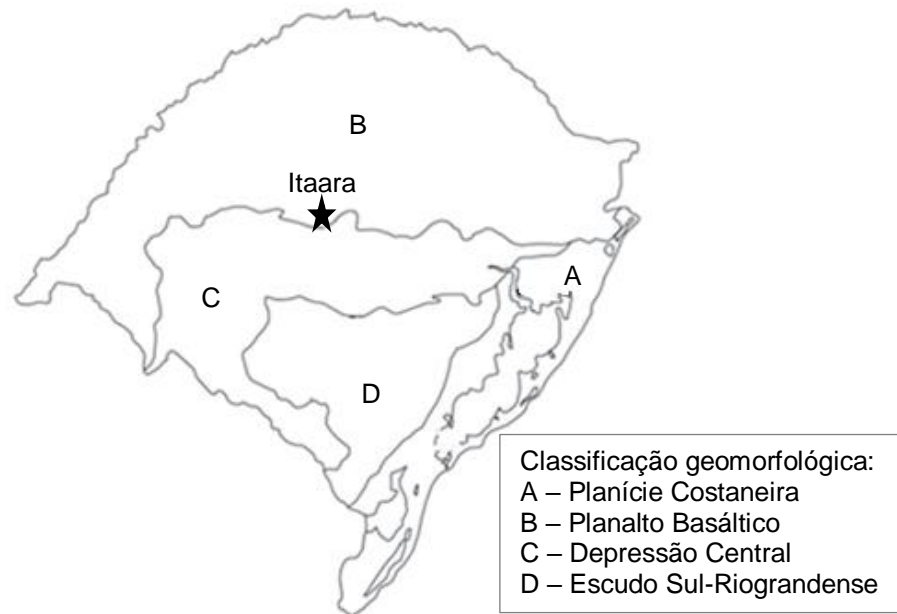
O agregado pétreo utilizado na pesquisa é proveniente do município de Itaara, Rio Grande do Sul (RS), fornecido pela empresa Della Pasqua Engenharia e Construções LTDA. O estado do RS é constituído por 4 formações geológicas, apresentadas na Figura 17. O município de Itaara encontra-se na formação geológica da Planalto Basáltico, apresentado pela letra B, classificada como um Riodacito de origem vulcânica.

Foram utilizadas as frações: brita 3/4", brita 3/8", pó de pedra além de cal calcítica. A cal é proveniente do município de Colombo no Paraná, e foi escolhida por ser mais reativa que a dolomítica e por ser utilizada em pavimentos no RS. Ainda, Barbosa (2018), que desenvolve pesquisa no mesmo grupo, utiliza esta cal para avaliar seu efeito nas misturas asfálticas.

A composição granulométrica das misturas asfálticas foi definida pela Faixa C do DNIT utilizando adicionalmente parâmetros Bailey e FAD, de forma que prioritariamente atenda as especificações do DNIT. O DNIT preconiza que a faixa adequada será aquela cujo diâmetro máximo do agregado seja menor que 2/3 da espessura da camada, por isso foi escolhida a Faixa C pois é adequada para camada de rolamento comum aos pavimentos brasileiros. As seis misturas têm o mesmo esqueleto pétreo a fim de isolar esta variável e focar no melhor entendimento do comportamento mecânico que os CAPs proporcionam às misturas.

As imagens das Figuras 18 e 19 são fotografias do material coletado em maio de 2016 para esta pesquisa. Os agregados foram separados por fração e acondicionados sob uma tela nos fundos do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM (LMCC/UFSM). A curva granulométrica dos materiais se encontra na Figura 20.

Figura 17 - Formações geológicas do Estado do RS



Fonte: (Adaptado de Boeira, 2014).

Figura 18 – Brita 3/4" (esquerda), Brita 3/8" (centro) e Pó de Pedra (direita)



Fonte: (Autora).

Além da granulometria dos materiais pétreos e da cal calcítica, também foram realizados os ensaios de índice de forma, índice de lamelaridade, sanidade, abrasão, massa específica, equivalente de areia, índice de vazios, entre outros. O ensaio de adesividade foi realizado apenas com o CAP 50/70 da REFAP. Estes ensaios laboratoriais (cujos resultados constam na Tabela 9) foram executados no LMCC da

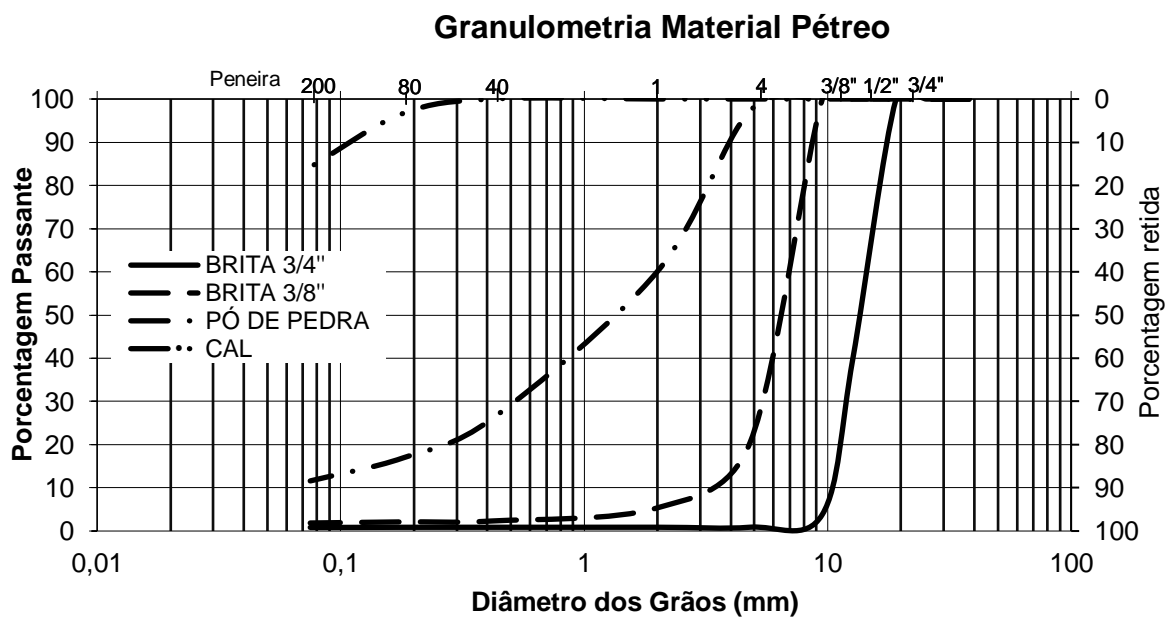
UFSM. Os agregados foram submetidos a ensaios de caracterização preconizados pelo DNIT ES-031/2006 e respeitaram os limites das especificações.

Figura 19 – Depósito dos agregados pétreos da pesquisa no LMCC



Fonte: (Autora).

Figura 20 - Curva granulométrica do material pétreo e da cal



Fonte: (Autora).

Tabela 9 – Propriedades do agregado em estudo

Propriedades	Norma	Limites DNIT	Resultados
Abrasão “Los Angeles” (%)	DNER-ME 035/98	≤50	13
Índice de forma	DNER-ME 086/94	>0,50	3/4”: 0,94   3/8”: 0,78
Sanidade (%)	DNER-ME 089/94	<12	0,44
Equivalente de areia (%)	DNER-ME 054/97	≥55	80,04
Índice de Lamelaridade	DAER/RS-EL 108/01	-	3/4”: 9,20   3/8”: 27,4
Absorção (%)	DNER-ME 195/97	-	2,9306
Massa específica agregado miúdo (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM C 127/2007	-	2,667
Massa unitária (kg/m <sup>3</sup> )	NBR NM45/2006	-	3/4”: 1388,88   3/8”: 1417,75   Pó: 1523,07
Índice de vazios (%)	NBR NM45/2006	-	3/4”: 48,16   3/8”: 46,56   Pó: 42,89
Adesividade	DNER-ME 078/94	-	Satisfatória

Fonte: (Autora).

O material pétreo deste trabalho foi submetido a um sistema de análise da morfologia por imagem, o *Aggregate Image Measurement System 2* (AIMS 2). As amostras de material foram enviadas para a COPPE na UFRJ onde foram realizadas as análises morfológicas. O ensaio no AIMS 2 ainda não está previsto em normas brasileiras nem americanas, porém diversos trabalhos disponíveis na literatura têm indicado boa representatividade das diferentes propriedades de agregados medidas pelo sistema (Mahmoud et al., 2010; Bessa et al., 2012; Alves, 2014; Pazos, 2015). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10 e mostram que de um modo geral os agregados são cúbicos (esfericidade alta), moderadamente rugosos e não alongados. Todos atendem ao critério Superpave F&E.

Tabela 10 - Resumo de resultados de análise morfológica pelo AIMS 2

Agregado	Esfericidade	Angularidade	Flat & Enlogated	Textura	Forma 2D
3/4”	alta	moderada	≥ 1:1 = 98,3% > 1:2 = 26,1% > 1:3 = 0,4%	moderada	-
3/8”	extrema	moderada	≥ 1:1 = 67,2% > 1:2 = 5,4%	moderada	moderada
Pó-de-Pedra	-	moderada	-	-	moderada

Fonte: (Autora).

A decisão de adicionar cal às misturas foi importante e é embasada na afirmação de EULA (2010): a interação química entre a cal hidratada e os grupos



ácidos do CAP contribuem para o aumento da resistência ao envelhecimento e a adesividade das misturas. O DNIT tem recomendado o emprego da cal em misturas asfálticas desde 2009 nos contratos tipo CREMA.

Uma amostra da cal utilizada neste trabalho foi enviada à Cientec para serem realizados os ensaios de determinação de: resíduo insolúvel, óxidos de ferro e alumínio, óxido de cálcio total, óxido de magnésio, perda ao fogo e óxido de cálcio disponível. Todos os ensaios foram desenvolvidos segundo a norma NBR 6473:2003 e os resultados constam na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados de ensaios da cal

Determinação	Resultados cal calcítica
Resíduo insolúvel (RI+SiO <sub>2</sub> ), %	8,30
Óxidos de ferro e alumínio (R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %	1,00
Óxido de cálcio total (CaO), %	44,7
Óxido de magnésio (MgO), %	5,40
Perda ao fogo (1000 ± 50 °C), %	40,3
Óxido de cálcio (CaO) disponível, %	0,60

Fonte: (Autora).

### 3.2.2 Cimentos asfálticos de petróleo

Para uma ampla amostragem dos CAPs brasileiros, foram coletados seis CAPs em diferentes refinarias do Brasil localizadas em 5 estados. Os CAPs utilizados nesta pesquisa são:

- CAP 30/45 produzido na REGAP;
- CAP 50/70 produzido na LUBNOR;
- CAP 50/70 produzido na REFAP;
- CAP 50/70 produzido na REGAP;
- CAP 50/70 produzido na REPAR;
- CAP 50/70 produzido na REVAP.

Os laudos dos fabricantes contêm os resultados dos ensaios de especificação destes materiais, que estão na Tabela 12 e no Anexo A.

Os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade Brookfield para especificação dos CAPs foram realizados no GEPPASV para comparar com os resultados apresentados nos laudos fornecidos pelas refinarias. Os resultados dos ensaios para CAP realizados nesta pesquisa constam na Tabela 13 e corroboram os valores dos laudos apresentados no Anexo A.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de especificação dos CAP conforme laudos

PROPRIEDADE/UNIDADE	MÉTODO	30/45 REGAP	50/70 LUBNOR	50/70 REFAP	50/70 REGAP	50/70 REPAR	50/70 REVAP
Penetração (0,1mm)	D 5	30	62	57	50	59	54
Ponto de Amolecimento (°C)	D 36	63,2	48,2	48,6	50,2	48,1	49
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP 21, 20rpm (cP)	D 4402	430	369	300	315	314	392
Viscosidade Brookfield a 150°C, SP 21 (cP)	D 4402	211	181	156	169	160	193
Viscosidade Brookfield a 177°C, SP 21 (cP)	D 4402	76	67	60	64	59	74
RTFOT Penetração Retida (%)	D 5	70	74	65	55	70	63
RTFOT Aumento do Ponto de Amolecimento (°C)	D 36	4,2	3,2	4,8	4,8	2,3	4,2
RTFOT Ductilidade a 25°C (cm)	D 113	>150	>150	>147	>150	>100	>150
RTFOT Variação em % Massa (%)	D 2872	-0,105	0,029	0,053	-0,121	-0,024	-0,1
Ductilidade a 25°C (cm)	D 113	>150	>150	>147	>150	>100	>150
Solubilidade no Tricloroetileno (% massa)	D 2042	99,9	100	100	99,9	99,9	100
Ponto de Fulgor (°C)	D 92	304	>300	>236	328	>235	264
Índice de Suscetibilidade Térmica	X 018	-1,5	-1,2	-1,3	-1,1	-1,3	-1,3
Densidade relativa a 20/4 °C	D 70	1,011	1,000	1,000	1,011	1,013	1,019

Fonte: (Adaptado dos laudos da Petrobras disponíveis no Anexo A).

Tabela 13 - Resultados de ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade Brookfield realizados no GEPPASV

PROPRIEDADE/UNIDADE	MÉTODO	30/45 REGAP	50/70 LUBNOR	50/70 REFAP	50/70 REGAP	50/70 REPAR	50/70 REVAP
Penetração (0,1mm)	D 5	30	61	55	50	59	52
Ponto de Amolecimento (°C)	D 36	65	50	47	50	49	48
Viscosidade Brookfield a 135°C, SP 21, 20rpm (cP)	D 4402	462	372	307	305	332	342
Viscosidade Brookfield a 150°C, SP 21 (cP)	D 4402	225	183	162	155	167	173
Viscosidade Brookfield a 177°C, SP 21 (cP)	D 4402	80	68	60	60	59	62

Fonte: (Autora).

### 3.2.3 Misturas asfálticas

As misturas asfálticas desta pesquisa foram realizadas com seis CAPs diferentes, todas com o mesmo esqueleto pétreo e 2% de cal (valor comumente adotado nos projetos de pavimentos no RS).

O teor de CAP de projeto foi definido pela metodologia Superpave, utilizando o Compactador giratório Superpave.

A temperatura dos materiais para moldagem foi definida a partir da curva de Viscosidade Brookfield dos CAPs tendo como base os limites de viscosidade determinados pelo *Asphalt Institute* (1995) apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Limites de viscosidade para mistura e compactação

<b>Temperaturas</b>	<b>Mistura</b>	<b>Compactação</b>
Viscosidade (Pa.s)	0,15 - 0,19	0,25 - 0,31

Fonte: (Adaptado de Asphalt Institute, 1995).

O teor ideal foi fixado quando o volume de vazios da amostra atingisse 4,0%. Para tal foram moldados corpos de prova com teores de 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0% de teor de CAP com relação ao peso total de material inserido no misturador. Após a moldagem, os corpos de prova eram submetidos a pesagem seca, submersa e com a superfície seca para determinar o volume de vazios. Com os valores de volume de vazios obtidos, foi feita uma curva de volume de vazios versus teor de CAP. A equação desta curva foi aplicada para encontrar o teor de CAP correspondente ao volume de vazios de 4,0%.

A composição granulométrica da mistura foi estudada e definida conforme Tabela 15, para se adequar aos limites da Faixa C do DNIT 031/2006 bem como os limites do método Bailey para misturas miúdas apresentados na Tabela 16. A mistura é considerada miúda conforme o *Asphalt Institute* (2011) pois 51,7% do material é passante na peneira 4,75mm (peneira de controle para este TMN). Privilegiou-se o melhor ajuste granulométrico, o método Bailey e FAD foram utilizados como parâmetros adicionais. Para mistura foi definida a proporção de agregados de: 29% de brita 3/4", 23% de brita 3/8", 46% de pó de pedra e 2% de cal. Foi feito um ajuste na granulometria do pó de pedra e da brita 3/4" para uniformizar a mistura e obter um melhor encaixe na Faixa C do DNIT.

A curva de composição granulométrica da mistura está apresentada na Figura 21 onde é possível visualizar o encaixe da curva de composição das misturas (preta) entre as curvas de limites da faixa C do DNIT (vermelhas) e também o ajuste entre a faixa de trabalho (curvas verdes). Também se observou os limites e a zona de restrição da metodologia Superpave.

Tabela 15 - Composição granulométrica da mistura asfáltica conforme limites da Faixa C do DNIT ES-031/06

PENEIRA	mm	Limites faixa C		Centro faixa C	Faixa trabalho		MISTURA
1 1/2"	38,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>
1"	25,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>
3/4"	19,1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	<b>100,0</b>
1/2"	12,7	80,0	100,0	90,0	80,0	89,6	<b>82,6</b>
3/8"	9,5	70,0	90,0	80,0	70,0	79,1	<b>72,1</b>
n 4	4,8	44,0	72,0	58,0	46,7	56,7	<b>51,7</b>
n 10	2	22,0	50,0	36,0	26,1	36,1	<b>31,1</b>
n 40	0,42	8,0	26,0	17,0	9,3	19,3	<b>14,3</b>
n 80	0,18	4,0	16,0	10,0	6,7	12,7	<b>9,7</b>
n 200	0,075	2,0	10,0	6,0	4,2	8,2	<b>6,2</b>

Fonte: (Autora).

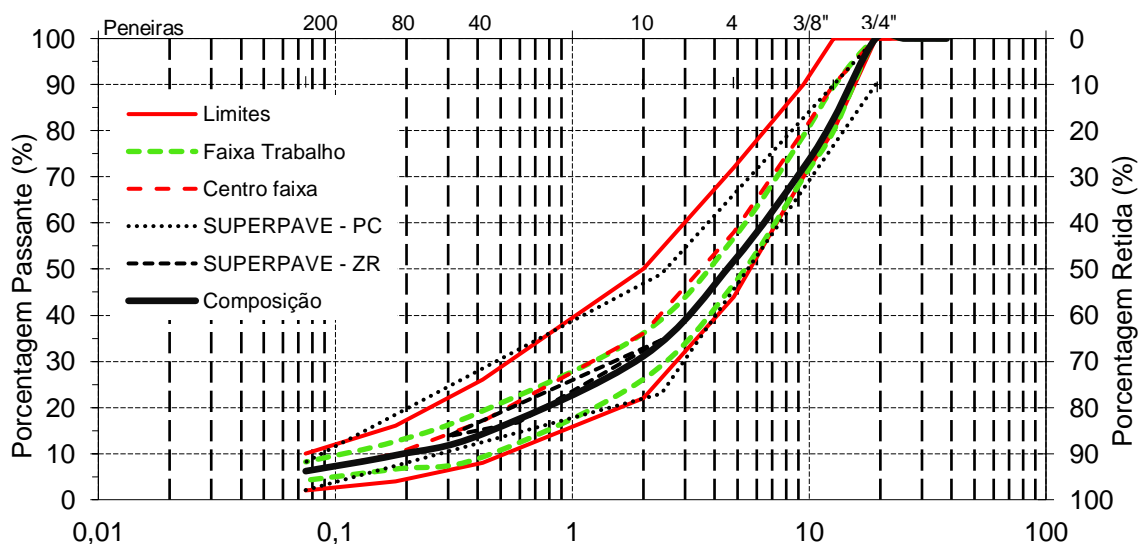
Tabela 16 - Limites do método Bailey e resultados para a composição das misturas miúdas

Limites	Proporção	Resultados para a mistura
0,6 a 1,00	AG	0,73
0,35 a 0,5	GAF	0,44
0,35 a 0,5	FAF	0,55

Fonte: (Autora).

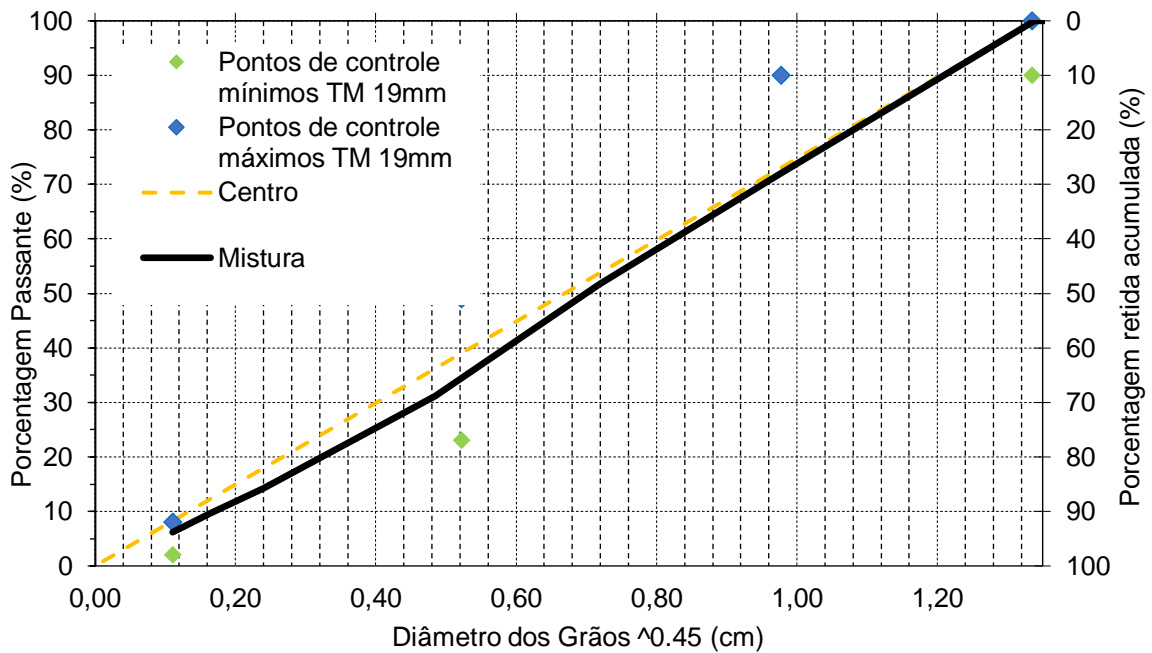
A forma de escolha da granulometria da mistura de agregados na metodologia Superpave inclui os conceitos de pontos de controle conforme SHRP (1994). Esta composição granulométrica respeita os pontos de controle mínimos e máximos da metodologia de dosagem Superpave (Figuras 22 e 23).

Figura 21 - Curva da composição granulométrica - Faixa C DNIT 031/2006



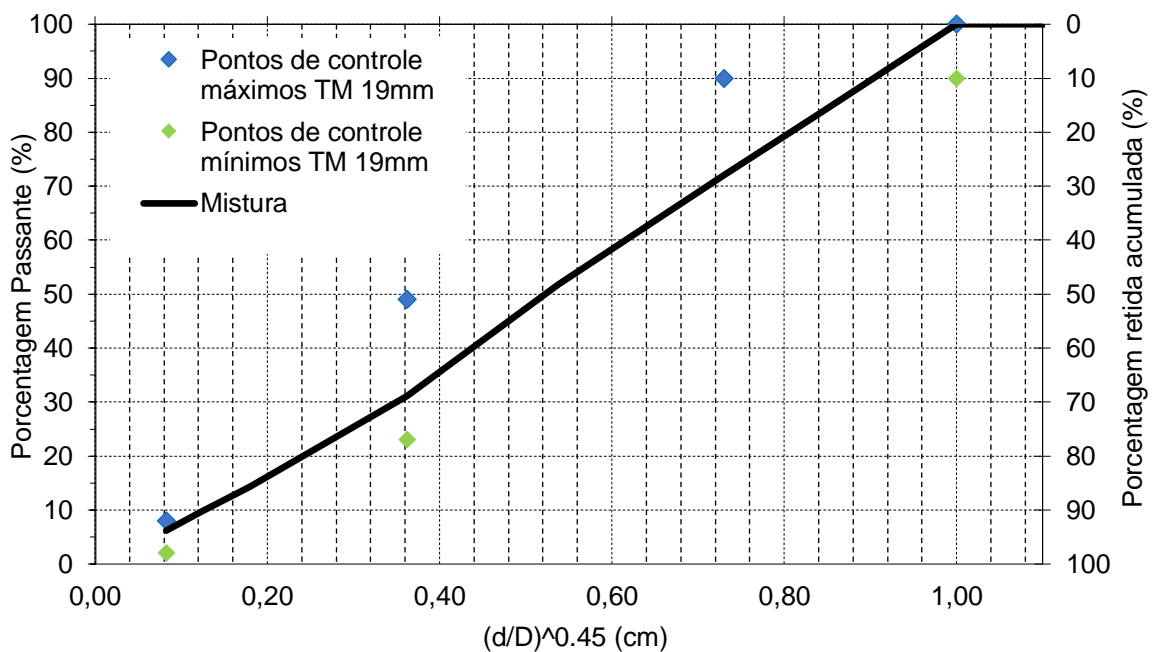
Fonte: (Autora).

Figura 22 - Composição Granulométrica da mistura com pontos de controle Superpave para TM de 19mm versus diâmetro dos grãos elevados à potência 0,45



Fonte: (Autora).

Figura 23 - Composição Granulométrica da mistura com pontos de controle Superpave para TM de 19mm versus  $(d/D)$  elevados à potência 0,45



Fonte: (Autora).

### 3.3 ENSAIOS LABORATORIAIS

O foco deste trabalho é avaliar a influência que diferentes CAPs produzidos no Brasil têm na reologia e na resposta ao dano das misturas asfálticas. Os ensaios laboratoriais descritos são para misturas asfálticas e seus resultados são alvo de avaliações no capítulo seguinte. Ainda, demonstrou-se como foram feitos os cálculos dos resultados dos ensaios pelas equações preconizadas nas normas ou na literatura.

Foram apresentados os procedimentos da dosagem das misturas asfálticas. Também foram descritos os ensaios de módulo que possibilitam avaliar a rigidez das misturas asfálticas. Nesta pesquisa foram realizados os ensaios de Módulo de Resiliência e Módulo dinâmico. Os ensaios para avaliar dano utilizados foram: Resistência à tração por compressão diametral, *Flow Number* e Fadiga Tração-Compressão Uniaxial.

#### 3.3.1 Dosagem das misturas asfálticas

A dosagem das misturas foi realizada tendo em vista algumas recomendações da metodologia Superpave. Esta metodologia engloba uma gama de ensaios, previstos na revisão de literatura, que ainda não são operacionais no LMCC. Logo, a dosagem foi feita utilizando além dos parâmetros de volume de vazios, compactação e moldagem do Superpave, alguns parâmetros adicionais como Bailey e FAD para obter uma mistura com esqueleto pétreo equilibrado e quantidade de ligante adequada conforme alguns conceitos Superpave. Os corpos de prova foram moldados no Compactador Giratório Superpave (CGS), da marca Servopac, apresentado na Figura 24. A mistura dos componentes da massa asfáltica foi feita no misturador Infratest (Figura 24) disponível no LMCC.

Os requisitos volumétricos para as misturas dosadas pela metodologia Superpave foram respeitados e constam na Tabela 17.

Tabela 17 - Requisitos volumétricos para as misturas dosadas pela metodologia Superpave

CAP	Volume de vazios (%)	VAM (%)	RBV (%)
50/70 e 30/45	4	>13 (TMN 19mm)	65 a 75

Fonte: (Autora).

Conforme Bernucci et al. (2010), a dosagem pelo método Superpave consiste basicamente em estimar um teor provável de projeto com a fixação do volume de vazios e do conhecimento da granulometria dos agregados disponíveis. Ainda conforme os autores, a maior diferença entre este procedimento e o Marshall é a forma de compactação. Enquanto na dosagem Marshall, a compactação é feita por impacto (golpes), na dosagem Superpave é realizada por amassamento (giros).

As características do CGS padronizado pelo Superpave são utilizar uma pressão vertical no cilindro compactador de 600kPa, diâmetro das amostras de 150 ou 100mm, ângulo de giro de  $1,25 \pm 0,02^\circ$  e taxa de 30 rotações por minuto. O número de giros (N projeto) que o compactador giratório irá produzir na amostra depende do tipo de tráfego, e na presente pesquisa foi adotado um número de giros de 100, correspondente a vias de tráfego médio a alto.

Figura 24 – Misturador Infratest (direita) e Compactador Giratório Servopac (esquerda)



Fonte: (Autora).

O processo de moldagem dos corpos de prova para a dosagem do teor de CAP e para as amostras a serem ensaiadas era o seguinte: os agregados virgens já lavados e secos eram separados de acordo com a composição granulométrica da Tabela 15 e ficavam na estufa durante a noite na temperatura de 125°C, e pela manhã, aumentava-se para a temperatura determinada na Tabela 18; para o aquecimento dos CAP procedia-se da mesma forma, aumentando para a temperatura estipulada na Tabela 18 pela parte da manhã, após passar a noite em outra estufa a 100°C. Estas

temperaturas foram calculadas tendo como base os limites para viscosidade Brookfield (Tabela 14) para cada mistura conforme o Asphalt Institute (1995). A temperatura dos agregados foi definida como sendo a temperatura de mistura acrescida de 10°C pois o material perde temperatura no caminho entre a estufa e o misturador.

O misturador foi regulado nas temperaturas de cada mistura e durante 100 segundos misturava apenas os agregados, após era adicionado o CAP e o misturador girava por mais 400 segundos. Após o tempo de mistura do equipamento, a massa asfáltica era misturada manualmente e avaliada visualmente para evitar o acúmulo de finos no fundo do misturador para só então separar as amostras em bandejas (1250g cada) e colocá-las na estufa por 2 horas na temperatura de compactação para simular o envelhecimento de curto prazo. Após o tempo de envelhecimento, as amostras foram colocadas no molde aquecido (na temperatura de compactação) do CGS. Este procedimento foi feito de forma igual para todas as misturas.

Tabela 18 - Temperaturas dos agregados, mistura e compactação para moldagem

Mistura	Temperatura dos agregados (°C)	Temperatura de mistura (°C)	Temperatura de compactação (°C)
CAP 30/45 REGAP	166	156	147
CAP 50/70 LUBNOR	164	154	141
CAP 50/70 REFAP	161	151	136
CAP 50/70 REGAP	162	152	137
CAP 50/70 REPAR	162	152	140
CAP 50/70 REVAP	166	156	140

Fonte: (Autora).

Durante o procedimento de dosagem, para cada teor de CAP foi introduzido no misturador aproximadamente 7kg de massa asfáltica para compor: três corpos de prova que continham 1200 g cada e mais uma amostra de 1500 g foi separada para a realização do ensaio de determinação da densidade máxima medida (Gmm), através do método de Rice que foi realizado para cada teor testado, o qual obedece a AASHTO T 209-15 - *Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot Mix Asphalt*, normatizada no Brasil através da NBR 15619:2012 para misturas asfálticas. Através desse parâmetro de densidade foi possível calcular, em média, o volume de vazios para cada teor, e assim, determinar o teor ótimo de projeto para cada mistura, correspondente a um volume de vazios (VV) igual a 4,0%. Todos os resultados do procedimento de dosagem estão apresentados no Capítulo 4.

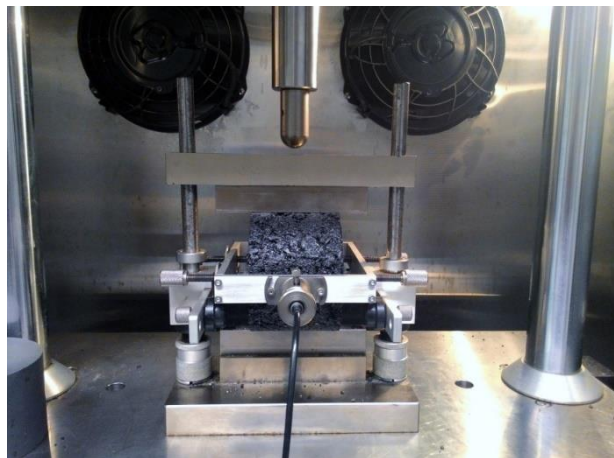


### 3.3.2 Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência (MR) é padronizado pela norma DNIT 135/2010. O intuito do ensaio é determinar a capacidade que um corpo elástico tem de armazenar energia, quando solicitado a um carregamento e, após, retornar ao seu estado inicial.

O equipamento utilizado para este fim é a prensa *Universal Testing Machine* UTM – 25 da IPC global, apresentada na Figura 25 com o aparato para realização de ensaio de MR montado. A prensa UTM – 25 é composta por um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante, com auxílio de um dispositivo hidráulico, acoplado a um regulador de tempo e frequência de 1Hz. Devido ao equipamento funcionar dentro de uma câmara com temperatura controlada, este permite que sejam realizados ensaios em diversas temperaturas. Para este trabalho foi utilizada a temperatura de 25°C.

Figura 25 - Ensaio de MR realizado no equipamento UTM-25



Fonte: (Autora).

Para iniciar o ensaio, os CPs devem ficar condicionados a 25°C, por no mínimo 12 horas, posteriormente o corpo-de-prova é encaixado no suporte para posicionar os LVDTs (*Linear Variable Differential Transducer*) em sua face, alinhando-o na vertical, horizontal e centralizado no cilindro de aplicação da carga. O módulo de resiliência é medido a partir da aplicação do carregamento dinâmico com tempo de 0,1s de duração e 0,9s de repouso. Este tipo de aplicação de carga simula o efeito do tráfego, o qual aplica cargas transientes do movimento dos veículos. Dessa forma, a amostra

sofre deformações horizontais, que são medidas através de um LVDT, ligado a um microcomputador, que coleta e arquiva todas as informações. O carregamento utilizado é o mínimo suficiente para deformar a amostra. O coeficiente de Poisson, para execução do ensaio, foi fixado em 0,30 para 25°C de acordo com a norma DNIT – ME 135/2010. Neste estudo foi considerada a influência do arranjo granulométrico dentro das amostras na determinação dos valores de módulo e para tal foram realizados ensaios de MR em duas direções distintas (0° e 90°).

A Equação 5 foi utilizada para o cálculo do módulo de resiliência.

$$M_R = \frac{P}{\Delta h} (0,9976\mu + 0,2692) \quad (5)$$

Onde:

$M_R$  = módulo de resiliência (MPa);

$P$  = carga vertical repetida aplicada diretamente no corpo-de-prova (N);

$\Delta$  = deformação elástica ou resiliente medida nos ciclos particulares de repetição de carga ( $P$ ) (mm);

$h$  = altura do corpo-de-prova (mm);

$\mu$  = o coeficiente de Poisson (0,30 para 25°C).

### 3.3.3 Módulo Complexo

O módulo complexo ( $E^*$ ) é um número complexo que relaciona tensão e deformação para materiais viscoelásticos sujeitos a carregamento senoidal aplicado num certo domínio de frequência, sendo o módulo dinâmico o valor absoluto do módulo complexo.

O ensaio de módulo complexo consiste na aplicação de uma carga uniaxial compressiva senoidal em corpo de prova cilíndrico. Nascimento (2008) afirma que a relação tensão-deformação durante o carregamento senoidal contínuo é definida por um número complexo chamado de Módulo Complexo ( $E^*$ ) e o valor absoluto  $|E^*|$  é definido como Módulo Dinâmico. Ou seja,  $|E^*|$  é a relação entre a tensão dinâmica máxima e a deformação axial recuperável máxima, sendo a defasagem entre a aplicação de carga e a resposta da amostra definida como ângulo de fase da mistura

asfáltica ( $\phi$ ). O ângulo de fase indica uma das propriedades viscosas do material, sendo  $0^\circ$  para material elástico e  $90^\circ$  para material viscoso.

O valor do  $|E^*|$  varia em função dos parâmetros de ensaio (temperatura e velocidade de carregamento) e também dos parâmetros da formulação do material betuminoso, natureza e teor do ligante, porcentual granular e de finos, e, a forma de compactação.

O ensaio é baseado na norma da AASHTO T 342-11 – *Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)* que considera:

- I. Temperaturas de ensaio:  $-10^\circ\text{C}$ ,  $4^\circ\text{C}$ ,  $21^\circ\text{C}$ ,  $37^\circ\text{C}$  e  $54^\circ\text{C}$ ;
- II. Frequências de carregamento (para cada temperatura): 0.1, 0.5, 1, 5, 10 e 25Hz;
- III. Tamanho do corpo-de-prova: variação do diâmetro entre 100 e 104 mm, altura de 147,5 e 152,5mm e tamanho máximo nominal de 37,5 mm.

O ensaio é realizado aplicando um carregamento axial semi-senoidal (*haversine*) em CPs cilíndricos, onde são medidos os deslocamentos verticais correspondentes. Di Benedetto e Corté (2005) comentam que os valores desses deslocamentos/deformações devem ser pequenos (menores que  $100 \cdot 10^{-6}\text{m/m}$  ou  $100\mu\text{S}$ ) para que não ocorra dano ao material. Avaliando uma mistura asfáltica no domínio das pequenas deformações o comportamento esperado é o viscoelástico linear. A norma indica que as deformações não ultrapassem  $75\mu\text{S}$ .

O ensaio é realizado na prensa UTM-25, utilizando 3 LVDTs (*Linear Variable Differential Transducers*) que são fixados com pinos nos corpos de prova. Ainda, é adicionada uma borracha para segurar os LVDTs contra os corpos de prova pois nas temperaturas altas há uma tendência destes se soltarem. A Figura 26 apresenta o CP posicionado na prensa para a realização do ensaio.

Para interpretar os resultados do ensaio foi utilizada a modelagem 2S2P1D desenvolvida por Di Benedetto & Corté (2005) para carregamentos bidimensionais, ou seja, não considera o coeficiente de Poisson. O modelo 2S2P1D aplicado a este caso possui os parâmetros de calibração para representação correta do comportamento viscoelástico do material em termos de módulo e ângulo de fase para temperatura e frequência de carregamento variado.

Figura 26 - Realização do ensaio de Módulo dinâmico na prensa UTM-25 no LMCC



Fonte: (Autora).

### 3.3.4 Resistência à tração por compressão diametral

Após a realização de ensaios de Módulo de resiliência, os mesmos corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência a tração por compressão diametral (RT) na prensa UTM-25 (Figura 27).

O ensaio preconizado pela norma DNIT-ME 136/2010, também é conhecido como “ensaio brasileiro” e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter as tensões de tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga. Antes de aplicar a carga, o corpo-de-prova deve estar apoiado sobre uma geratriz em compartimento com temperatura controlada de 25°C. A resultante obtida é a resistência à tração (RT).

Foram utilizados corpos-de-prova com 6,3cm de altura e 10cm de diâmetro. A prensa UTM-25 e o *software* adaptado possibilitaram a aquisição de dados de deslocamento vertical e força a cada 0,01 segundo.

Figura 27 – Realização do ensaio de resistência a tração por compressão diametral na prensa UTM-25



Fonte: (Facin, 2018).

Os resultados da ruptura para determinação da resistência à tração foram obtidos utilizando a Equação 6.

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (6)$$

Onde:

$\sigma_R$  = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

$F$  = carga de ruptura (N);

$D$  = diâmetro do corpo-de-prova (cm);

$H$  = altura do corpo-de-prova (cm).

Além disso, com as medidas de deslocamento vertical e força a cada 0,01 segundos foi possível calcular os parâmetros de tenacidade, índice de tenacidade e Energia de Fratura. Também foi avaliado a utilização do Índice de Flexibilidade, adaptando-o ao ensaio brasileiro realizado.

A resistência a tração direta é calculada em função da carga máxima aplicada no momento da ruptura do corpo de prova utilizando a teoria da elasticidade,

ignorando o efeito do estado multiaxial de tensões. É o parâmetro utilizado nas especificações brasileiras. O DNIT (031/2006) especifica o valor mínimo de resistência à tração de 0,65MPa para misturas asfálticas densas.

A tenacidade é a capacidade de um material absorver energia e se deformar plasticamente antes da fratura. O cálculo de tenacidade é feito a partir área sob a curva Tensão de tração versus o deslocamento horizontal até uma deformação do dobro daquela incorrida com tensão de tração máxima (Putman e Amirkhanian, 2004), sendo este valor denominado de "tenacidade do material". A deformação horizontal é calculada considerando a teoria da elasticidade considerando o coeficiente de Poisson.

O Índice de Tenacidade (IT) é um parâmetro adimensional que descreve a tenacidade na região pós-pico, também calculado a partir dos resultados do ensaio de RT.

A Energia de Fratura, conforme Kim & Wen (2002) pode ser considerada um indicador de performance de trincamento por fadiga de misturas asfálticas. Os autores indicam que a RT e a deformação durante o pico de carregamento não servem como indicadores de resistência à fadiga, mas que a correlação entre energia de fratura determinada no ensaio de RT e o trincamento por fadiga serve. O parâmetro é a área sob a curva até a deformação de tração no momento de ruptura (máxima tensão).

Além desses parâmetros, foi analisada a viabilidade de adaptação do ensaio de RT para obter o Índice de Flexibilidade (*Illinois Flexibility Index* - IF). Este parâmetro é calculado conforme o *Illinois Test Procedure - 405* (2015) e originalmente é realizado com CPs semicirculares. O teste IF é utilizado para determinar os parâmetros de resistência à fratura de uma mistura asfáltica. A partir dos parâmetros de fratura obtidos a temperatura intermediária, calcula-se o IF de uma mistura asfáltica. O IF é calculado a partir da curva Gf e pós-pico da curva carga-deslocamento e fornece um meio para identificar misturas frágeis que são propensas a trincamento prematuro. O intervalo para um IF aceitável varia de acordo com as condições ambientais locais, a aplicação da mistura, o tamanho máximo agregado nominal, o grau de desempenho (PG) do asfalto, o volume de vazios de ar e expectativa de vida útil, etc.

Mesmo que o IF seja recente, apresenta mérito para uso devido à sua simplicidade, relevância física e boa correlação com o crescimento da propagação de rachaduras. O parâmetro IF também é promissor para proporcionar maior separação entre as misturas, o que não foi obtido apenas pela energia de fratura. Godoi (2017)

utilizou com sucesso estes parâmetros para analisar o trincamento de misturas asfálticas no ensaio de flexão em amostra semicircular.

### 3.3.5 Ensaio de Fadiga à Tração-Compressão Uniaxial

Segundo Nascimento et al. (2014) após 20 anos de pesquisas lideradas por Y. Richard Kim, da *North Carolina State University*, nos Estados Unidos, propôs-se uma nova técnica para a determinação da vida de fadiga de misturas asfálticas, em que é possível obter curvas experimentais por tração direta e com interpretação teórica mais consistente. O ensaio proposto de fadiga consiste em aplicar no corpo de prova uma deformação cíclica senoidal até que ocorra a ruptura ou a queda do ângulo de fase. São coletados e monitorados a deformação, a carga, o ângulo de fase e o módulo dinâmico durante a realização do ensaio.

A mesma prensa utilizada nos outros ensaios foi adequada para este ensaio de fadiga, a *Universal Test Machine* (UTM - 25) da IPC Global. A norma da AASHTO TP 107-14 (*Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*) é responsável por detalhar os métodos de ensaio.

Atualmente, além da UFSM, apenas o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes) da Petrobras, o laboratório de pavimentação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (UFC) e o Laboratório de Pavimentação (LAPAV) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul estão realizando o ensaio de Fadiga Tração-compressão no Brasil. Na Figura 28 está representado o aparato para a realização do ensaio disponível no LMCC da UFSM, que foi desenvolvido por Boeira (2018).

As amostras das seis misturas foram moldadas no compactador giratório do Superpave (CGS) nos teores de projeto determinados pela dosagem Superpave nas dimensões de 10x16cm e com volume de vazios de 5,5%  $\pm$  0,5%. Foram moldados 5 CPs para cada mistura, totalizando 30 CPs.

Após a retificação nas superfícies, suas dimensões finais ficaram iguais a 10x13cm. Depois de retificados foram colados com cola epoxilica nas placas *top* e *down* e conectadas à UTM-25 utilizando parafusos e rótula de tração. O procedimento de colagem foi feito com auxílio de um gabarito para que o topo e a base do CP

ficassem alinhados com o aparato. Para prosseguir o ensaio a camada de 1mm de cola deve estar seca (20h).

Conforme a norma AASHTO TP 107 de 2014, os ensaios foram conduzidos a uma frequência de 10Hz e temperatura de 19°C variando a amplitude de deformação. Foram utilizadas quatro amostras, uma para cada nível diferente de deformação (cerca de 125, 150, 200 e 250 $\mu$ S).

Figura 28 - Realização do ensaio de fadiga tração-compressão uniaxial



Fonte: (Autora).

Durante o ensaio é possível determinar a movimentação do atuador e com isso consegue-se aproximar uma tensão que gera deformações próximas às desejadas.

Desta forma, as deformações utilizadas nas análises são as deformações de ensaio, ou seja, as medidas pelos LVDTs que podem ser obtidas após a rotina no MATLAB. Para selecionar os valores de deformação e gerar as curvas de Wöhler e a análise pelas equações de Nascimento (2016), foi calculada a média de todas as deformações do ensaio até a ruptura do CP. A decisão de fazer a média dos valores



de deformação de todos os ciclos deve-se ao fato de que a média é a deformação mais próxima que o CP foi submetido durante o ensaio.

Conforme Mangiafico (2014), durante o ensaio de fadiga tração-compressão uniaxial, as misturas sofrem deterioração progressiva. Esse fenômeno, juntamente com falha prematura, é considerado efeito das cargas repetidas. Especificamente, à medida que o número de ciclos aumenta, o valor do módulo complexo diminui enquanto o valor de o ângulo de fase aumenta. Portanto, durante testes controlados por tensão, a deformação medida aumenta com o número de ciclos até a falha da amostra. Pelo contrário, durante os testes controlados por deformação, a tensão diminui com o aumento do número de ciclos para valores idealmente próximos de zero ou até a falha da amostra. A prensa UTM-25 não controla tensão nem deformação, no entanto no ensaio é possível controlar e medir o deslocamento do pistão de carregamento, que gera tensões conhecidas.

A falha, no entanto, não coincide necessariamente com a fratura visível da amostra. Existem vários critérios de ruptura para ensaios de fadiga, no entanto serão destacados os três considerados mais importantes. O primeiro critério está de acordo com a norma EN 12697-24: 2012 e considera a vida de fadiga ( $N_f$ ) como sendo o número de ciclos correspondente a uma redução de 50% do valor inicial de módulo dinâmico.

O segundo critério de falha é o utilizado nesta pesquisa e foi proposto por Kim et al. (2003). Consiste em identificar o ponto de inflexão na curva de Ângulo de fase versus número de ciclos. O ponto de inflexão correspondente ao pico do ângulo de fase e é considerado como representativo de uma mudança do comportamento mecânico do material, devido ao acúmulo de danos por fadiga. Por este motivo, o número de ciclos correspondente ao pico do ângulo de fase é tido como a vida de fadiga  $N_f$ .

O terceiro critério considera que os LVDTs estão posicionados em diferentes pontos da amostra cilíndrica cujas medições de deformação devem ser realizadas a 120° um do outro. Com esta configuração, enquanto a amplitude da deformação axial é avaliada como a média dos três valores medidos pelos LVDTs, é possível monitorar a diferença relativa de deformação entre cada amplitude de deformação e a amplitude média. Quando qualquer uma das três deformações exceder 25% da média, o campo de deformação da amostra é considerado não homogêneo, indicando a presença de uma fratura. A mesma abordagem pode ser seguida pelo monitoramento das

amplitudes de ângulo de fase. Quando a diferença relativa entre os valores de ângulo de fase de medidos em cada LVDT exceder  $5^\circ$  do valor médio dos outros, a ocorrência da falha é assumida.

Dos 30 CPs moldados, 28 foram ensaiados e 24 tiveram resultados válidos. Quatro CPs tiveram problemas durante o ensaio pois houve desprendimento parcial dos parafusos que os fixavam no equipamento em função da vibração da prensa.

Para a realização de cada ensaio, que segue os protocolos S-VECD desenvolvido por Daniel & Kim (2002), Kim & Chehab (2004), Underwood & Kim (2009) e Underwood et al. (2012), é feito primeiramente o ensaio de módulo complexo de curta duração em tensão-compressão (*fingerprint*). Esses ensaios de módulo complexo consistem em determinações com pequenas deformações (50 a  $70\mu\text{m}$ ) realizadas para capturar variações de amostra-a-amostra. Para as leituras foram utilizados os mesmos LVDTs dos ensaios de módulo complexo.

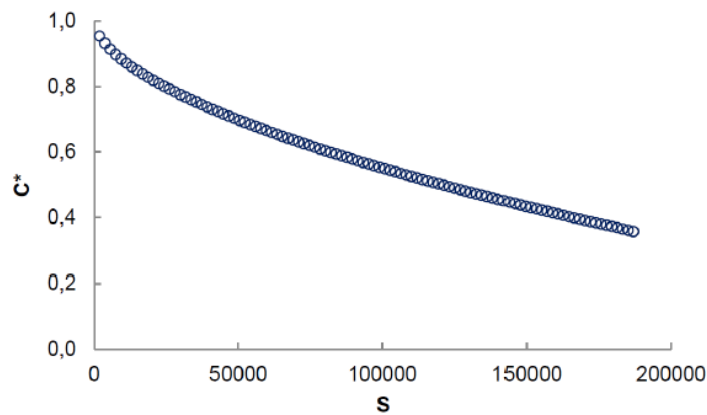
Para Nascimento et al. (2014), uma das principais vantagens do S-VECD é a obtenção da propriedade de dano das misturas, independentemente das condições de ensaio (temperatura, amplitude e se a forma de controle é por tensão ou deformação). Assim, ensaios feitos em uma condição específica, permitem a obtenção do comportamento do material em diversas outras condições, reduzindo o número de amostras e conseqüentemente o trabalho.

Babadopulos (2014) explica de forma prática a aplicação do S-VECD em misturas asfálticas, nos mesmos moldes em que foi aplicado nesta pesquisa.

Os autores do modelo comentam que o S-VECD pode ser utilizado de várias formas, porém duas valem destaque: a obtenção de curvas de fadiga em diferentes condições daquela ensaiada, e, para analisar pavimentos, a mecânica do dano contínuo viscoelástico. Desta forma, é possível avaliar as misturas utilizando a mecânica do dano contínuo com um número reduzido de ensaios.

Com os resultados exportados do *Software* da prensa foi possível, após rotina de cálculos no MATLAB, gerar uma Curva Característica de Dano para cada corpo de prova ensaiado e, a partir das curvas obtidas com os corpos de prova, foram feitos ajustes para representar a Curva Característica de Dano (C versus S) média do material (realizando um *fitting* médio para cada mistura). A curva característica de dano da Figura 29 demonstra um comportamento recorrente em misturas submetidas ao ensaio de Fadiga Tração-compressão uniaxial.

Figura 29 - Gráfico típico da curva característica de dano (C versus S), resultado do ensaio de Fadiga tração-compressão



Fonte: (Nascimento et al., 2014).

De forma a analisar os resultados obtidos no ensaio de fadiga tração-compressão, foram utilizadas duas equações para ranquear as misturas: As equações das curvas de Wöhler e as equações propostas por Nascimento (2016).

A análise pelas curvas de Wöhler das misturas consiste em criar um gráfico com dois eixos: um com os resultados de deformação ( $\epsilon$ ) medidos pelos LVDTs para cada corpo de prova ensaiado e outro com o número de ciclos (Nf) que cada CP sofreu antes de romper no ensaio, em escala log. Após verificar a equação da curva, é possível calcular o Nf para qualquer deformação escolhida. Para este trabalho as deformações escolhidas para calcular os Nf foram as obtidas pela simulação de um pavimento no *Software* AEMC-Sispav.

A análise mecanicista foi utilizada para analisar os resultados de fadiga e ser possível comparar as misturas; sucedeu-se da seguinte forma:

Todas as misturas foram simuladas com a mesma espessura de camadas e valores de módulos, exceto o valor do módulo do revestimento asfáltico que mudou conforme a mistura. Para a entrada de dados no *Software* AEMC-Sispav, considerou-se as camadas do pavimento como sendo não aderidas entre si, carga de eixo duplo igual a 8200Kgf e pressão de inflação dos pneus igual 0,56MPa e raio do carregamento de 10,79m.

Conforme os dados apresentados na Tabela 19, o pavimento proposto possui 4 camadas, sendo que o revestimento asfáltico tem 10cm de espessura, a base considerada de brita graduada simples (BGS) 15cm, a sub-base de macadame seco (MS) 20cm e o subleito de solo considerado infinito.

Tabela 19 - Resumo dos dados de entrada no AEMC-Sispav

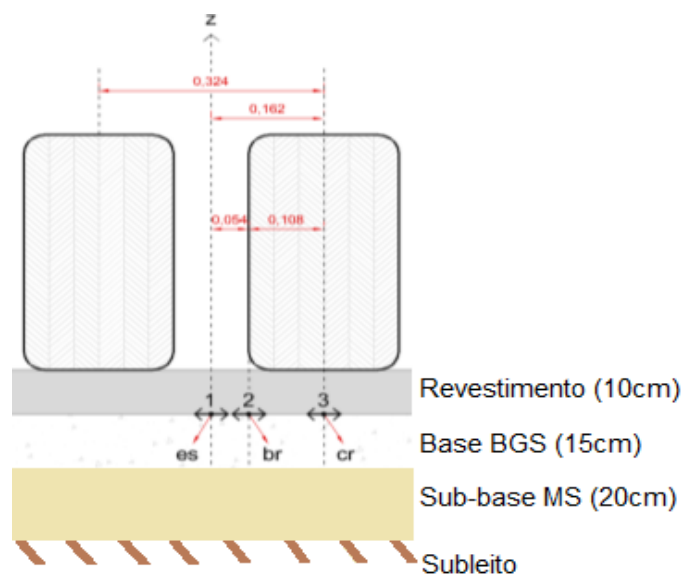
Camada	Espessura (cm)	Módulo (MPa)	Coef. Poisson
Revestimento	10	$ E^* $ de cada mistura	0,35
Base	15	202	0,3
Sub-base	20	197	0,4
Subleito	0	84	0,45

Fonte: (Autora).

Os valores dos módulos da camada superior utilizados foram os Módulos dinâmicos, a 25°C e 10Hz, de cada mistura obtidos pelos ensaios de Módulo Complexo realizados nesta pesquisa. Os valores de MR adotados para as camadas de base e sub-base foram amplamente pesquisados e são a média dos resultados encontrados por Ribas (2014). O valor de módulo do subleito adotado foi encontrado por Santos (2015) para os solos da região central do Rio Grande do Sul. Adotou-se para o coeficiente de Poisson os valores sugeridos por Balbo (2007), sendo estes: 0,35 para o revestimento; 0,30 para a camada de base (BGS); 0,42 para a camada de sub-base (Macadame seco); 0,45 para o subleito.

As deformações de tração na estrutura do pavimento foram analisadas na fibra inferior do revestimento asfáltico, a uma profundidade igual a 0,099m, ou seja, 0,0001m antes do fim desta camada asfáltica. Estas análises foram feitas em três posições distintas: no eixo de simetria (es), bordo da roda (br) e centro da roda (cr), como mostra a Figura 30.

Figura 30 – Posições das análises de deformação no fundo do revestimento asfáltico sob o carregamento das rodas do eixo padrão



Fonte: (Adaptado de Ribas, 2014).

Os resultados de deformação de tração no fundo do revestimento com os valores de  $|E^*|$  utilizados para simular cada mistura estão na Tabela 20. O valor escolhido dentre os três pontos analisados foi o que teve o maior valor negativo (maior tensão de tração  $\epsilon_t$ ) e, para todas as misturas simuladas, os maiores valores negativos de tensão foram encontrados no ponto imediatamente abaixo da roda (cr).

Tabela 20 - Resultados de  $\epsilon_t$  ( $\mu S$ ) no fundo do revestimento simulando o pavimento no AEMC com os  $|E^*|$  das misturas

MISTURA	$ E^* $ @ 25°C e 10Hz (MPa)	$\epsilon_t$ no fundo do revestimento ( $\mu S$ )
CAP 30/45 REGAP	9277	-197
CAP 50/70 LUBNOR	6463	-253
CAP 50/70 REFAP	7074	-238
CAP 50/70 REGAP	6914	-241
CAP 50/70 REPAR	5964	-267
CAP 50/70 REVAP	6949	-241

Fonte: (Autora).

Outra análise realizada com os resultados obtidos no ensaio de fadiga tração-compressão foi utilizando a Equação 7 desenvolvida por Nascimento (2016). As curvas de Wöhler são um bom parâmetro para analisar os dados e é um método mais difundido na literatura para comparar misturas, no entanto a equação proposta por Nascimento (2016) abrange mais parâmetros obtidos nos resultados dos ensaios e, dessa forma, o  $N_f$  encontrado é considerado mais próximo da realidade do ensaio. Os dados de entrada para o conjunto de Equações de 7 a 11 são retirados dos resultados dos ensaios refinados pela rotina do MATLAB. No entanto, não são utilizados apenas os valores de C e S, mas todas as variáveis descritas após as equações.

$$N_f = \left( \frac{\delta}{Y \left( \frac{C_{12}}{p} \right) + 1} \right)^{\frac{1}{\Delta + 1 - \left( \frac{C_{12}}{p} \right)}} \quad (7)$$

Onde:

$$\delta = \frac{1}{2} (\epsilon^R_{TA})^2 C_{11} \left( \frac{(p(C_{11} C_{12})^\alpha (\epsilon^R_{TA})^{2\alpha})}{f_R^{2\alpha}} \right)^{\left( \frac{C_{12}}{p} \right)} \quad (8)$$

$$\epsilon^R_{TA} = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} \left( (\epsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE} \right) \quad (9)$$

$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1 \quad (10)$$

$$Gr = Y(Nf)^\Delta \quad (11)$$

Todas as variáveis são encontradas nos resultados dos ensaios após as rotinas de cálculo realizadas no MATLAB:

$\varepsilon_{TA}^R$  é a amplitude da pseudo-deformação;

$\alpha$  é a taxa de evolução do dano;

C11 e C12 são os coeficientes da curva CxS média das amostras;

$f_R$  é a frequência reduzida;

Gr é a taxa de variação média da energia de pseudo deformação liberada (por ciclo) durante todo o ensaio;

Nf é o número de ciclos até a falha;

Y são os coeficientes do critério de ruptura da curva Gr versus Nf;

$\Delta$  é o expoente da equação Y;

C(S) é a integridade do material ou a pseudo rigidez;

S é o parâmetro de dano;

$\varepsilon_{0,pp}$  é a amplitude de deformação pico a pico;

$\beta$  é a parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração (o valor usual é -0,08 e na prática significa que ocorre compressão em 8% do ciclo);

$|E^*|_{LVE}$  é o módulo dinâmico viscoelástico linear nas condições de temperatura e frequência do ensaio.

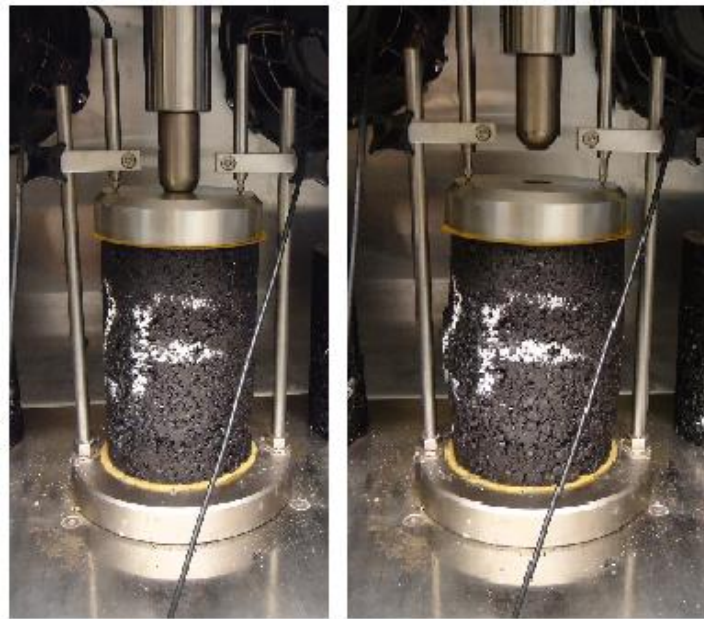
Após a rotina de cálculo de Nf pelas equações de Nascimento (2016), têm-se os valores de Nf para cada mistura. Com esses valores foi possível montar uma curva de Nf versus as deformações encontradas no AEMC para ranquear as misturas quanto a fadiga.

### 3.3.6 Flow Number

O ensaio *Flow Number* (FN) é realizado para avaliar a resistência das misturas asfálticas a deformações permanentes e foi executado na *Universal Test Machine* (UTM) 25 da IPC Global, disponível no LMCC/UFSM.

Este ensaio é normatizado no Brasil, pela Norma ABNT NBR 16505:2016. Nesta pesquisa, além de respeitar o GC de  $97\% \pm 0,5\%$  foi observado o volume de vazios dos CPs, que ficou entre 6% e 8%. Foram ensaiados três CPs por mistura, com as dimensões: altura de  $150 \pm 2,5\text{mm}$  e diâmetro  $102 \pm 2\text{mm}$ . A Figura 31 mostra o aparato para realização do ensaio e o posicionamento do CP, bem como a ruptura.

Figura 31 - Realização do ensaio *Flow Number* na prensa UTM-25 do LMCC



Fonte: (Autora).

O ensaio consiste na aplicação de pulsos de carga cíclica na direção axial de amostras cilíndricas, aplicados a uma frequência de 1 Hz, na qual existe um carregamento de 0,1 s e repouso de 0,9 s. Trata-se de um teste de desempenho simples de misturas de concreto asfáltico para deformação permanente, baseado em cargas repetidas. É o número de repetições de ciclos de carga em que a deformação de cisalhamento é iniciada, a volume constante. Ou ainda, o ponto onde a deformação permanente acumulada na mistura passa a aumentar rapidamente, indicando o colapso da mesma.

A relação do ensaio de FN com a deformação permanente está ligada ao fato de que quanto maior o número de ciclos e menor a deformação acumulada, menor é a propensão do pavimento à formação de trilhos de roda.

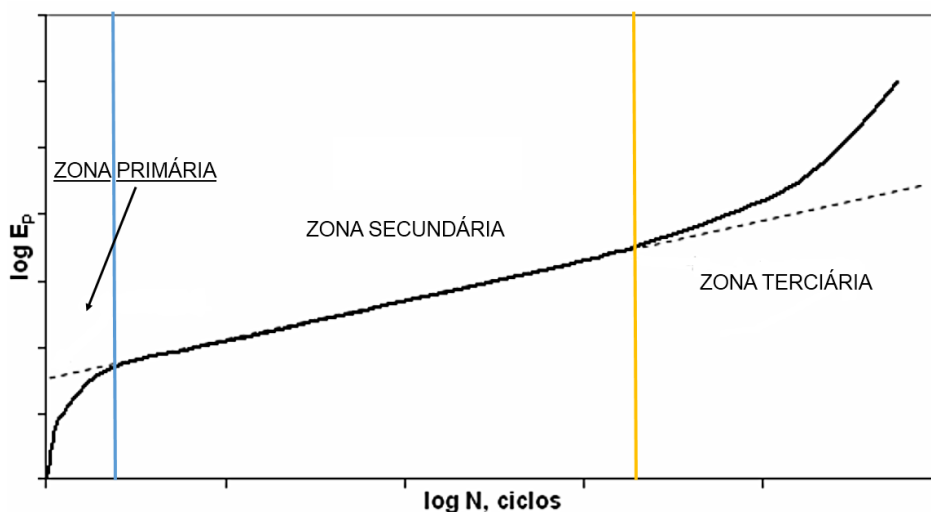
O ensaio encerra quando um dos casos ocorre: O *Flow Number* é atingido, ou seja, quando o número de ciclos em que a deformação de cisalhamento inicia sob

volume constante. Este é o ponto em que a deformação permanente acumulada no corpo de prova aumenta rapidamente; ou quando o número de ciclos chegar a 7500.

O resultado do ensaio é uma curva de deformação plástica vertical uniaxial em um plano de deformação permanente acumulada por número de ciclos aplicados. Nesta curva a deformação permanente acumulada pode ser dividida em três regiões distintas conforme Figura 32. Sendo elas: a zona primária, a zona secundária, e a zona terciária. Na zona primária acontece a consolidação da amostra e a queda da taxa de deformação plástica, nesta fase há grande variação do volume do corpo de prova. Ao adentrar a zona secundária a taxa de deformação é quase constante, com pequena variação no volume da amostra. Por fim, a zona terciária, que se caracteriza pela ocorrência de cisalhamento a volume constante do material onde a taxa de deformação plástica aumenta consideravelmente.

O *Flow Number* é identificado na passagem da região secundária para a terciária (linha amarela da Figura 32), onde a deformação ocorre a volume constante e a taxa de deformação volta a crescer, pois nesta região, a amostra não apresenta tanta resistência ao carregamento. O ensaio *Flow Number* apresenta parâmetros importantes no que diz respeito ao estudo de deformações permanentes. Entre eles estão o valor de deformação obtido ao se prolongar uma reta tangente a curva referente a zona secundária para a zona primária, também conhecido como intercepto, e a inclinação da curva na zona secundária.

Figura 32 - Curva de deformação permanente acumulada para o ensaio uniaxial de cargas repetidas





Para que uma determinada mistura asfáltica não apresente deformação permanente no campo, espera-se que os valores limites definidos (critérios de FN) para alguns volumes de tráfego sejam respeitados.

Na Tabela 21 constam os critérios de FN para misturas asfálticas para diferentes níveis de tráfego estabelecidos por vários autores. Nascimento (2008) estipulou valores limites para tráfego médio e pesado, através da pesquisa com diferentes TMN de agregado e CAP 20 REVAP. O autor recomendou critérios de FN concomitantemente com critérios de CDI e TDI de misturas asfálticas densas utilizadas como camada de revestimento em rodovias brasileiras. Em NCHRP, *Report 673 (Advanced Asphalt Technologies (AAT), 2011)*, critérios de FN foram desenvolvidos com base na avaliação de 06 pistas da FHWA e de 27 misturas em laboratório. Esses critérios foram incluídos no manual de misturas asfálticas a quente, desenvolvido no referido projeto. Bonaquist (2012) julgou esses critérios conservadores, considerando o desempenho dessas misturas em campo. Por isso o autor optou por utilizar o modelo de Francken ao propor critérios de FN para misturas utilizadas em cruzamentos viários que são submetidos a baixas velocidades e, conseqüentemente, mais suscetíveis à deformação permanente. Bastos (2016) formulou quatro critérios de FN em função das solicitações de tráfego utilizando dados de pistas experimentais brasileiras. Observa-se que o valor determinado por Nascimento (2008) para tráfego médio é o mesmo encontrado por Bastos (2017) para tráfego pesado. Observa-se que apenas os autores Nascimento (2008) e Bastos (2017) consideram as mesmas condições (204kPa de tensão) deste trabalho para definir os limites, enquanto Bonaquist (2012) e AAT (2011) utilizam outros níveis de tensão para classificar o tráfego quanto à deformação permanente.

Tabela 21 - Critérios de FN para diferentes níveis de tráfego para os autores

Pesquisas / Níveis de Tráfego (número N)	VV (%)	Temp. (°C)	Tensão (kPa)	Leve	Médio	Pesado	Extremamente pesado
				$3 \times 10^6$	$[3 \times 10^6;$ $1 \times 10^7]$	$[1 \times 10^7;$ $3 \times 10^7]$	$> 3 \times 10^7$
Nascimento (2008)	6,5 a 7,5	60,0	204	-	300	750	-
AAT (2011)	4,7 a 8,2	31,3 a 54,3	600	-	53	190	740
Bonaquist (2012)	6,0 a 7,3	49,6	600	15	50	135	415
Bastos et al. (2017)	5,5 a 7,5	60,0	204	<100	100	300	>1000

Fonte: (Adaptado de Bastos, 2017).

## 4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste Capítulo estão apresentados os resultados obtidos após a realização dos ensaios descritos no Capítulo 3 bem como sua discussão no intuito de cumprir os objetivos estabelecidos.

### 4.1 DOSAGEM DAS MISTURAS

Para este trabalho a dosagem das misturas asfálticas foi especialmente importante, tendo em vista que a única variação controlada entre as misturas é o tipo de CAP e seu teor.

Como a definição do teor foi realizada por tentativas, tendo como objetivo atingir o volume de vazios (VV) de 4%, foi feito o ensaio Rice para determinar a densidade máxima medida (Gmm) e os resultados para cada teor testado estão na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados de densidade máxima medida e volume de vazios para as misturas do procedimento de dosagem

Mistura	Teor de ligante (%)	Gmm (g/cm <sup>3</sup> )	VV (%)
CAP 30/45 REGAP	5,00	2,38	5,93
	5,50	2,36	3,96
	6,00	2,35	3,56
CAP 50/70 LUBNOR	5,00	2,39	6,51
	5,50	2,37	3,72
	6,00	2,36	3,29
CAP 50/70 REFAP	5,50	2,37	4,50
	6,00	2,36	3,30
	6,50	2,35	2,00
CAP 50/70 REGAP	5,50	2,37	4,23
	6,00	2,35	2,36
	6,50	2,31	1,05
CAP 50/70 REPAR	5,10	2,39	5,63
	5,60	2,37	4,46
	6,10	2,36	3,38
CAP 50/70 REVAP	5,00	2,40	5,93
	5,50	2,37	4,48
	6,00	2,36	2,96

Fonte: (Autora).

Ainda, foram considerados os limites dos valores de Vazios do Agregado Mineral (VAM) e da Relação Betume Vazios (RBV) conforme a Tabela 17 apresentada na Metodologia. Observa-se que o valor do limite superior do RBV é 75, no entanto para todas as misturas estudadas este valor ficou próximo de 77, valor aceito por ser

muito próximo ao limite do Superpave e pela mistura ser exequível em campo. Ainda, observa-se que os valores de VAM são maiores que o limite inferior de 13% em todas as misturas.

Os resultados de teor de ligante foram fixados para o VV de 4% (teor de ligante de projeto) em todas as misturas e constam na Tabela 23, bem como os valores calculados de teor de ligante absorvido e efetivo, VAM, RBV, MEA e FAD para estes teores.

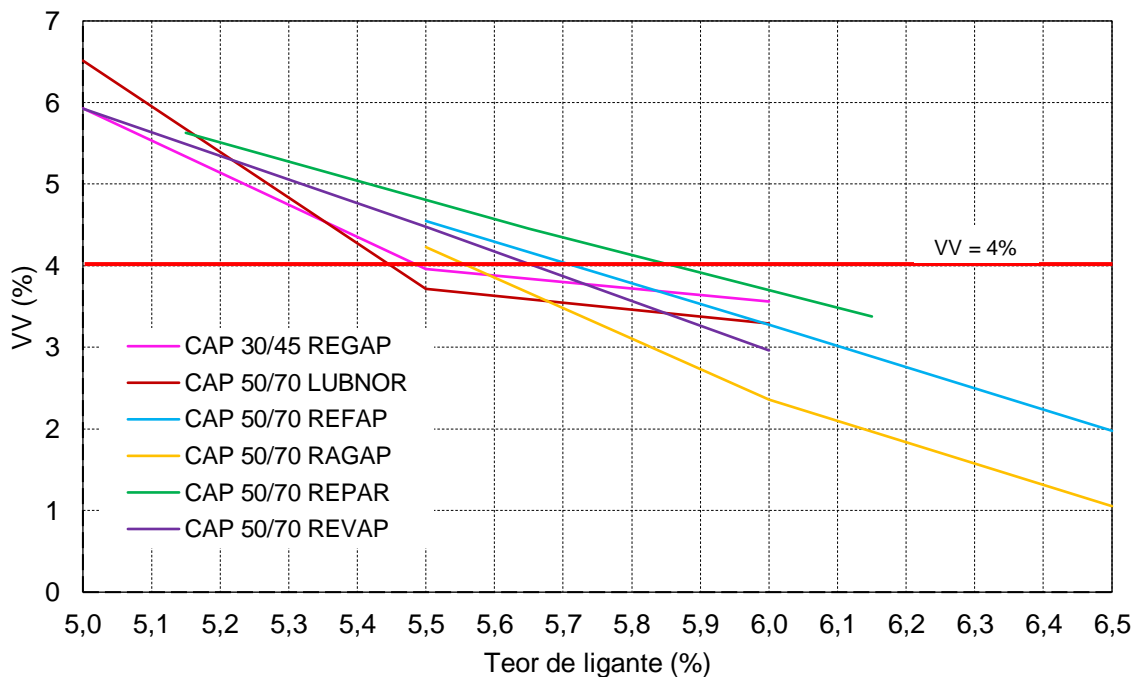
Tabela 23 - Resultado do teor de ligante de projeto, VAM, RBV, MEA e FAD

Mistura	Teor de ligante de projeto (%)	Teor de ligante absorvido (%)	Teor de ligante efetivo (%)	VAM (%)	RBV (%)	MEA (g/cm <sup>3</sup> )	FAD (%)
30/45 REGAP	5,47	0,41	5,45	17,63	77,24	2,27	36,2
50/70 LUBNOR	5,42	0,41	5,40	17,75	77,59	2,28	36,1
50/70 REFAP	5,72	0,41	5,70	17,64	77,36	2,27	36,3
50/70 REGAP	5,55	0,41	5,53	17,62	77,32	2,27	36,2
50/70 REPAR	5,85	0,41	5,83	17,75	77,67	2,27	36,4
50/70 REVAP	5,66	0,41	5,64	17,73	77,47	2,27	36,3

Fonte: (Autora).

A Figura 33 mostra a superposição das curvas de VV das misturas pelo teor de ligante, ressaltando o valor fixado de VV de 4% no eixo das ordenadas.

Figura 33 - Volume de vazios versus teor de ligante das misturas dosadas



Fonte: (Autora).

Todos os teores de projeto ficaram próximos de 5,60%. Não se esperava grande discrepância destes valores pois a metodologia de moldagem e a composição granulométrica dos agregados foi exatamente a mesma para todas as misturas, variando apenas as temperaturas de usinagem e compactação conforme as viscosidades dos CAPs. A variação de 0,30% do valor absoluto no teor de ligante entre as misturas com teor mais baixo e alto é considerada muito pequena, dentro da margem de erro da faixa de tolerância de produção.

#### 4.2 MÓDULO DE RESILIÊNCIA

Os resultados dos ensaios de MR para cada mistura estudada estão apresentados na Tabela 24, bem como os volumes de vazios, MR médio e para cada mistura e posição de ensaio, coeficiente de variação e desvio padrão.

Tabela 24 - Resultados de MR para cada amostra, média por posição de ensaio, desvio padrão, coeficiente de variação e resultado de MR médio por mistura

MISTURA	AMOSTRA	VV (%)	0°			90°			MR MÉDIO (MPa)
			MR	SD	CV%	MR	SD	CV%	
30/45	13	4,00	12262	762,3	6,2	10720	481,6	4,5	11241
	14	3,80	10949	468,0	4,3	11665	467,4	4,0	
	15	3,73	11699	795,5	6,8	10148	665,3	6,6	
	MÉDIA	3,84	11637	675,3	5,8	10844	538,1	5,0	
LUBNOR	4	3,85	8798	623,6	7,1	8841	522,3	5,9	8628
	5	3,66	9392	813,3	8,7	7746	757,3	9,8	
	6	3,59	8547	430,5	5,0	8443	572,9	6,8	
	MÉDIA	3,70	8912	622,4	6,9	8343	617,5	7,5	
REFAP	4	3,74	8326	244,4	2,9	6737	345,6	5,1	7352
	5	3,16	7593	200,6	2,6	7551	268,9	3,6	
	6	3,58	6264	302,5	4,8	7581	234,5	3,1	
	7	3,57	7092	285,8	4,0	7674	456,9	6,0	
MÉDIA	3,51	7319	258,3	3,6	7385	326,5	4,4		
REGAP	1	3,76	7850	344,5	4,4	9054	384,2	4,2	8382
	2	3,65	7415	491,1	6,6	6682	174,9	2,6	
	3	3,07	8615	223,0	2,6	10677	553,0	5,2	
	MÉDIA	3,49	7960	352,9	4,5	8804	370,7	4,0	
REPAR	1	3,78	7664	583,8	7,6	6969	463,9	6,7	7173
	2	3,86	7756	525,5	6,8	7633	366,6	4,8	
	3	3,82	6609	500,2	7,6	6404	357,2	5,6	
	MÉDIA	3,82	7343	536,5	7,3	7002	395,9	5,7	
REVAP	12	4,09	7518	417,8	5,6	8738	957,3	11,0	8133
	13	3,62	7011	307,8	4,4	8960	913,6	10,2	
	14	3,99	7850	442,8	5,6	8720	490,3	5,6	
	MÉDIA	3,90	7460	389,5	5,2	8806	787,1	8,9	

Fonte: (Autora).

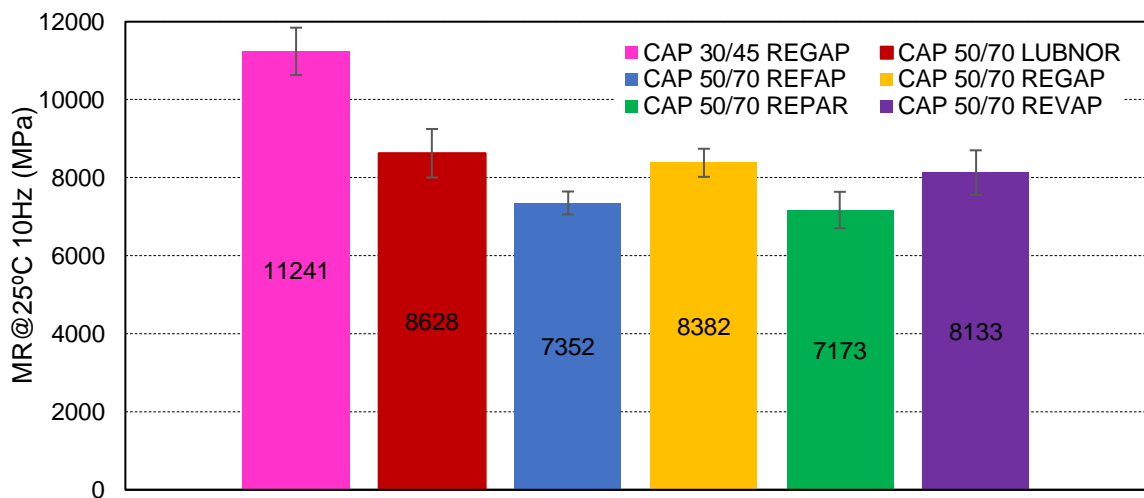
Bernucci et al. (2010) mostram que valores típicos de MR a 25°C para misturas asfálticas estão entre 2000MPa e 8000MPa. A Figura 34 mostra os resultados para

as misturas desta pesquisa, todas se encontram próximas aos valores típicos, exceto a mistura 30/45 pois o CAP é mais rígido (menor penetração).

Destacam-se três patamares de MR: O da mistura 30/45 com valor acima de 11000MPa, o das misturas LUBNOR, REGAP e REVAP no patamar dos 8000MPa e as misturas REFAP e REPAR com valores próximos a 7000MPa. O MR da mistura 30/45 é notavelmente maior que o das misturas com CAP 50/70. Os valores de MR de todas as misturas de CAP 50/70 são próximos, observa-se no gráfico que os CV fazem com que os resultados de algumas misturas se sobreponham.

Os resultados deste ensaio servem como parâmetro de comparação com outras misturas, pois é o ensaio preconizado no novo método de dimensionamento brasileiro. Neste ensaio a mistura é entendida como elástica, o que é uma simplificação da realidade.

Figura 34 - Resultados de MR para as misturas desta pesquisa



Fonte: (Autora).

Boeira (2014) utilizou o CAP 50/70 da REFAP em suas misturas, e encontrou um valor médio de MR a 25°C e 10Hz igual 5345MPa para misturas com diversos agregados do RS. A mistura de referência de Schuster (2016) era com CAP 50/70 da REFAP, e agregados de Santo Antônio da Patrulha/RS da pedra da Concepa e encontrou valor médio de MR igual a 5975MPa. Bohn (2017) encontrou o valor de 5685MPa para sua mistura de referência que era formada pelos mesmos agregados e CAP que Schuster (2016), que são considerados agregados mais frágeis. Centofante (2016) também encontrou valores próximos a 5000MPa para sua mistura

formada pelos agregados da mesma pedreira desta pesquisa e CAP 50/70 da REFAP, sem adição de cal. Os valores obtidos nesta pesquisa são mais altos e se distanciam dos outros autores pois os agregados minerais têm outra origem e sua configuração granulométrica é diferente, ainda, nesta pesquisa foi utilizada a cal que pode ser responsável pelo maior enrijecimento das misturas estudadas.

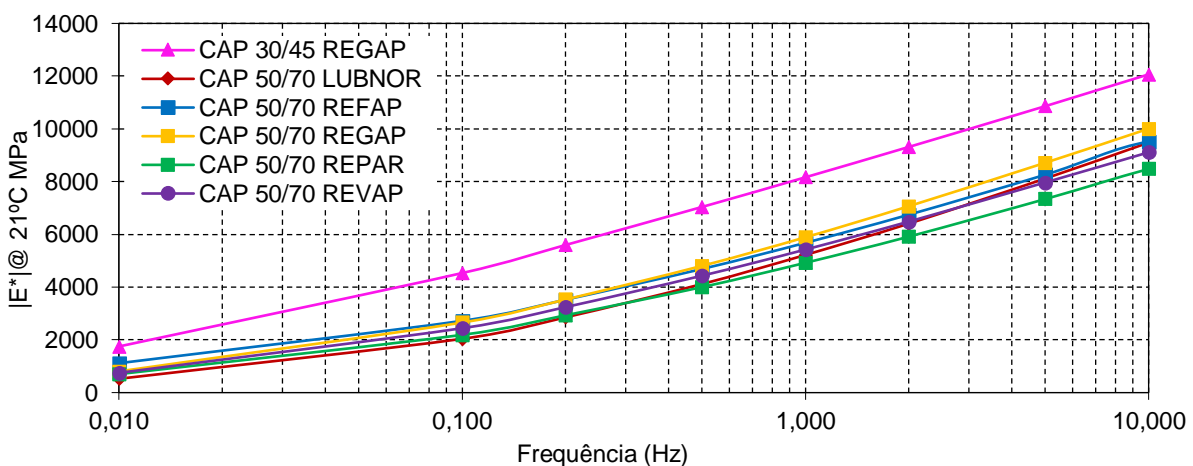
Salienta-se que melhor comportamento resiliente não significa melhor comportamento em relação ao dano. Para tal, serão analisados resultados de ensaios de *Flow Number* e Fadiga tração-compressão uniaxial.

### 4.3 MÓDULO COMPLEXO

A apresentação e análise dos resultados obtidos no ensaio de Módulo Complexo segue o protocolo de Di Benedetto & Corté (2004). Serão apresentadas primeiramente, as isotermas, seguidas das isócronas, espaços Cole Cole, Diagramas de Black, curvas mestras de Módulo Dinâmico ( $|E^*|$ ) e Ângulo de Fase ( $\varphi$ ), e finalmente as inferências à deformação permanente e à fadiga. Para gerar os gráficos das misturas foi calculada a média dos resultados dos dois corpos de prova de cada mistura. Os dados experimentais de cada corpo de prova constam no Apêndice A.

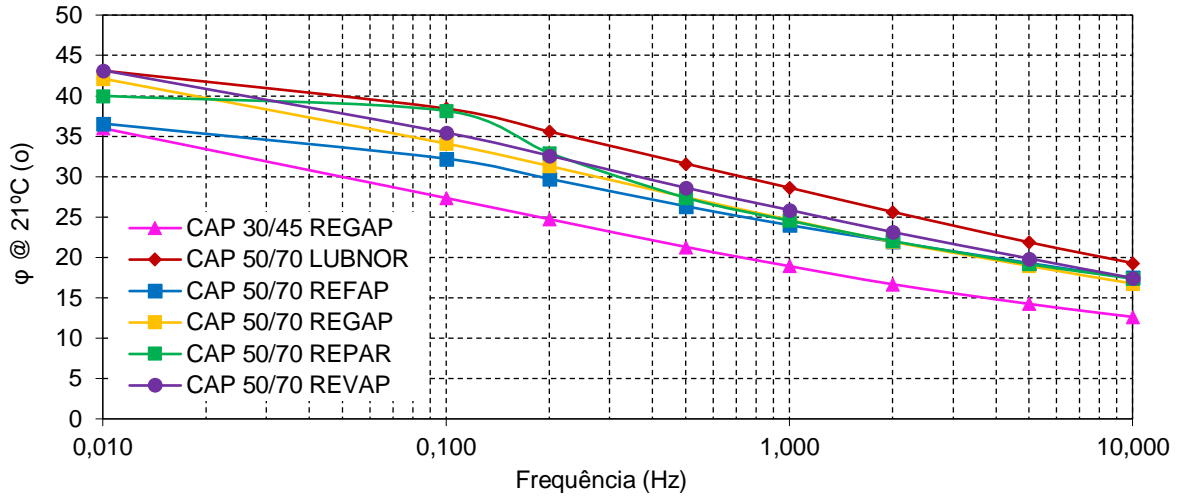
As Figuras 35 e 36 apresentam as Isotermas de  $|E^*|$  a 21°C e as Isotermas de  $\varphi$  a 21°C. A temperatura de 21°C foi escolhida pois é a intermediária entre as temperaturas estudadas e fica mais próxima de 25°C, temperatura padrão dos ensaios brasileiros.

Figura 35 - Isoterma de Módulo dinâmico a 21°C



Fonte: (Autora).

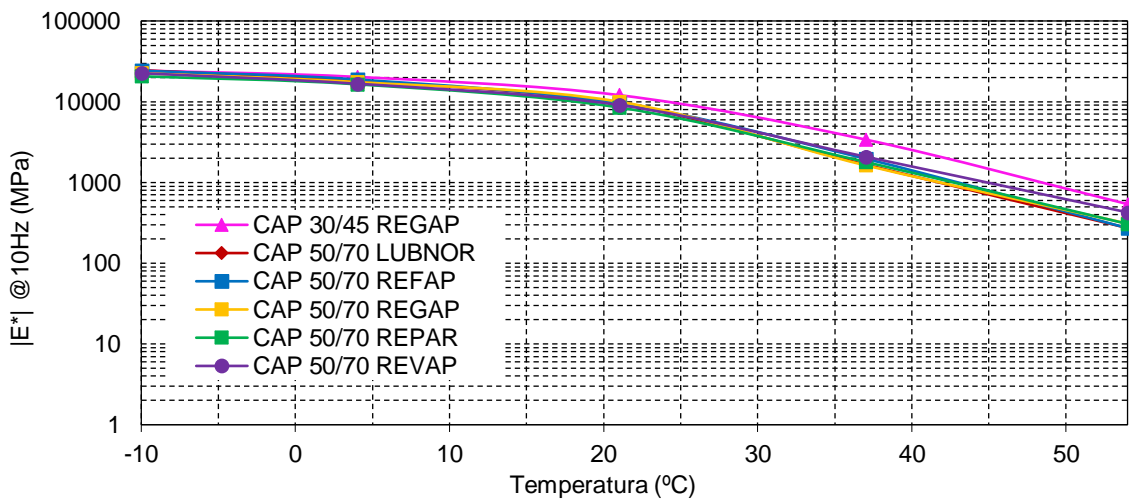
Figura 36 - Isoterma de ângulo de fase a 21°C



Fonte: (Autora).

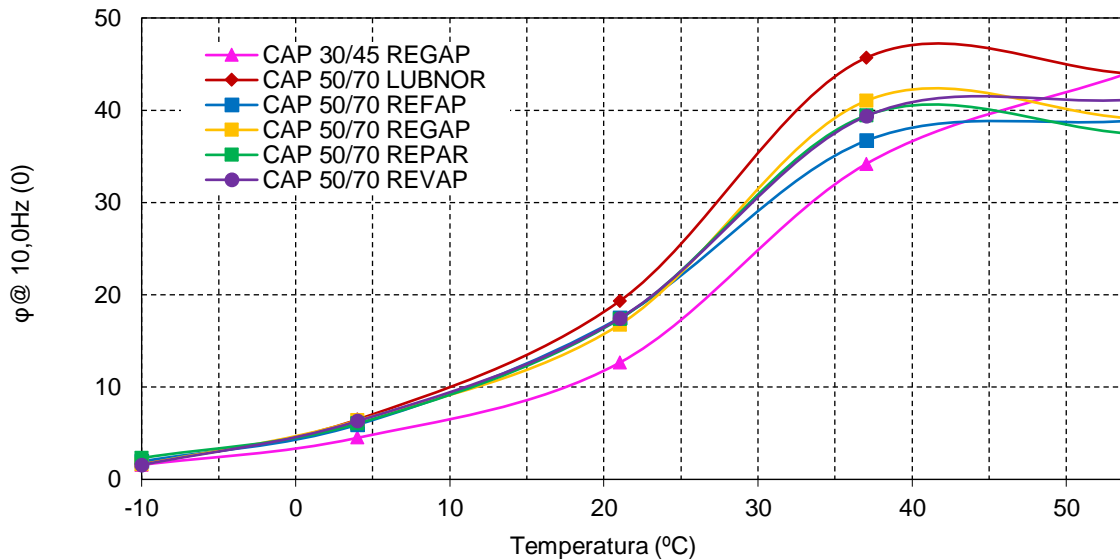
As Figuras 37 e 38 apresentam as Isócronas de Módulo Dinâmico e de Ângulo de Fase para a frequência de 10Hz. As isócronas e isotermas escolhidas são apenas uma demonstração desta etapa da metodologia 2S2P1D, cujos resultados completos serão analisados e discutidos posteriormente nos gráficos de curvas mestras, onde é possível verificar com mais clareza o comportamento das misturas. No entanto já é possível perceber na Figura 37 que as misturas de 50/70 se sobrepõem enquanto a mistura 30/45 tem módulo dinâmico maior para todas as temperaturas ensaiadas.

Figura 37 - Isócronas de módulo dinâmico a 10Hz



Fonte: (Autora).

Figura 38 - Isócronas de ângulo de fase a 10 Hz



Fonte: (Autora).

As médias dos dados experimentais obtidos foram submetidas ao modelo reológico 2S2P1D para a construção do espaço Cole Cole, Diagrama de Black e das curvas mestras de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase das misturas. Os sete parâmetros do modelo e as constantes C1 e C2, de WLF (William, Landel e Ferry), para cada uma das seis misturas pesquisadas, constam na Tabela 25.

Tabela 25 - Parâmetros 2S2P1D, C1 e C2 obtidos com a modelagem matemática

Mistura	E*							WLF	
	E <sub>00</sub> (MPa)	E <sub>0</sub> (MPa)	k	h	δ	t <sub>E</sub> (s)	β	C1	C2 (°C)
CAP 30/45 REGAP	4,50E+01	2,71E+04	0,185	0,560	1,80	0,228	2000	30,495	203,598
CAP 50/70 LUBNOR	4,70E+01	2,55E+04	0,260	0,600	2,50	0,102	2000	19,910	149,005
CAP 50/70 REFAP	5,50E+01	2,65E+04	0,250	0,550	3,20	0,276	2000	21,066	148,793
CAP 50/70 REGAP	4,00E+01	2,61E+04	0,195	0,550	1,70	0,066	2000	30,855	203,526
CAP 50/70 REPAR	5,50E+01	2,30E+04	0,190	0,480	1,40	0,030	200	26,190	177,290
CAP 50/70 REVAP	5,50E+01	2,60E+04	0,185	0,540	1,75	0,040	20000	21,270	173,530

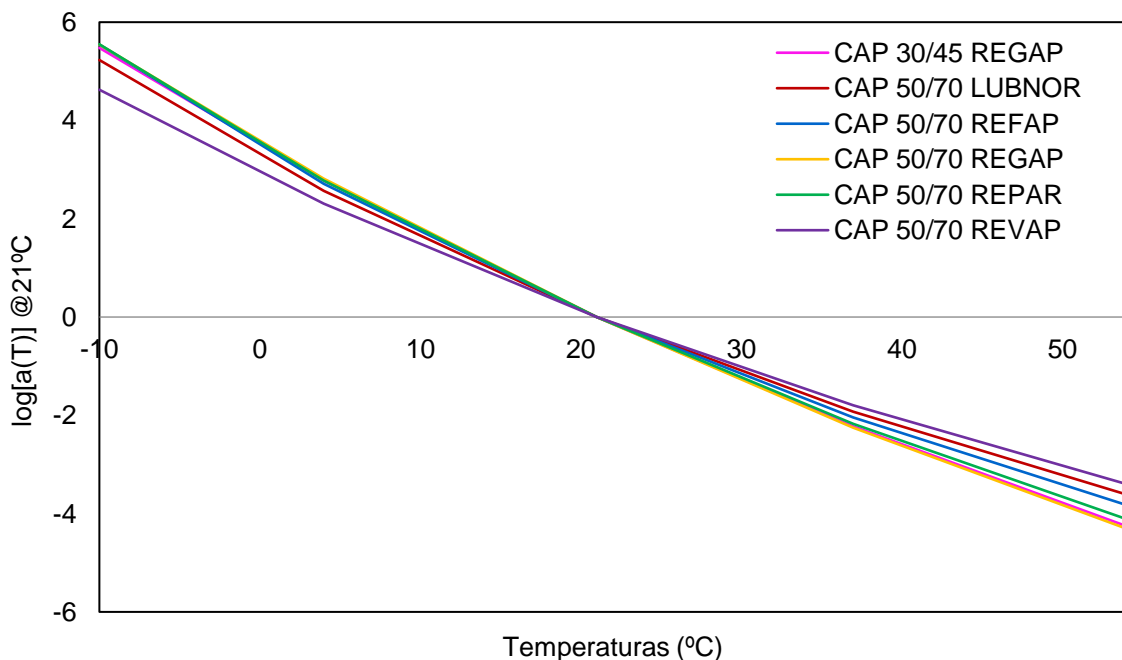
Fonte: (Autora).

As propriedades reológicas das misturas asfálticas são normalmente apresentadas em curvas mestras de módulo complexo e ângulos de fase. Ainda, a determinação de fatores de desvio ou deslocamento (*shift factors*) são associados com a mudança de temperatura dos parâmetros reológicos (Yusoff et al., 2011). A dependência da temperatura no comportamento viscoelástico das misturas é indicada pelo fator de deslocamento e expressa por a(T), em escala logarítmica.



A Figura 39 apresenta o comparativo das curvas  $\log [a(T)]$  para as seis misturas estudadas. A inclinação das curvas permite inferir a respeito da suscetibilidade térmica das misturas, ou seja, quanto menos inclinada a curva, a mistura tende a ter maior estabilidade e melhor é seu comportamento quanto à suscetibilidade térmica. É possível observar que a mistura REVAP é a mistura que apresenta ser menos suscetível à temperatura, pois a mesma mostra ter a linha de tendência menos inclinada. As misturas mais suscetíveis à temperatura, que apresentam uma maior inclinação para a vertical, são as misturas do CAP 30/45 e 50/70, ambos da REGAP.

Figura 39 - Comparação das linhas de tendência lineares das curvas  $\log [a(T)]$  para todas as misturas a 21°C

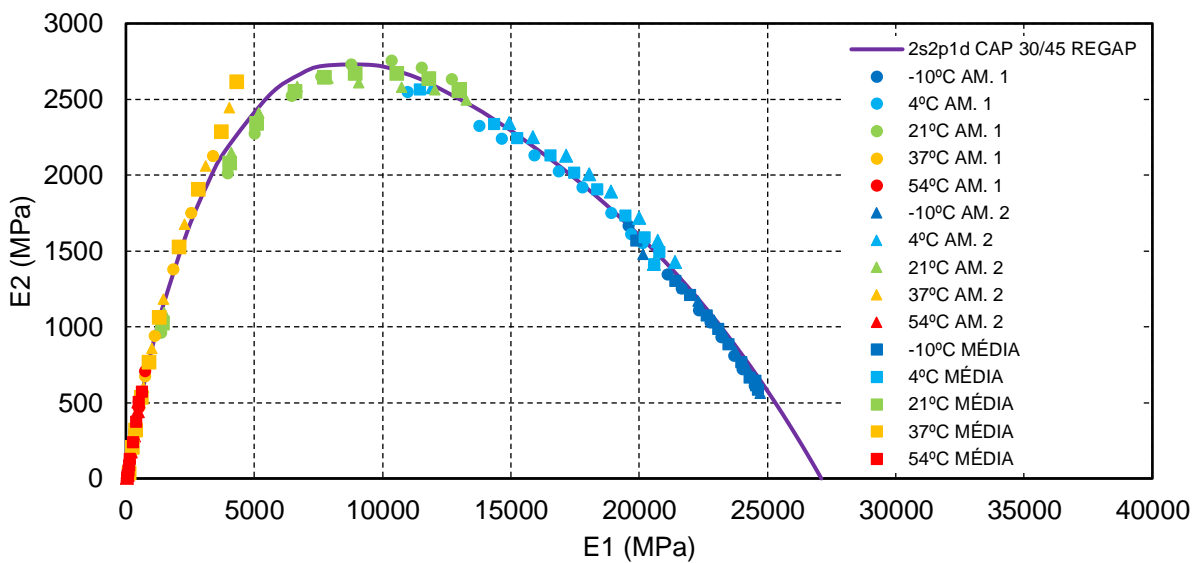


Fonte: (Autora).

O espaço Cole Cole apresenta a parte real (E1) no eixo das abscissas e a parte imaginária (E2) no eixo das ordenadas e é semelhante a um arco de círculo. Com E1 pode-se avaliar a parte recuperável da energia armazenada, e com E2 o comportamento viscoso irreversível do material devido a dissipação de energia. O Diagrama de Black permite analisar a relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase em diferentes temperaturas. As Figuras 40 e 41 apresentam o espaço Cole Cole e o Diagrama de Black para a mistura com o CAP 30/45 que foi escolhida apenas para exemplificar e mostrar os dados obtidos experimentalmente (amostras 1, 2 e média) com a modelagem 2S2P1D, para cada mistura estudada. Observa-se ainda, que o

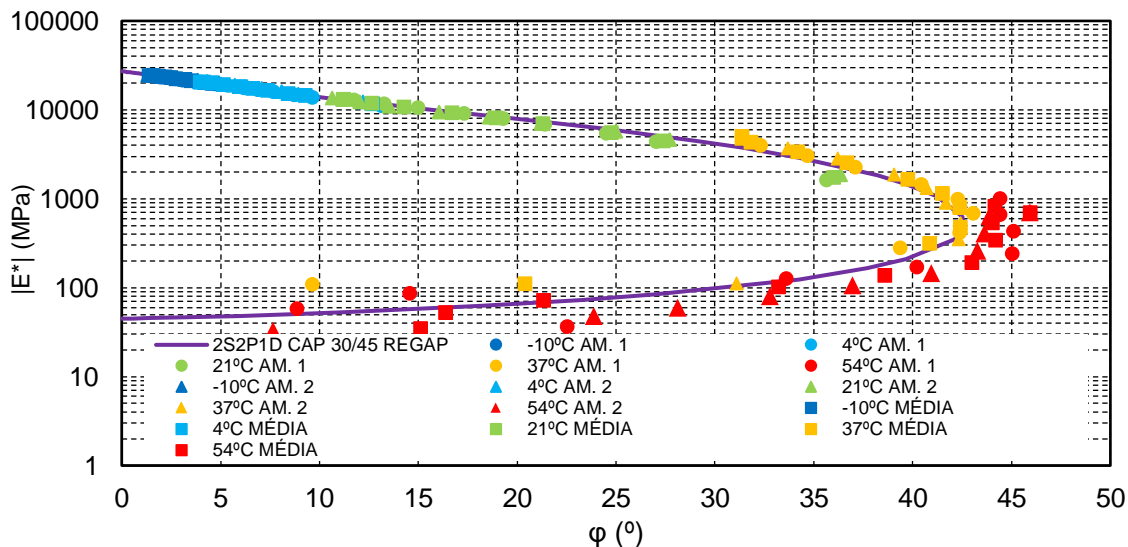
modelo não se ajusta completamente aos dados experimentais obtidos nas altas temperaturas (37 e 54°C) pois os LVDTs são muito sensíveis, e com o aquecimento da amostra os pinos que os seguram se movimentam gerando esta variação dos valores. A modelagem 2S2P1D de cada mistura foi realizada a partir da análise da média dos dados obtidos pelo ensaio de cada corpo de prova. Foi feito o ajuste dos parâmetros da Tabela 25 para cada mistura para obter a curva da modelagem.

Figura 40 - Espaço Cole Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura com CAP 30/45 da REGAP



Fonte: (Autora).

Figura 41 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a Mistura com CAP 30/45 da REGAP



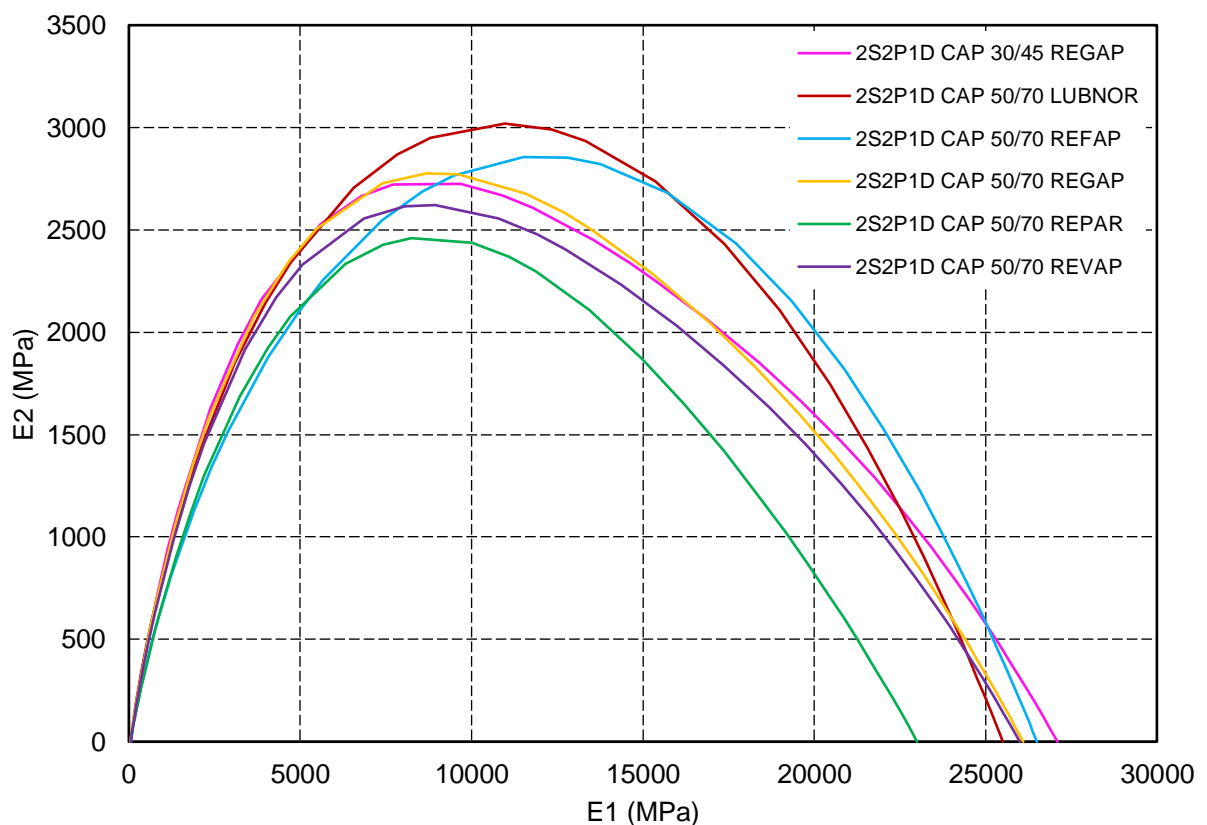
Fonte: (Autora).

Os resultados da modelagem 2S2P1D de todas as misturas estão graficamente dispostos no diagrama Cole-cole da Figura 42. Nota-se que a mistura LUBNOR teve os maiores valores de E2, o que indica que esta tem um comportamento viscoso maior quando comparada com as outras. Por outro lado, é possível afirmar que as misturas com CAP 50/70 da REPAR e da REVAP apresentam menor comportamento viscoso pois apresentam os menores valores de E2.

Analisando a parte real (E1), percebe-se que a mistura que apresenta o maior comportamento elástico é a 30/45, seguida da REFAP, enquanto a mistura com o menor comportamento elástico é a REPAR.

Já era esperado que a mistura com CAP 30/45 tivesse o maior comportamento viscoso tendo em vista que este CAP é considerado mais viscoso e consistente que os CAPs 50/70.

Figura 42 - Diagrama Cole-cole obtido pelo 2S2P1D das misturas estudadas

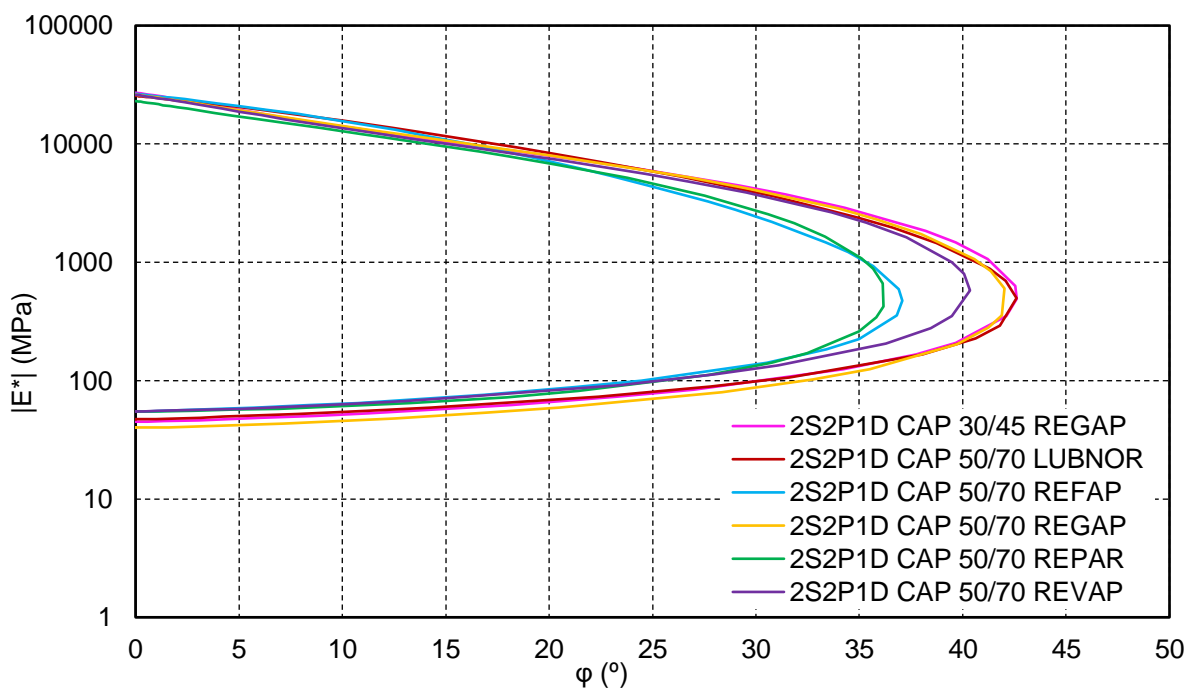


Fonte: (Autora).

O Diagrama de Black, cujas linhas resultam da modelagem 2S2P1D, para todas as misturas estão apresentados na Figura 43.

Ao analisar o Diagrama de Black, é possível verificar que a mistura REPAR possui o menor valor de ângulo de fase, o que permite inferir que a mistura possivelmente possui um maior comportamento elástico quando comparada às demais. Por outro lado, as misturas do 30/45 e LUBNOR apresentam o maior valor de ângulo de fase, ou seja, apresentam uma parcela viscosa mais importante quando comparada à parcela elástica, o que representa uma maior dissipação de energia ou maior perda por atrito interno. A partir disso, seria possível inferir que estas duas misturas apresentariam, em campo, maiores deformações plásticas quando comparadas às demais misturas.

Figura 43 - Diagrama de Black para todas as misturas obtido pelo 2S2P1D



Fonte: (Autora).

A partir dos resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase, considerando o comportamento termo reológico das misturas, foram construídas curvas mestras, através do princípio da superposição tempo-temperatura. As curvas mestras foram ajustadas pelo modelo reológico 2S2P1D e encontram-se nas Figuras 44, 45 e 46, onde a Figura 45 apresenta um destaque da Figura 44 para visualizar o  $|E^*|$  nas baixas frequências. A temperatura de referência é 20°C.

Em todas as misturas asfálticas estudadas verifica-se que o módulo dinâmico cresce com o aumento da frequência, o que ocorre devido a menor exposição à carga

quando aumentada a frequência, ou seja, não há tempo para ocorrerem as deformações viscoelásticas das misturas asfálticas. Nas altas frequências, praticamente só ocorrem deformações elásticas no material, fazendo com que os módulos atinjam seus maiores valores. Nas baixas frequências o tempo de carregamento é maior e desta forma é possível medir as deformações viscoelásticas do material, que costumam se manifestar em sua totalidade, acarretando menores valores de módulo dinâmico. Com a modelagem 2S2P1D, a avaliação do comportamento viscoelástico das misturas é válida apenas para a faixa de temperaturas de realização do ensaio (-10°C a 54°C).

As altas frequências estão associadas ao dano por trincamento térmico no revestimento asfáltico. As temperaturas muito baixas podem levar o revestimento asfáltico ao trincamento por retração e a um grande enrijecimento que pode acelerar o processo de fadiga do revestimento. Este fenômeno não é comum no Brasil, por ter temperaturas amenas ou altas. As baixas frequências podem ser relacionadas à ocorrência de deformação permanente na mistura asfáltica, enquanto as frequências intermediárias, ao dano por fadiga.

As misturas de CAP 30/45 e CAP 50/70 da REFAP apresentaram maiores valores de módulo nas baixas frequências, enquanto a mistura LUBNOR apresentou o menor valor nesta faixa de frequências. Nas frequências intermediárias e altas, as misturas de CAP 30/45 e CAP 50/70 da REFAP também apresentam os maiores valores de módulo. Ainda, destaca-se que a mistura de CAP 50/70 da REPAR, que tem o menor  $|E^*|$  nas médias e altas frequências também apresenta um dos menores valores de MR encontrado.

Já era esperado uma maior rigidez da mistura com CAP 30/45 tendo em vista que este CAP é considerado mais consistente.

O ângulo de fase está relacionado às propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos, sendo um parâmetro frequentemente utilizado para avaliar o efeito dos ligantes nas misturas.

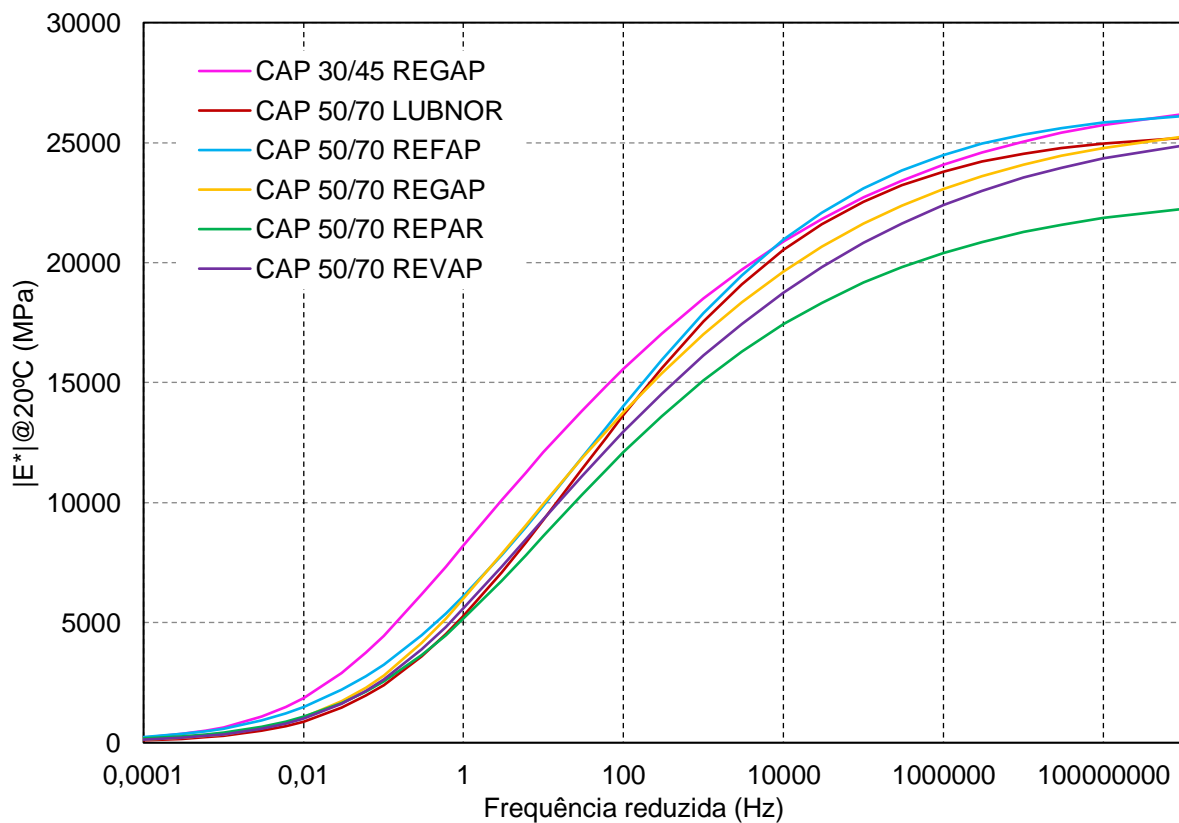
Ao analisar as curvas mestras de ângulo de fase da Figura 46, nota-se que as misturas se desordenam conforme a frequência muda. Para as baixas frequências a mistura 30/45 e a LUBNOR apresentam maior ângulo de fase, o que indica que estas tiveram uma maior defasagem entre o carregamento e a deformação, mostrando que têm comportamento mais viscoso quando comparadas as outras misturas. Para as

altas frequências a mistura 30/45 apresenta um valor baixo de ângulo de fase enquanto a diferença entre todas as misturas de 50/70 é muito pequena.

O pico de ângulo de fase da mistura com CAP 30/45 está em uma frequência menor do que os picos das misturas de CAP 50/70, indicando (pelo princípio da superposição de tempo e temperatura) que a mistura de CAP 30/45 é mais elástica em temperaturas maiores, o que possibilita inferir que esta tem melhor comportamento plástico.

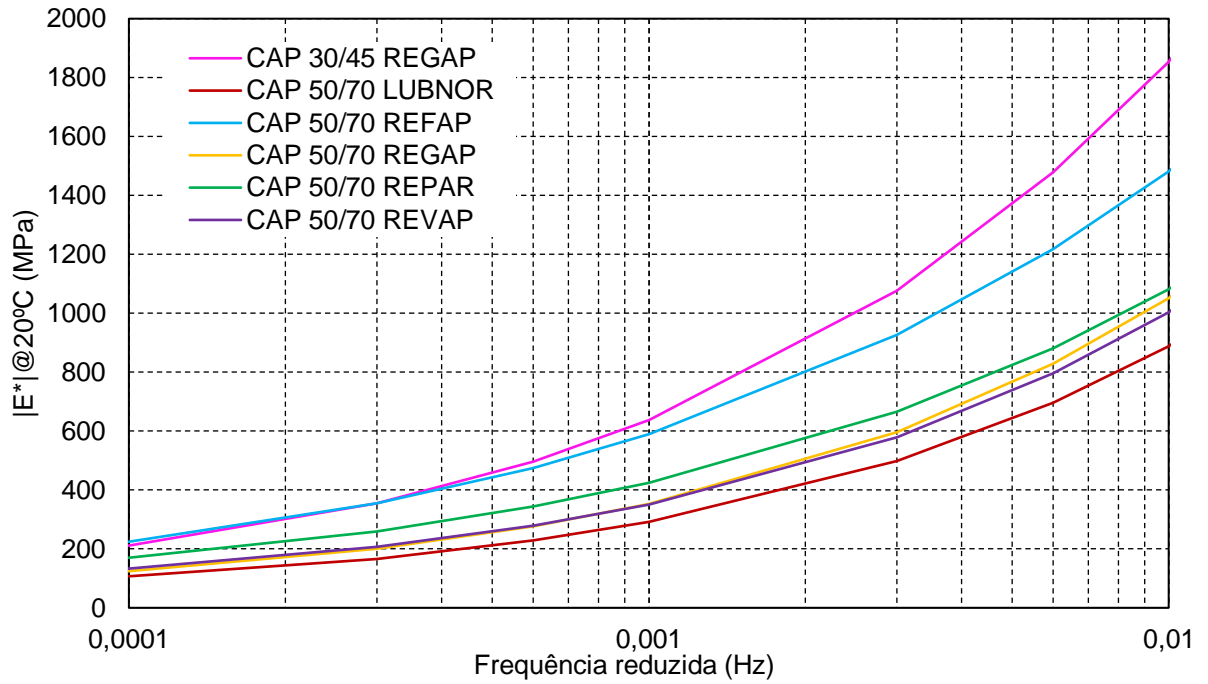
A construção de curvas mestras apresenta vantagem, pois estas possibilitam a previsão de valores de uma determinada propriedade reológica ao longo de uma gama de frequências e temperaturas mais ampla do que a utilizada experimentalmente.

Figura 44 - Curvas mestras de Módulo dinâmico para todas as misturas



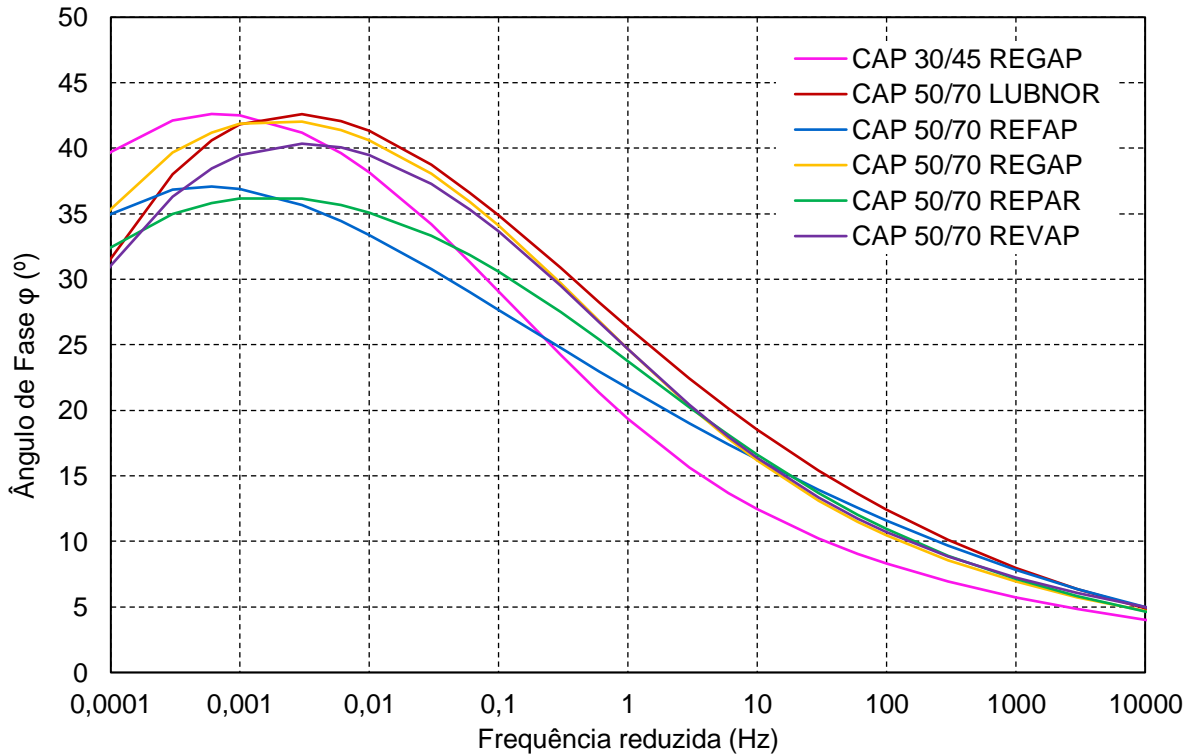
Fonte: (Autora).

Figura 45 - Curvas mestras de Módulo dinâmico para todas as misturas nas baixas frequências



Fonte: (Autora).

Figura 46 - Curvas mestras de Ângulo de fase para todas as misturas



Fonte: (Autora).

Os resultados obtidos nessa pesquisa, para as curvas mestras de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase foram comparados aos resultados de outros autores. Na Tabela 26 estão os valores dos parâmetros da modelagem 2S2P1D encontrados para as misturas de referência dos autores. As misturas desses autores foram escolhidas pois foram dosadas pelo método Superpave, a granulometria foi selecionada conforme a Faixa C do DNIT e são com CAP 50/70 da REFAP (de lotes diferentes). Ainda foram selecionadas as misturas de Bohn (2016) e Almeida Jr. (2016) com AMP 60/85 para comparar com as misturas que utilizaram CAP.

Bohn (2017) utilizou agregados de Santo Antônio da Patrulha/RS da pedra da Concepa, CAP 50/70 da REFAP e AMP 60/85 nos teores 5,09% e 4,82% respectivamente. Brondani (2016) utilizou os mesmos agregados e CAP 50/70 de Bohn (2017) e sua dosagem resultou teor de 4,85%. Almeida Jr. (2016) utilizou agregado de Sarandi/RS da Construbras e o teor de ligante pela dosagem Superpave para suas misturas de referência com CAP 50/70 e AMP 60/85 foram 4,00% e 4,12% respectivamente. Centofante (2016) utilizou agregados de mesma origem desta pesquisa (Pedreira da Della Pasqua em Itaara/RS), CAP 50/70 da REFAP com teor de 5,70% (valor próximo ao obtido nesta pesquisa). Bruxel (2015) utilizou agregados de Santo Antônio da Patrulha/RS da pedra TRS e CAP 50/70 da REFAP, o teor de projeto de 5,38% foi estabelecido pela metodologia Superpave.

Tabela 26 - Parâmetros 2S2P1D, C1 e C2 de outros autores utilizados para comparação

MISTURAS DE OUTROS AUTORES	E*							WLF	
	E <sub>00</sub> (MPa)	E <sub>0</sub> (MPa)	k	h	δ	t <sub>E</sub>	β	C1	C2 (°C)
Brondani 50/70 (2016)	48	35000	0,2	0,6	2,3	0,6	450	31,7	230,1
Almeida Jr. S BAI FX C 50/70 (2016)	140	36000	0,2	0,6	2,4	0,3	200	31,5	230,2
Centofante CAref 50/70 (2016)	100	25540	0,3	0,7	3,9	0,4	900	52,5	377,2
Bruxel 50/70 (2015)	75	24000	0,3	0,7	2,7	0,1	100	20,7	151,5
Bohn 50/70 (2017)	50	31500	0,2	0,6	2,2	0,4	200	31,8	230,1
Bohn 60/85 (2017)	85	33500	0,2	0,6	2,2	0,4	500	25,0	189,4
Almeida Jr. S BAI FX C 60/85 (2016)	130	40500	0,2	0,5	2,3	0,4	6000	25,0	168,2

Fonte: (Autora).

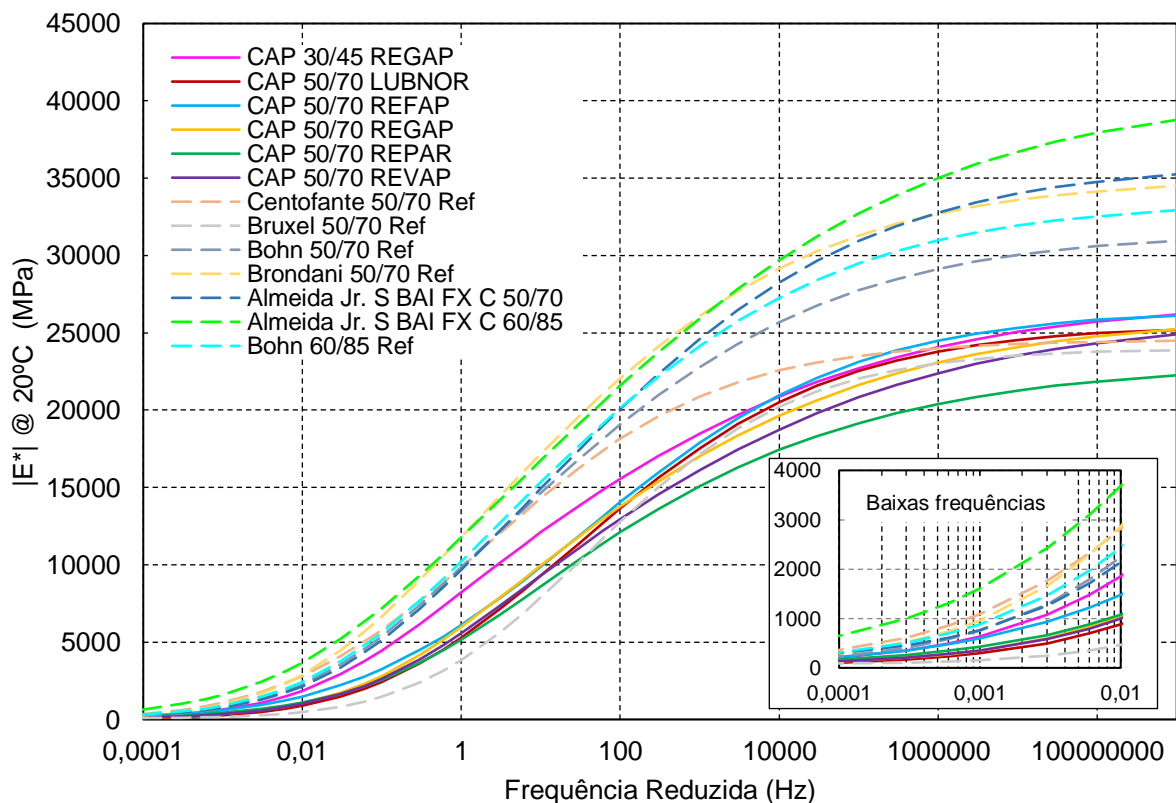
Na Figura 47, estão as curvas mestras de Módulo Dinâmico das seis misturas desta pesquisa mais a de Bohn (2017), a de Brondani (2016), de Almeida Jr. (2016), de Centofante (2016) e de Bruxel (2015), utilizando as misturas de referência dos autores em seus estudos, que foram feitos com 50/70 da REFAP coletados em épocas diferentes sem adição de material fresado ou outras variáveis além dos agregados e



granulometria. Além das misturas com 50/70 dos autores, ainda foram plotadas no gráfico duas misturas com AMP 60/85, para fazer a comparação dos CAPs com ligante modificado.

De maneira geral, o que se pode inferir a partir da observação da Figura 47, é o fato de que há um maior agrupamento das misturas desta pesquisa comparadas às misturas dos outros autores, sinalizando a influência do ponto de vista da rigidez ao variar a seleção granulométrica e ao tipo de ligante. Quanto ao CAP 50/70 utilizado observa-se não houve um distanciamento das curvas dos autores Centofante (2016) e Bruxel (2015) com as curvas desta pesquisa, enquanto as curvas dos autores Almeida Jr. (2016), Bohn (2016) e Brondani (2016) tiveram um distanciamento mais sensível (apresentaram os melhores resultados nas altas frequências), comparado inclusive ao distanciamento das curvas dos ligantes modificados.

Figura 47 - Curva mestra de módulo dinâmico comparativa com outros autores



Fonte: (Autora).

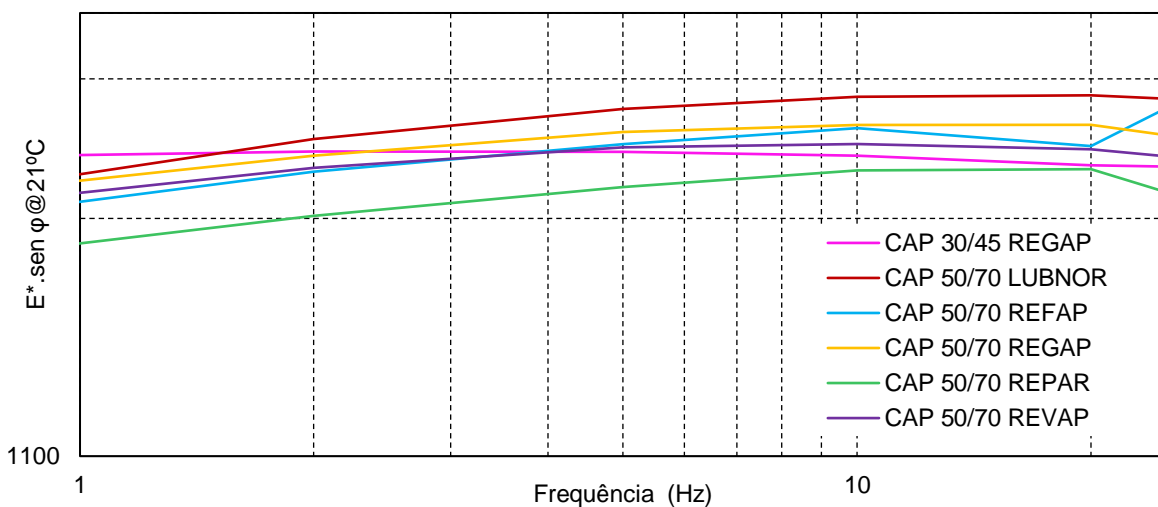
As duas misturas de Almeida Jr. (2016) apresentam resultados superiores as demais misturas citadas nas temperaturas baixas. A maior rigidez das misturas de Almeida Jr. (2016) pode ser atribuída ao agregado mineral e ao ligante asfáltico, pois

trabalhou com ligante convencional e modificado e obteve teores de projeto bem menores que os dessa pesquisa. Bruxel (2015), utilizou em sua pesquisa o CAP 50/70 da REFAP e agregados de mesma origem de Bohn (2016) e Brondani (2016), no entanto as rigidezes obtidas por aquela foram bem menores do que das outras autoras, tanto nas baixas como nas altas frequências, mas foram próximas aos valores obtidos nesta pesquisa, acredita-se que por ter teor de ligante mais próximo.

É possível utilizar os dados do Módulo Complexo para fazer uma inferência empírica de resistência à fadiga e à deformação permanente, através das relações  $E^* \cdot \text{sen } \phi$  e  $E^*/\text{sen } \phi$ , respectivamente. O objetivo destas análises no trabalho é fazer uma correlação dessas propriedades. Ainda, quando forem discutidos os resultados do ensaio de dano por fadiga, poderão ser confrontados os resultados das inferências com os resultados de dano das misturas.

A Figura 48 mostra, para a temperatura de 21°C, a análise de fadiga das misturas. Essa verificação é realizada nas altas frequências, entre 1 a 25 Hz. Quanto menor o valor  $E^* \cdot \text{sen } \phi$  melhor seria o comportamento da mistura frente à fadiga. Na frequência de 1Hz, nota-se sensivelmente que as misturas com CAP 50/70 apresentam valores mais baixos de  $E^* \cdot \text{sen } \phi$ , indicando que estas misturas são mais resistentes ao dano por fadiga. A mistura com CAP 50/70 da REPAR apresentaria o melhor comportamento enquanto a mistura com CAP 30/45 apresentaria o pior.

Figura 48 - Inferência empírica ao dano por fadiga a 21°C



Fonte: (Autora).

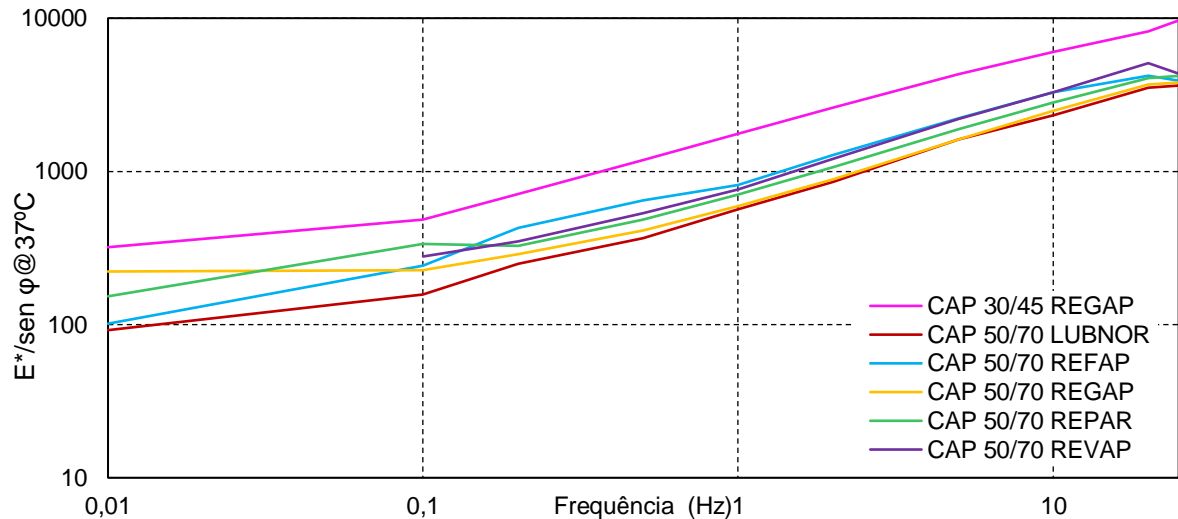
Essa análise reforça a importância do estudo de dano realizado nesta pesquisa, além do estudo sobre rigidez em diversas temperaturas e frequências de

carregamento, pois misturas com mesma rigidez podem apresentar resistência diferentes aos tipos de danos. Essa técnica é apenas uma inferência, podendo, ou não, ser considerada coerente apenas com a avaliação dos resultados do ensaio de fadiga.

A Figura 49 mostra a inferência à deformação permanente para a temperatura de 37°C, devido à dificuldade de leitura do ângulo de fase na temperatura de 54°C e pela dispersão dos dados obtidos em 54°C. A análise para este tipo de dano é nas baixas frequências, de 0,01 a 1Hz. Quanto maior o valor de  $E^*/\sin\phi$  melhor o comportamento à deformação permanente. Observa-se que a mistura que obteve o melhor comportamento à deformação permanente foi a 30/45, enquanto o pior comportamento observado na curva é da mistura LUBNOR.

Esta inferência também poderá ser verificada pois foi realizado ensaio de *Flow Number*, que avalia as misturas quanto a resistência ao afundamento em trilha de roda na camada de revestimento asfáltico.

Figura 49 - Inferência empírica à deformação permanente a 37°C



Fonte: (Autora).

A partir da frequência de 0,1Hz é perceptível a melhora do desempenho de todas as misturas, mas o ranking se mantém, ressaltando ainda mais a proeminência da mistura 30/45 frente à inferência de deformação permanente.

É importante frisar que essas correlações fogem da conceituação teórica da literatura, pois abrangem dois domínios de trabalho diferentes, o da viscoelasticidade linear e do dano.

#### 4.4 RESISTÊNCIA A TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

A Tabela 27 apresenta os resultados deste ensaio para as três misturas avaliadas, apresentados em forma da média entre os resultados para as amostras de cada mistura, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação. Nota-se que os resultados de RT de todas as misturas apresentam CV baixos.

Tabela 27 - Resultados do ensaio de RT e parâmetros de tenacidade, Energias, IT e IF para cada amostra bem como suas médias, DP e CV de cada mistura

MISTURA	CP	RT (MPa)	Tenacidade	EnergyPmax	Energytotal	IT	IF
CAP 30/45 REGAP	13	2,38	1,29	14,92	62,00	0,23	85,00
	14	2,39	1,52	17,41	76,35	0,30	75,87
	15	2,36	1,72	22,70	104,84	0,43	84,00
	MÉDIA	2,37	1,51	18,34	81,07	0,32	81,62
	DP	0,01	0,22	3,97	21,80	0,10	5,01
	CV	0,6%	14,4%	21,6%	26,9%	32,0%	6,1%
CAP 50/70 LUBNOR	4	1,47	1,38	21,18	61,79	0,22	51,10
	5	1,36	1,36	22,34	54,92	0,12	56,46
	6	1,53	1,39	21,69	58,58	0,17	58,58
	MÉDIA	1,45	1,38	21,74	58,43	0,17	55,38
	DP	0,09	0,01	0,58	3,44	0,05	3,85
	CV	6,1%	1,1%	2,7%	5,9%	28,8%	7,0%
CAP 50/70 REFAP	4	1,44	1,20	18,28	52,41	0,20	52,43
	5	1,35	1,16	17,71	51,85	0,21	51,90
	6	1,33	1,29	19,67	57,28	0,24	46,62
	7	1,43	1,44	23,21	63,08	0,17	51,55
	MÉDIA	1,39	1,27	19,72	56,15	0,20	50,63
	DP	0,06	0,13	2,47	5,22	0,03	2,69
CAP 50/70 REGAP	1	1,27	1,30	20,54	60,39	0,23	59,01
	2	1,27	1,20	19,12	52,87	0,20	56,73
	3	1,37	1,21	19,74	53,22	0,16	56,68
	MÉDIA	1,30	1,23	19,80	55,49	0,20	57,47
	DP	0,05	0,06	0,71	4,25	0,04	1,33
	CV	4,1%	4,5%	3,6%	7,7%	18,2%	2,3%
CAP 50/70 REPAR	1	1,15	1,24	18,72	53,16	0,21	51,20
	2	1,37	1,21	18,08	61,07	0,28	51,68
	3	1,28	1,13	16,27	54,02	0,28	51,66
	MÉDIA	1,27	1,20	17,69	56,08	0,26	51,51
	DP	0,11	0,06	1,27	4,34	0,04	0,27
	CV	8,6%	4,8%	7,2%	7,7%	15,5%	0,5%
CAP 50/70 REVAP	12	1,40	1,34	20,35	59,30	0,21	56,08
	13	1,52	1,33	20,24	61,56	0,22	57,69
	14	1,45	1,37	18,94	69,30	0,32	61,95
	MÉDIA	1,46	1,35	19,84	63,39	0,25	58,58
	DP	0,06	0,02	0,79	5,24	0,06	3,03
	CV	4,3%	1,6%	4,0%	8,3%	23,1%	5,2%

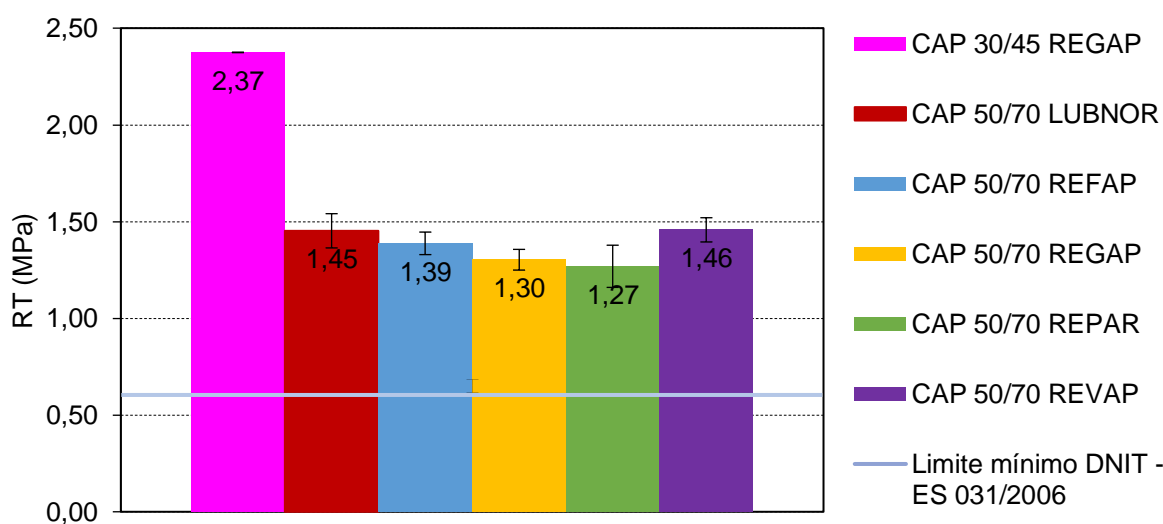
Fonte: (Autora).

A norma DNIT - ES 031/2006 estabelece que o valor mínimo de RT para misturas com CAP deve ser 0,65MPa.

Bernucci et al. (2010) afirmam que para misturas asfálticas a quente, os valores típicos situam-se entre 0,5 e 2 MPa sendo que este valor pode ser aumentado dada a consistência mais dura de algum ligante asfáltico, por exemplo em misturas de módulo elevado.

Observa-se na Figura 50 os resultados de RT das misturas desta pesquisa bem como o limite estipulado pelo DNIT. A mistura 30/45 apresenta a maior resistência a tração dentre as misturas ensaiadas. As barras de erro contidas no gráfico mostram que os valores das misturas de 50/70, que já eram notavelmente próximos, se sobrepõem, logo é válido dizer que estatisticamente as misturas de 50/70 tem o RT muito próximo.

Figura 50 - Resultados de RT para as misturas desta pesquisa



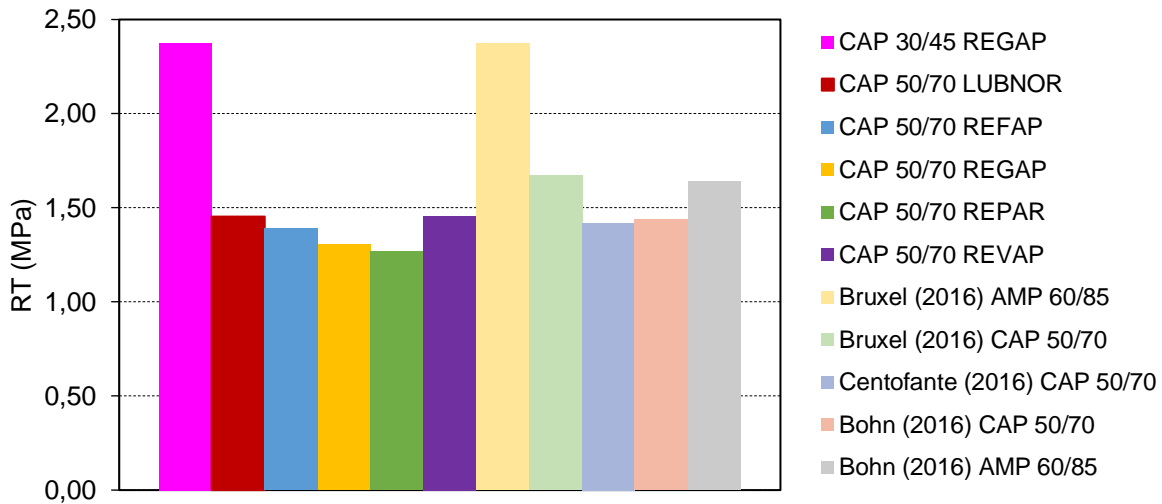
Fonte: (Autora).

Os valores encontrados pelos outros autores (Figura 51) para CAP 50/70 se aproximam dos valores encontrados nesta pesquisa. Observa-se que o resultado encontrado por Bruxel (2016) para sua mistura com CAP 60/85 é equivalente ao resultado encontrado nesta pesquisa para o 30/45. Os RT para misturas com CAP 50/70 encontrados pelas autoras são ligeiramente maiores que os encontrados nesta pesquisa, no entanto todos os resultados para as misturas de CAP 50/70 são próximos a 1,5MPa, deixando-as no mesmo patamar de resistência.

Vale ressaltar ainda, que através do ensaio de RT é realizada uma inferência de desempenho à fadiga das misturas asfálticas. Dessa forma, quanto maior o valor

de RT melhor seria o desempenho das amostras ao dano por fadiga. Esta inferência pode ser comprovada na análise de ensaios de fadiga realizados nesta pesquisa.

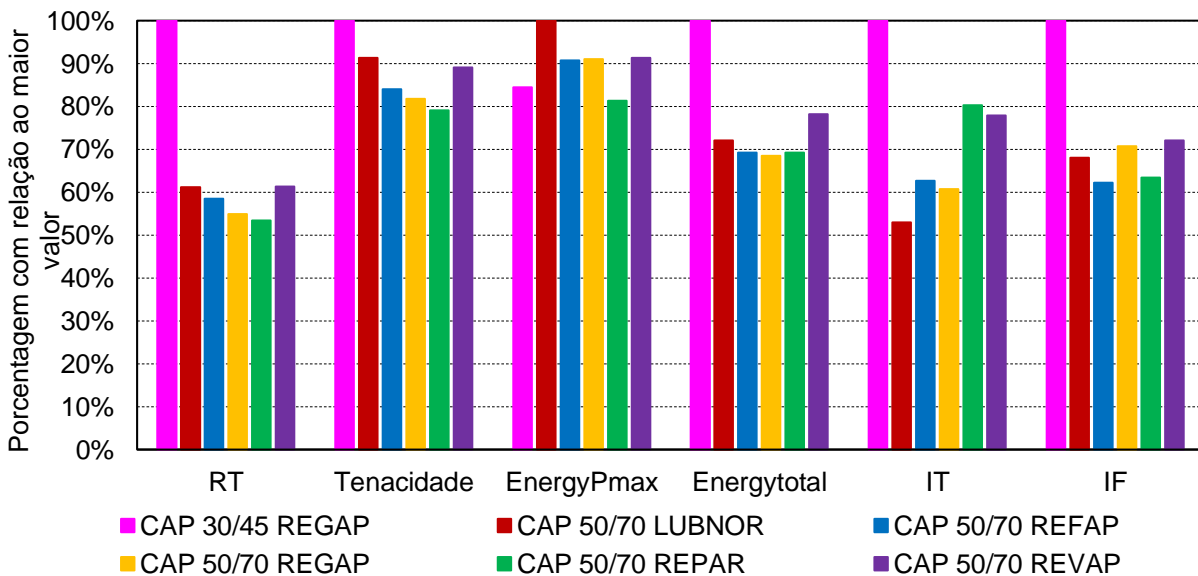
Figura 51 – Resultado de RT das misturas desta pesquisa e de outros autores



Fonte: (Autora).

Neste trabalho foi possível calcular os parâmetros de tenacidade, índice de tenacidade e Energia de Fratura bem como o Índice de Flexibilidade. Para fins de comparação entre estes parâmetros obtidos e o RT, foi gerado o gráfico da Figura 52 onde os resultados dos parâmetros mostrados na Tabela 27 foram normalizados.

Figura 52 – Comparação entre os parâmetros adicionais obtidos no ensaio de RT



Fonte: (Autora).

Observa-se que a mistura com CAP 30/45 obteve maiores resultados para quase todos os índices, o que significa que esta possui uma maior capacidade de absorver energia e se deformar plasticamente antes da fratura. Ainda, por ter o maior valor de Energia poderia ser considerada a mistura com maior resistência à fadiga.

Os resultados de todas as misturas com CAP 50/70 são próximos tanto para a RT quanto para os outros índices e os CV de ensaio mostram que as misturas não diferem significativamente. Isto era esperado tendo em vista que todas as misturas desta pesquisa possuem o mesmo esqueleto pétreo e teores de ligante próximos, sendo a diferença justamente a origem do 50/70, que respeitam a mesma especificação.

Ainda, se observa que os valores do IF são muito próximos para todas as misturas de 50/70 enquanto a mistura 30/45 se sobressai, o que também indica que esta tem um bom comportamento frente ao dano por fadiga.

O limite de IF é afetado pelo projeto da mistura e sua preparação (laboratório ou campo). Para misturas de campo, o IF é afetado pelo carregamento, ambiental condições e projeto estrutural. Os limites de IF podem ser ajustados à medida que mais dados de desempenho de campo estejam disponíveis. Estes limites podem ser ajustados para as condições locais que afetam a qualidade da mistura, ambiente e condições de carregamento do tráfego.

Um banco de dados regional está sendo montado e é esperado que este possa fornecer tendências e limites para misturas no futuro.

#### 4.5 FADIGA TRAÇÃO-COMPRESSÃO

Os resultados de fadiga das diferentes misturas são descritos e comparados neste tópico. Os resultados foram analisados por meio da abordagem clássica pelas curvas de Wöhler. O modelo S-VECD foi ajustado aos resultados dos testes cíclicos de fadiga tração-compressão uniaxial realizados com as amostras das misturas. O procedimento utilizado para o processamento de dados foi apresentado pelos autores Nascimento (2015), Babadopulos (2014) e Boeira (2018).

#### 4.5.1 Abordagem clássica

As curvas de Wöhler propõem uma relação entre o desempenho à fadiga de um material e o tipo de solicitação, podendo assim, serem utilizadas para calcular outras deformações desejadas pela equação potencial que representa a ligação dos pontos. O critério de ruptura utilizado é o proposto por Kim et al. (2003) e consiste em identificar o ponto do pico do ângulo de fase que é considerado como representativo de uma mudança do comportamento mecânico do material, devido ao acúmulo de danos por fadiga. O número de ciclos correspondente ao pico do ângulo de fase é tido como a vida de fadiga  $N_f$  (ruptura).

Os resultados experimentais de deformação e  $N_f$  estão na Tabela 28 e foram utilizados para gerar as curvas de Wöhler. As curvas de  $N_f$  em função da deformação específica de tração inicial resultantes dos ensaios se encontram na Figura 53.

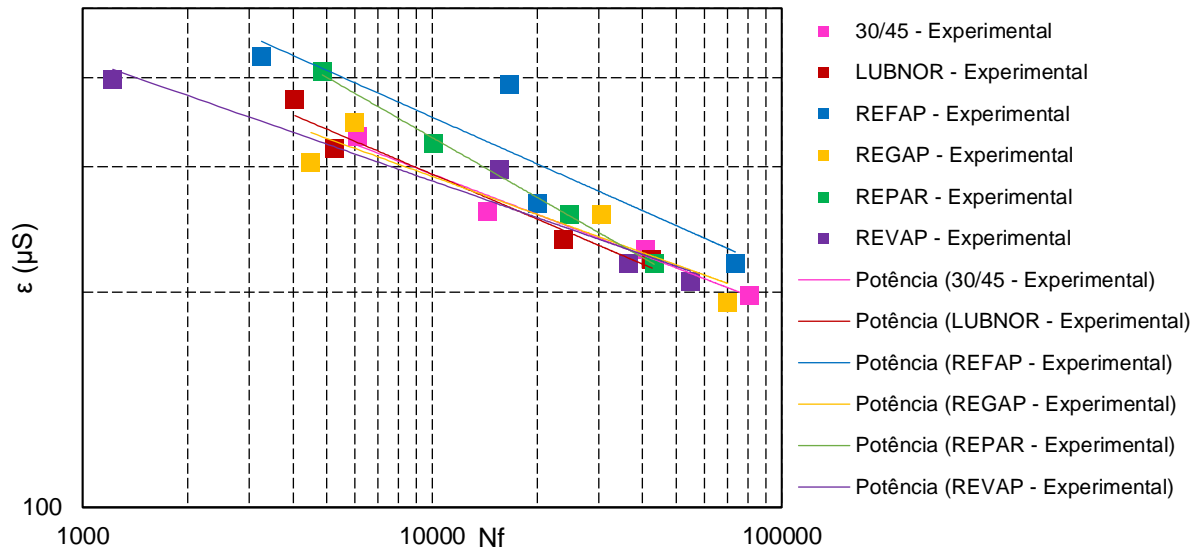
Tabela 28 - Valores de deformação e  $N_f$  utilizados para gerar o gráfico das curvas de Wöhler

Mistura	Amostra	$\epsilon$ @19°C 10 Hz ( $\mu$ S)	$N_f$
CAP 30/45 REGAP	CP 9	147	81000
	CP 4	168	40800
	CP 5	205	14400
	CP 6	258	6140
CAP 50/70 LUBNOR	CP 4	154	42600
	CP 2	173	23800
	CP 3	223	5240
	CP 6	267	4050
CAP 50/70 REFAP	CP 2	148	73700
	CP 3B	182	20100
	CP 6	287	16700
	CP 4	301	3250
CAP 50/70 REGAP	CP 4	135	70000
	CP 10	178	30500
	CP 12	259	6000
	CP 11	221	4500
CAP 50/70 REPAR	CP 20	157	43200
	CP 24	178	24760
	CP 22	230	10100
	CP 23	283	4850
CAP 50/70 REVAP	CP 4	143	54900
	CP 7	153	36490
	CP 6	221	15600
	CP 8	283	1220

Fonte: (Autora).



Figura 53 - Curvas de Wöhler para todas as misturas da pesquisa

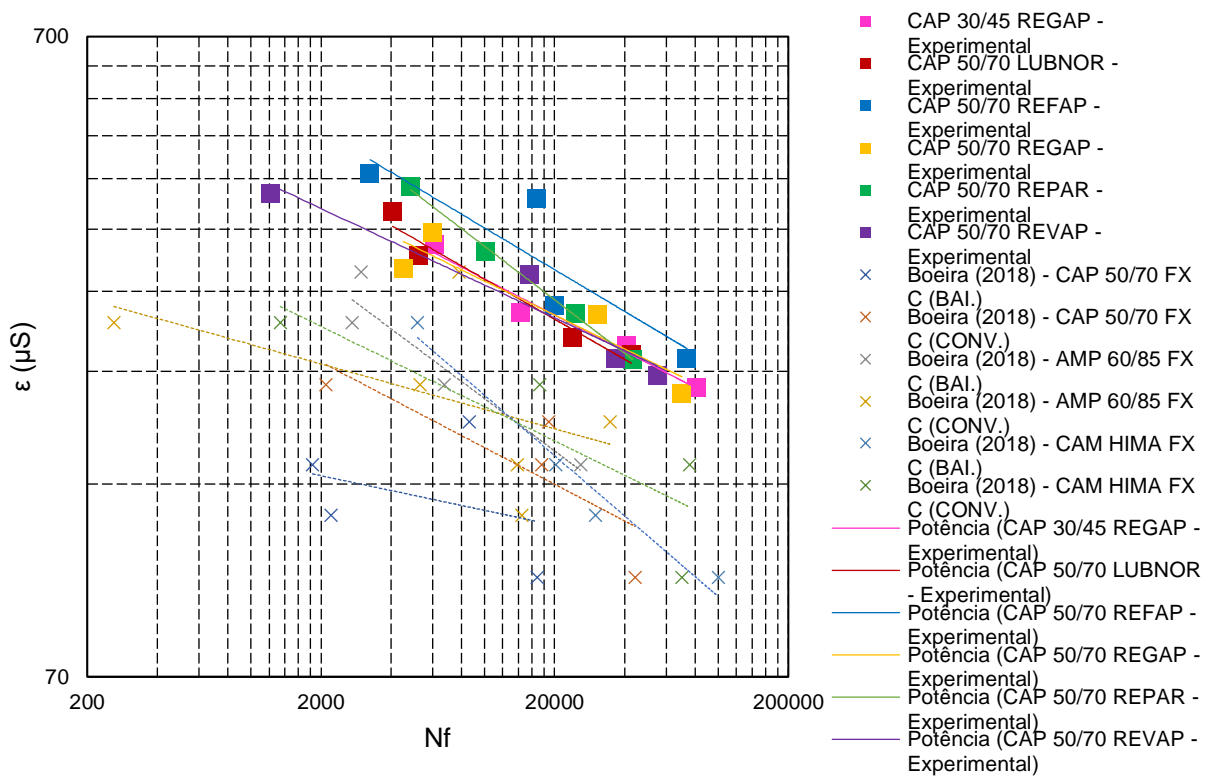


Fonte: (Autora).

Boeira (2018) realizou ensaios de fadiga tração-compressão uniaxial para misturas com CAP 50/70 da REFAP, misturas com AMP 60/85 e misturas com ligante modificado com HIMA e agregados de Sarandi/RS (da empresa Construbrás Construtora de Obras Rodoviárias Ltda.). As misturas utilizadas para comparação com esta pesquisa foram dosadas e moldadas conforme a metodologia Superpave e com duas variações: a primeira utilizando seleção granulométrica convencional pela Faixa C do DNIT (conv.) e a segunda utilizando adicionalmente os parâmetros Bailey (Bai).

Os resultados obtidos por Boeira (2018) foram plotados nas curvas de Wöhler da Figura 54, junto com as curvas desta pesquisa. Todas as misturas do autor tiveram curvas de Wöhler próximas às dessa pesquisa. Observa-se que as misturas do autor têm menor resistência ao dano causado no ensaio, o que pode ser explicado pelo baixo teor de ligante encontrado pelo autor (em média 4,00% para todas as misturas) e pela matriz de agregados que é de outra origem. Ainda, para plotar os resultados de Nf obtidos experimentalmente por Boeira (2018), utilizou-se os valores de deformações iniciais e não a deformação média do ensaio.

Figura 54 - Curvas de Wöhler das misturas desta pesquisa comparadas às de Boeira (2018)



Fonte: (Autora).

Utilizando as equações potenciais das curvas de Wöhler das misturas desta pesquisa foi possível calcular o  $Nf_w$  para um tráfego simulado no AEMC conforme descrito na metodologia.

Para os resultados de deformação de tração no fundo do revestimento obtidos nas simulações de pavimento proposto com cada mistura (AEMC), foram aplicadas as equações das curvas de Wöhler (Equação 12) e encontrados os  $Nf_w$  da Tabela 29.

$$Nf_w = 10^{\left[ \frac{(\log \frac{\epsilon t}{a})}{-b} \right]} \quad (12)$$

Conforme a análise, a mistura que se evidencia quanto sua resistência ao dano por fadiga é a com CAP 30/45, seguida da mistura de CAP 50/70 da REFAP. As misturas com o pior comportamento de fadiga são as de CAP 50/70 da LUBNOR e da REVAP.

A mistura com CAP 30/45 tem valor de  $Nf_w$  47% maior que a segunda mistura do ranking, a com CAP 50/70 da REFAP. As misturas com CAP 50/70 da LUBNOR e

da REPAR são as com menores valores, apenas 25% do valor encontrado para a mistura 30/45. Com isto, pode-se perceber que existem três patamares de misturas quanto à resistência ao dano por fadiga: No primeiro, encontra-se a mistura com CAP 30/45, no segundo a mistura com CAP 50/70 da REFAP, no terceiro as misturas com CAP 50/70 da REGAP e REVAP e por último, no quarto patamar, as misturas com CAP 50/70 da LUBNOR e da REPAR.

Destaca-se que para definir o  $N_f$  de campo é necessário que exista um fator de calibração campo-laboratório que correlacione os resultados obtidos de  $N_{fw}$  com o efetivo desempenho da mistura em campo.

Tabela 29 - Resultados de  $N_{fw}$  utilizando as equações das curvas de Wöhler para simulações de pavimentos de cada mistura

Mistura	$\epsilon_t$ AEMC ( $\mu$ S)	Parâmetros das curvas Equação 12		R <sup>2</sup> das curvas	$N_{fw}$	Ranking	Porcentagem em relação ao primeiro do ranking
		a	b				
CAP 30/45 REGAP	197	1656,9	-0,188	0,9722	83044	1º	100%
CAP 50/70 LUBNOR	253	2008,2	-0,209	0,9601	20171	6º	24%
CAP 50/70 REFAP	238	2418,9	-0,217	0,7788	43726	2º	53%
CAP 50/70 REGAP	241	1487,8	-0,177	0,8613	29259	3º	35%
CAP 50/70 REPAR	267	4314,7	-0,279	0,9979	21445	5º	26%
CAP 50/70 REVAP	241	1384,9	-0,171	0,9383	27602	4º	33%

Fonte: (Autora).

#### 4.5.2 Abordagem pelo método S-VECD

Os ensaios foram conduzidos em diferentes condições, variando a amplitude da deformação. Foi utilizada uma amostra para cada um dos quatro diferentes níveis de tensão alvo (cerca de 125, 150, 200 e 250 $\mu$ S). Antes de cada ensaio de fadiga, realizou-se um ensaio de módulo dinâmico de tração-compressão de curto prazo (teste de *finger print*) para obter a variação da rigidez entre as amostras.

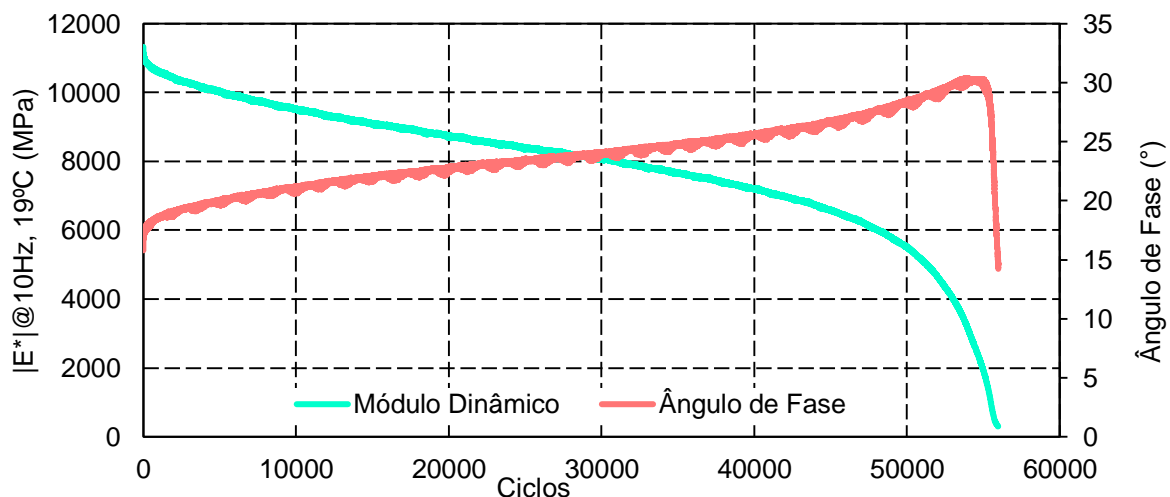
Foram geradas curvas de módulo dinâmico e ângulo de fase versus o número de ciclos para cada amostra, de modo a verificar no seu ponto de ruptura ( $N_f$ , ou pico do ângulo de fase) o decréscimo destes parâmetros. Um exemplo desta curva está na Figura 55, para o CP 4 da mistura REVAP. O módulo dinâmico cai constantemente enquanto o ângulo de fase sobe até o pico, onde ocorre uma queda súbita que caracteriza a ruptura. O número de ciclos no pico do ângulo de fase é o valor de  $N_f$  (neste exemplo, 54900 ciclos).

A C versus S é uma curva característica do material. Os valores de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) são resultantes da rotina matemática no MATLAB com os dados resultantes do ensaio de fadiga tração-compressão uniaxial.

Com os valores de C e S é possível gerar curvas de integridade do material versus acúmulo de dano, as quais devem se sobrepôr mesmo quando aplicadas deformações diferentes no ensaio. Isto se observa para todas as misturas desta pesquisa, nas Figuras 56, 57, 58, 59, 60 e 61.

Para o conjunto de curvas de cada mistura foi feito um *fitting*, para obter a curva característica da mistura. A equação da *Power Law* (ou curva *fitting* característica do material) deve ser do tipo:  $C = 1 - C_{11} * S^{C_{12}}$ , onde  $C_{11}$  e  $C_{12}$  são as constantes. As constantes  $C_{11}$  e  $C_{12}$  de cada mistura para o modelo de fadiga também estão apresentadas nos gráficos das Figuras 56 a 61 e são utilizadas, assim como os outros parâmetros descritos na metodologia, para calcular resultado de  $N_f$  com o modelo proposto por Nascimento (2016).

Figura 55 - Módulo dinâmico e ângulo de fase versus número de ciclos de ensaio do CP 4 da mistura REVAP para  $125\mu S$  de deformação alvo

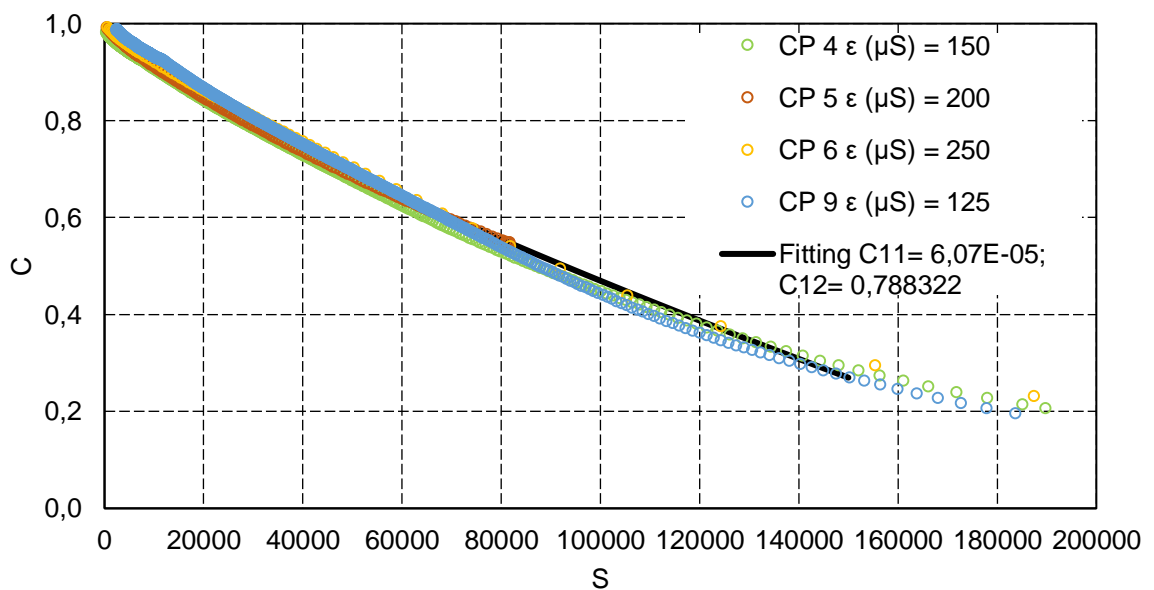


Fonte: (Autora).

Observa-se que os resultados apresentados foram obtidos em diferentes amplitudes de carga, indicadas pela amplitude de deformação inicial ( $\epsilon$ ) medida com os LVDTs. A evolução da integridade do material e o dano acumulado em relação ao tempo reduzido (após a aplicação do princípio de superposição tempo-temperatura) são muito diferentes para os quatro testes. Para validar a hipótese de que a curva C versus S é uma propriedade do material, independente das condições de carregamento e da temperatura para um determinado material, como mostrado por Daniel & Kim (2002) para misturas de asfalto, as curvas obtidas para cada amostra devem ficar sobrepostas.

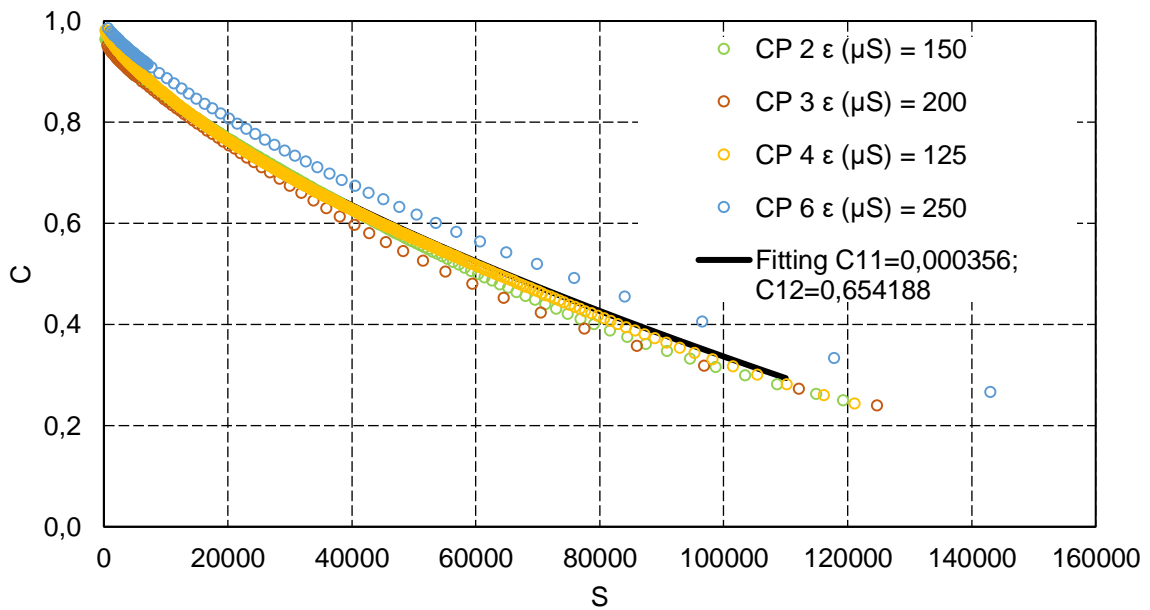
É possível verificar que os ensaios foram realizados com sucesso pois, embora com deformações diferentes, os CPs de uma mesma mistura possuem o mesmo comportamento frente ao dano. Esta verificação é válida pois as curvas CxS dos CPs de uma mesma mistura se sobrepõem conforme os preceitos do S-VECD.

Figura 56 - Curvas de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) de cada amostra e curva *fitting* da mistura de CAP 30/45 da REGAP



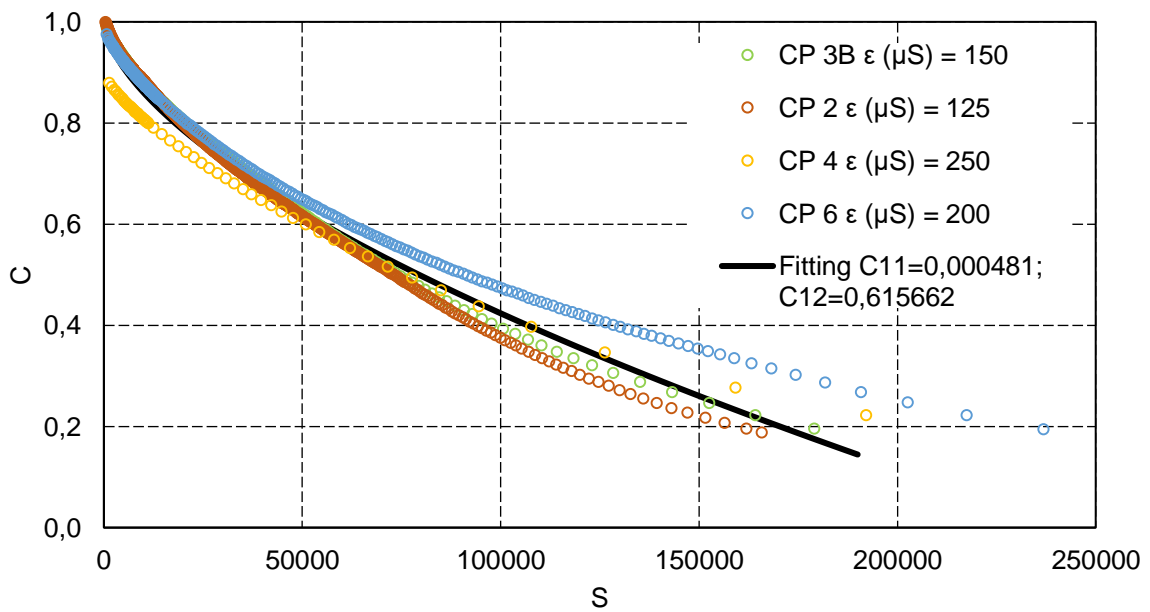
Fonte: (Autora).

Figura 57 - Curvas de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) de cada amostra e curva *fitting* da mistura de CAP 50/70 da LUBNOR



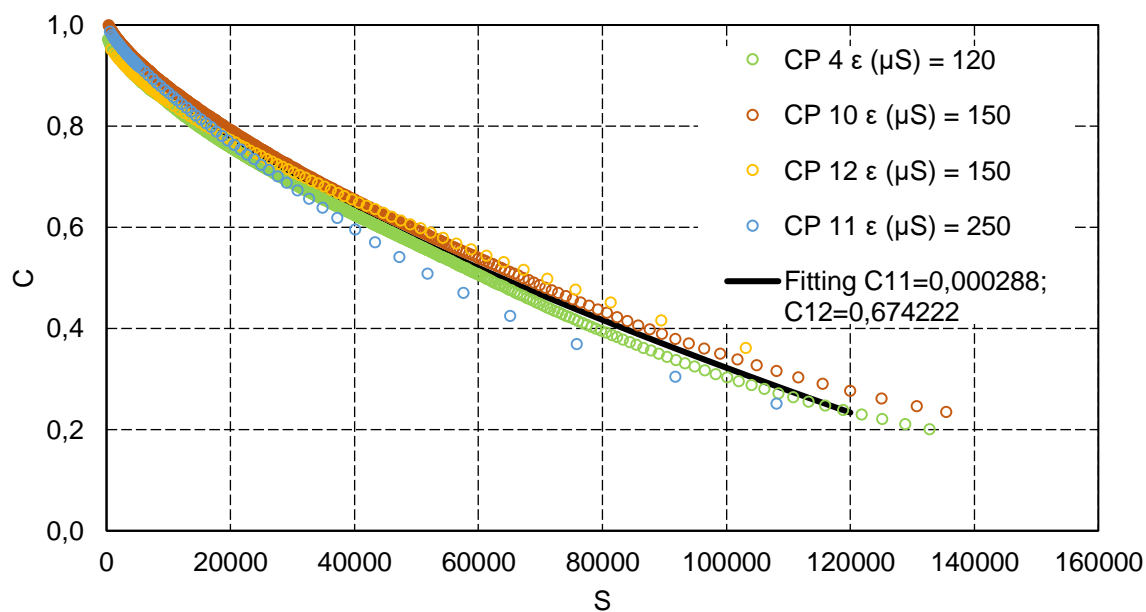
Fonte: (Autora).

Figura 58 - Curvas de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) de cada amostra e curva *fitting* da mistura de CAP 50/70 da REFAP



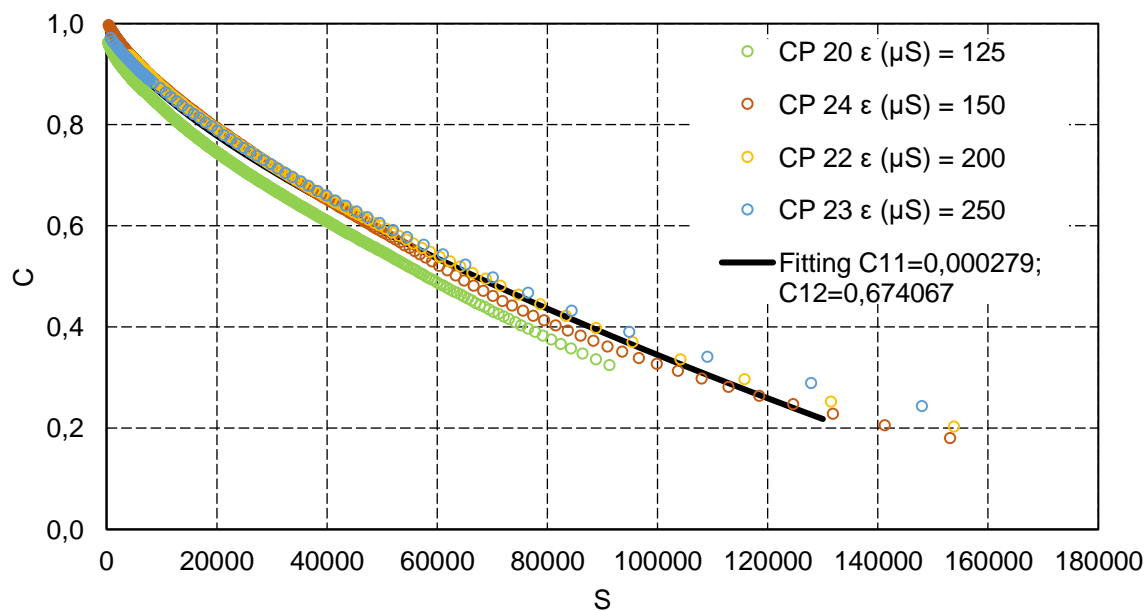
Fonte: (Autora).

Figura 59 - Curvas de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) de cada amostra e curva *fitting* da mistura de CAP 50/70 da REGAP



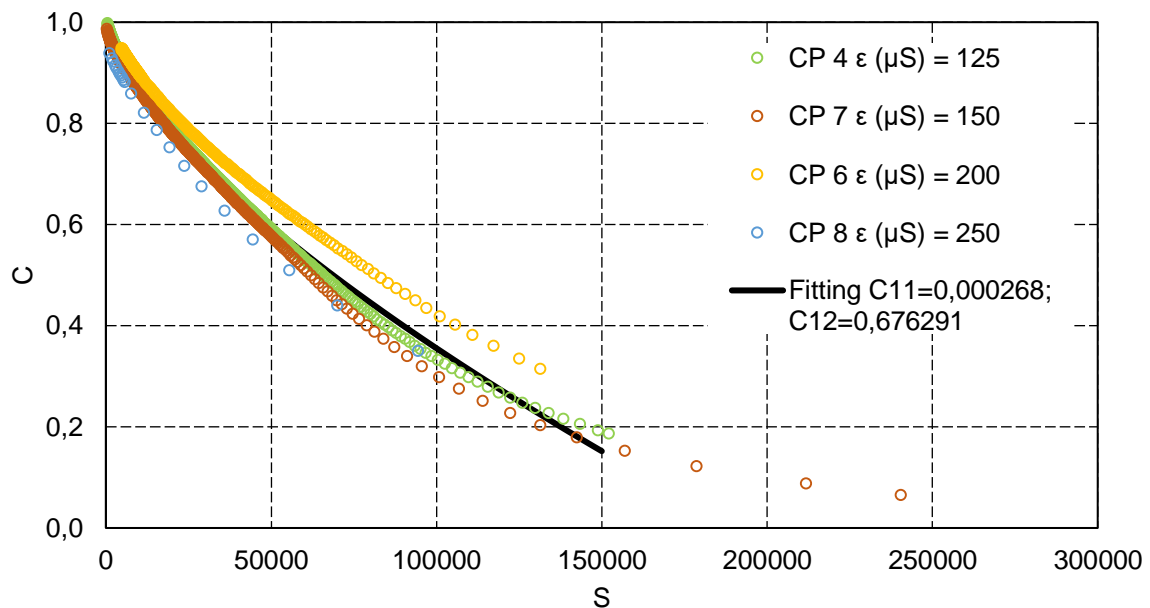
Fonte: (Autora).

Figura 60 - Curvas de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) de cada amostra e curva *fitting* da mistura de CAP 50/70 da REPAR



Fonte: (Autora).

Figura 61 - Curvas de integridade do material (C) versus acúmulo de dano (S) de cada amostra e curva *fitting* da mistura de CAP 50/70 da REVAP



Fonte: (Autora).

Com os resultados obtidos no ensaio foi realizada uma rotina de cálculo para obter os parâmetros de fadiga de cada corpo de prova. Também foi feito o *fitting* da curva  $C \times S$  para obter os parâmetros C11 e C12. Os valores  $\gamma$  e  $\Delta$  são coeficientes da curva Gr (taxa de variação média de energia de pseudo deformação liberada por ciclo de ensaio) versus Nf (Pico do ângulo de Fase), conforme se observa para cada mistura na Tabela 30 e as curvas na Figura 62.

Além de Gr, C, S, Nf também foram obtidas as deformações pico a pico, o  $|E^*|_{ve}$  (módulo dinâmico viscoelástico linear obtido no ensaio *finger print*),  $\alpha$  (taxa de evolução do dano), entre outros parâmetros que são resultantes da rotina de cálculo dos resultados de módulo *finger print* e fadiga no MATLAB. A versatilidade do modelo S-VECD permite o uso desses parâmetros para obter a curva característica de dano e também critérios de falha para estimar o comportamento de fadiga do material testado em várias condições de carregamento.

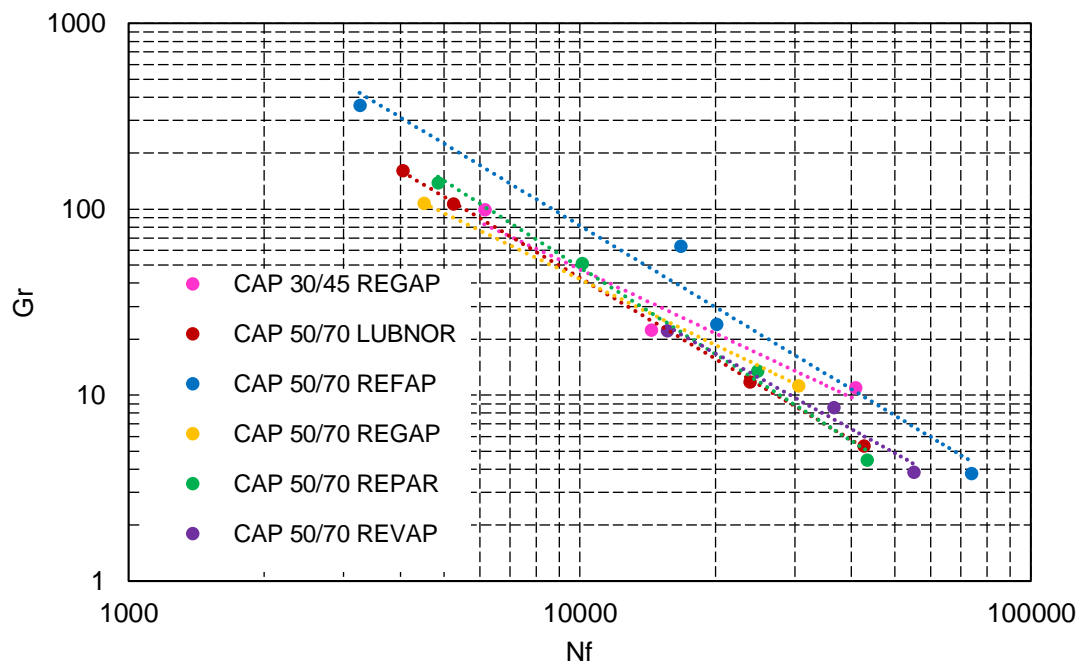


Tabela 30 - Resultados de Nf e Gr para cada amostra

Mistura	Amostra	Nf	Gr
CAP 30/45 REGAP	4	40800	11,0314
	5	14400	22,4703
	6	6140	99,6067
	9	81000	-
CAP 50/70 LUBNOR	4	42600	5,3660
	2	23800	11,8244
	3	5240	107,3729
	6	4050	162,0113
CAP 50/70 REFAP	2	73700	3,8062
	3b	20100	24,1755
	4	3250	362,2848
	6	16700	63,6015
CAP 50/70 REGAP	4	70000	-
	12	6000	-
	10	30500	11,3288
	11	4500	107,8518
CAP 50/70 REPAR	20	43200	4,5014
	22	10100	51,1611
	23	4850	138,864
	24	24760	13,5167
CAP 50/70 REVAP	4	54900	3,8719
	6	15600	22,3165
	7	36490	8,6503
	8	1220	-

Fonte: (Autora).

Figura 62 - Curvas Gr versus Nf de cada mistura



Fonte: (Autora).

Os parâmetros C11, C12 (retirados do *fitting* das curvas CxS),  $Y$ ,  $\Delta$  (índices da curva Gr versus Nf da Figura 63),  $\alpha$  e  $|E^*|_{ve}$  que foram utilizados para calcular o  $Nf_N$  (pela Equação 7) de cada mistura estão na Tabela 31. O valor de  $\beta$  utilizado foi 0,8.

Após a aplicação das equações de Nascimento (2016), têm-se os valores de  $Nf_N$  calculados para cada mistura. Os  $Nf_N$  calculados e as deformações de ensaio médias que foram utilizadas constam na Tabela 32. As linhas pontilhadas do gráfico da Figura 63 representam o modelo proposto pelo autor, que pela aplicação dos parâmetros de ensaio na Equação 7 prevê o  $Nf_N$  para cada deformação de ensaio.

Tabela 31 - Parâmetros C11, C12,  $Y$ ,  $\Delta$ ,  $\alpha$  e  $|E^*|_{ve}$  utilizados para calcular  $Nf_N$  pela equação de Nascimento (2016)

Mistura	Fitting curvas CxS		Índices curvas GrxNf		$\alpha$	$ E^* _{ve}$ (kPa)
	C11	C12	$Y$	$\Delta$		
CAP 30/45 REGAP	0,0000607	0,788322	2000000	-1,144	2,902509	12025
CAP 50/70 LUBNOR	0,0003555	0,654188	30000000	-1,449	3,075648	9862292
CAP 50/70 REFAP	0,0004812	0,615662	60000000	-1,462	3,277240	9906669
CAP 50/70 REGAP	0,0002884	0,674222	2000000	-1,178	3,032501	10654435
CAP 50/70 REPAR	0,0002792	0,674067	80000000	-1,550	3,046101	9179502
CAP 50/70 REVAP	0,0002679	0,676291	10000000	-1,350	3,169320	9236525

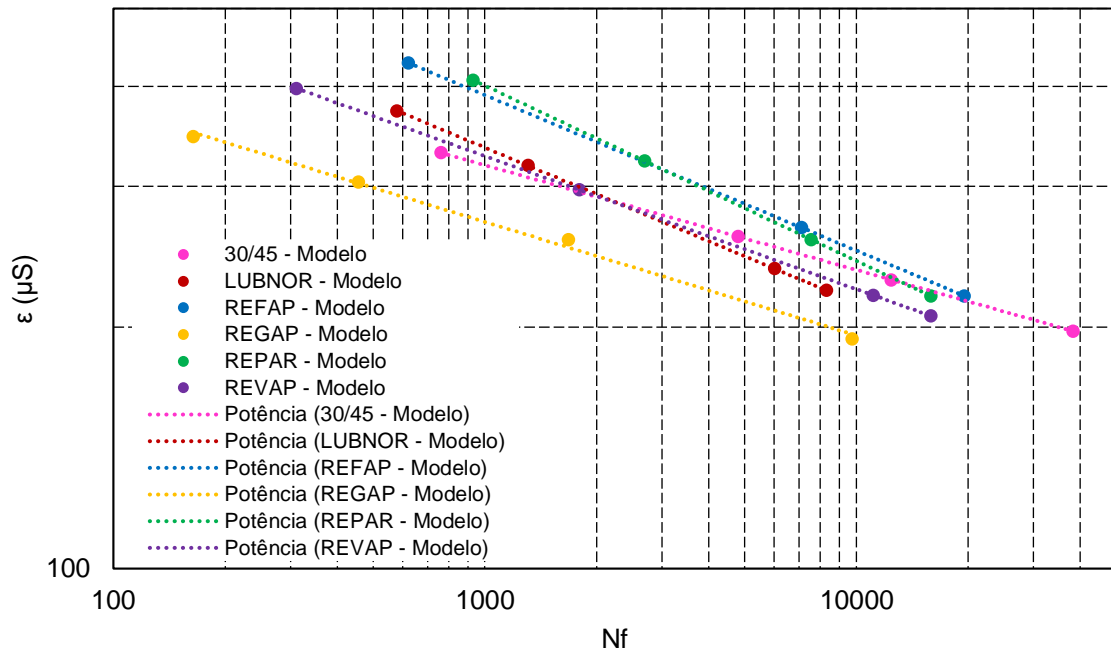
Fonte: (Autora).

Tabela 32 - Valores de deformação médias do ensaio e  $Nf_N$  calculado

Mistura	Amostra	$\epsilon$ ( $\mu S$ )	$Nf_N$
CAP 30/45 REGAP	CP 9	198	38160
	CP 4	229	12350
	CP 5	260	4790
	CP 6	331	759
CAP 50/70 LUBNOR	CP 4	223	8273
	CP 2	237	6001
	CP 3	319	1303
	CP 6	373	578
CAP 50/70 REFAP	CP 2	219	19453
	CP 3B	267	7101
	CP 6	390	993
	CP 4	428	620
CAP 50/70 REGAP	CP 4	194	9716
	CP 10	257	1671
	CP 12	346	163
	CP 11	304	455
CAP 50/70 REPAR	CP 20	219	15781
	CP 24	258	7514
	CP 22	323	2678
	CP 23	407	927
CAP 50/70 REVAP	CP 4	207	15806
	CP 7	219	11082
	CP 6	297	1791
	CP 8	398	309

Fonte: (Autora).

Figura 63 - Curvas geradas pela união dos pontos (modelo) de  $Nf_N$  calculados pela equação de Nascimento (2016)



Fonte: (Autora).

Utilizando a Equação 7 proposta por Nascimento (2016) foi possível calcular o  $Nf$  para um tráfego simulado no AEMC conforme descrito na metodologia.

Para os resultados de deformação de tração no fundo do revestimento obtidos nas simulações de pavimento proposto com cada mistura, foram aplicadas as equações e encontrados os  $Nf_N$  da Tabela 33, possibilitando fazer outro ranking das misturas onde percebe-se novamente a proeminência do valor para a mistura de CAP 30/45. Ainda se verifica que o ranking muda muito pouco quando comparado ao ranking da Tabela 29 encontrado pelas curvas de Wöhler.

Tabela 33 - Resultados de  $Nf$  utilizando as equações das curvas geradas pelos pontos de  $Nf$  calculados por Nascimento (2016) para simulações de pavimentos de cada mistura

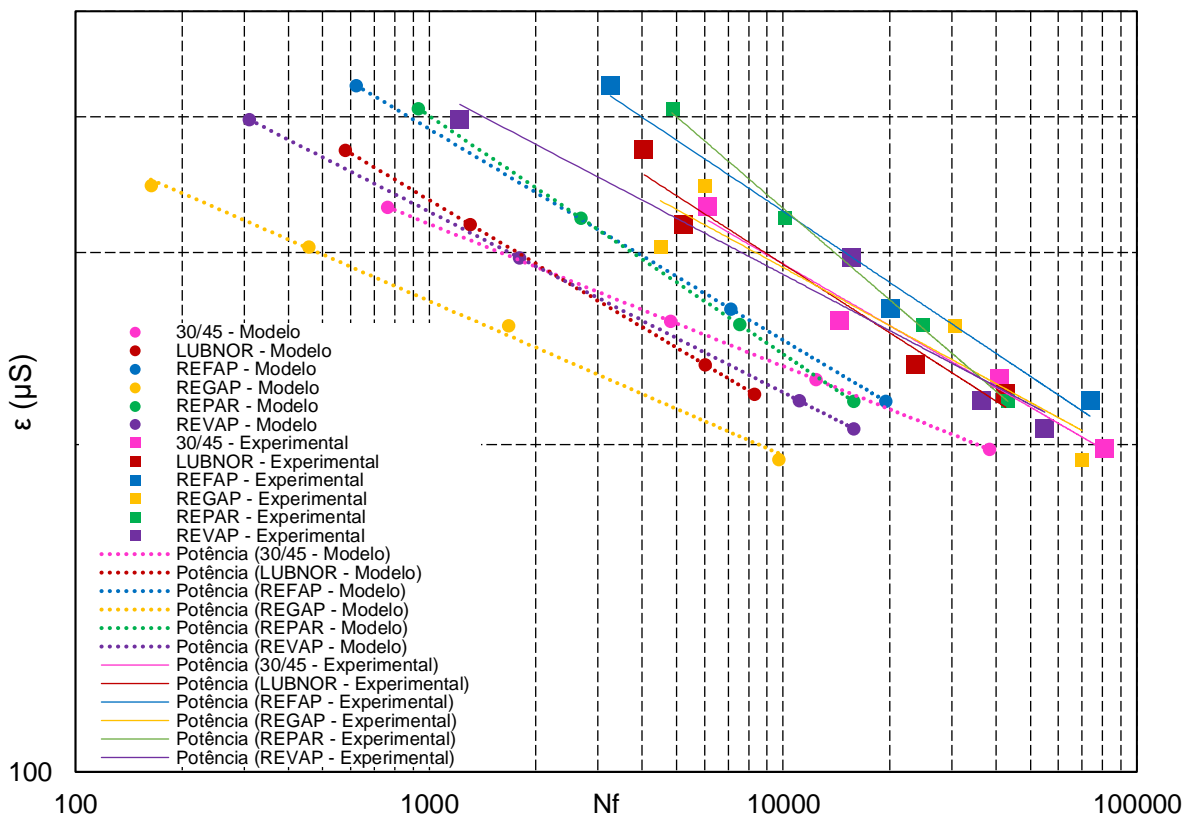
Mistura	$\epsilon_t$ AEMC ( $\mu S$ )	$Nf_N$ (calculado pela Equação 7)	Ranking	Porcentagem em relação ao primeiro do ranking
CAP 30/45 REGAP	197	39666	1º	100%
CAP 50/70 LUBNOR	253	4272	5º	11%
CAP 50/70 REFAP	238	12723	2º	32%
CAP 50/70 REGAP	241	1746	6º	4%
CAP 50/70 REPAR	267	6394	4º	16%
CAP 50/70 REVAP	241	6301	3º	16%

Fonte: (Autora).

No gráfico da Figura 64 é possível observar a proximidade que as curvas obtidas pelas equações de Nascimento (2016) têm com os resultados experimentais. As linhas cheias do gráfico representam as curvas de Wöhler, ou seja, as curvas com os Nf experimentais versus as deformações do experimento.

É possível observar que tanto para as curvas de Wöhler como para as curvas de Nascimento, o ranking das misturas é muito similar. Por isso, o ajuste proposto por Nascimento (2016) é válido, mesmo em ensaio de fadiga tração-compressão uniaxial com deformação não controlada.

Figura 64 - Superposição das curvas geradas pela união dos pontos (modelo) de Nf gerados pela equação de Nascimento (2016) e as curvas de Wöhler (experimental)



Fonte: (Autora).

Os valores absolutos de Nf calculados pela equação de Nascimento (2016) são diferentes dos valores encontrados pelas equações das curvas de Wöhler, no entanto a inclinação das curvas e o ranking das misturas simuladas se mantém parecidos onde as misturas com o melhor comportamento frente ao dano por fadiga são a 30/45 e a REFAP. As misturas LUBNOR, REPAR e REVAP tiveram os menores valores nos

dois rankings e têm valores próximos, o que as deixa no mesmo patamar de resistência ao dano por fadiga.

#### 4.6 FLOW NUMBER

Os resultados de FN encontrados para as 6 misturas estudadas foram obtidos pelo Modelo de Francken e estão apresentados na Tabela 34, com seus respectivos desvios-padrões (DP), coeficientes de variação (CV) e parâmetros A, B, C e D do modelo bem como os VV de cada amostra.

Tabela 34 - Resultados de FN, DP, CV e coeficientes do modelo de Francken

MISTURA	CP	VV (%)	GC (%)	FN	FN médio	DP	CV (%)	Coeficientes do modelo de Francken			
								A	B	C	D
CAP 30/45 REGAP	2	7,47	97,50	217	214	5,00	2,32	1039,99	0,52	382,87	0,01
	3	7,78	97,30	210				1035,86	0,53	302,09	0,01
CAP 50/70 LUBNOR	1A	7,13	96,77	122	128	10,39	8,12	805,33	0,62	136,23	0,02
	1V	6,55	96,82	122				1189,79	0,52	622,68	0,01
	2	6,87	96,92	140				823,04	0,61	63,91	0,02
CAP 50/70 REFAP	1	6,43	97,90	184	176	16,52	9,39	869,20	0,56	391,96	0,01
	2	6,46	97,88	187				655,10	0,61	123,26	0,01
	3	7,25	97,80	157				904,81	0,57	161,37	0,01
CAP 50/70 REGAP	6	6,67	96,80	142	132	12,49	9,46	944,92	0,59	135,70	0,01
	7	6,88	96,80	118				1062,73	0,58	203,45	0,02
	19	6,89	96,75	136				862,49	0,60	160,75	0,01
CAP 50/70 REPAR	17	7,24	96,77	78	70	12,02	17,29	1439,95	0,57	407,58	0,02
	18	7,09	96,81	61				1171,65	0,63	284,32	0,03
CAP 50/70 REVAP	9	7,21	96,78	156	165	19,15	11,61	1039,52	0,55	633,08	0,01
	10	6,39	96,78	187				985,73	0,53	453,64	0,01
	11	6,85	96,74	152				924,03	0,57	293,29	0,01

Fonte: (Autora).

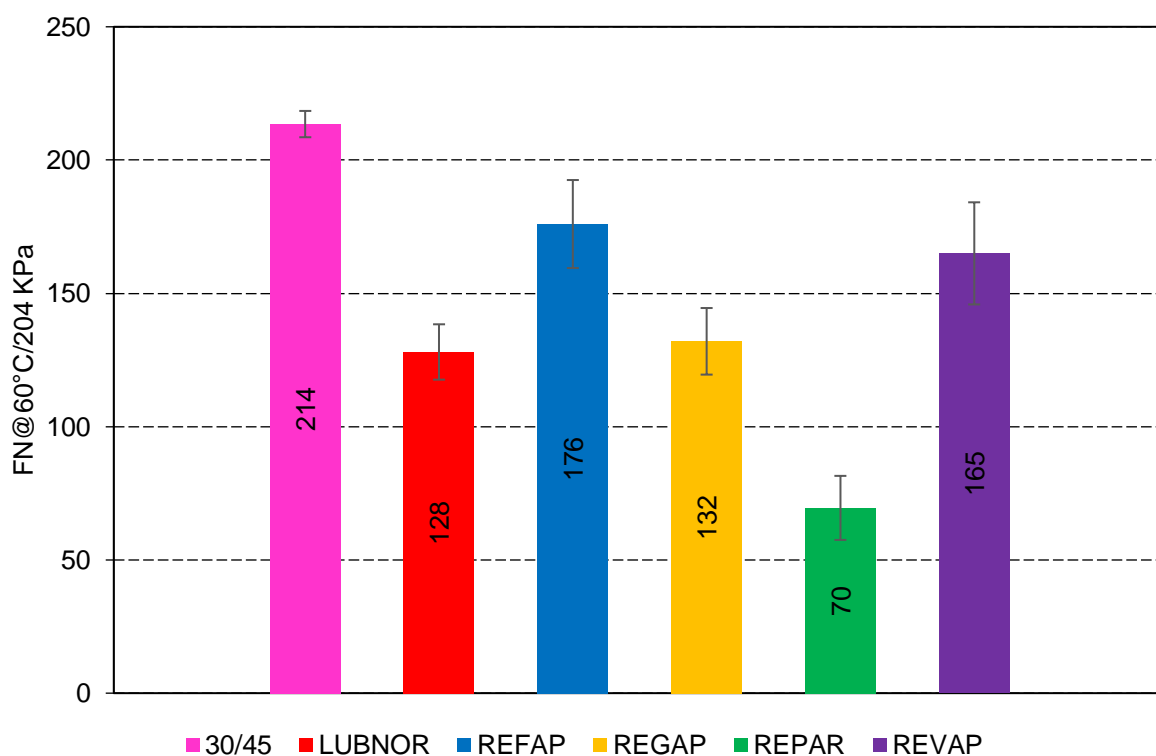
Segundo a norma AASHTO T79 para o ensaio de FN, considerando valor médio de FN encontrado para duas amostras o CV não deve ultrapassar o valor de 14,1% e para três amostras o valor deve ser inferior a 11,5%. A norma brasileira não faz referência ao CV das médias de FN entre as amostras, mas ainda assim a maioria das misturas ensaiadas respeitam os CV da norma americana. Tais variações podem ser decorrentes de variações durante a mistura e a moldagem das amostras bem como a disposição dos agregados no corpo de prova, no entanto este fato não é preponderante nesta pesquisa. Nascimento (2008) encontrou CV de 2,5% a 42,9%

para suas misturas, Onofre (2012) valores entre 13% e 26%, Almeida Jr. (2016) encontrou CV de até 24% e Bohn (2016) de até 21%. Possivelmente, misturas com teor de ligante mais elevado tenham CV menores.

Os ensaios de todas as amostras foram finalizados quando a mistura atingiu 5% da deformação. Nenhuma amostra suportou 10.000 ciclos.

Na Figura 65 estão representados os resultados de FN para as misturas desta pesquisa bem como seu coeficiente de variação nas barras de erro. Ao observar as barras de erro é possível verificar que as misturas de 50/70 da LUBNOR e REGAP não possuem diferença de valores, bem como as misturas REVAP e REFAP que podem ser consideradas iguais. O menor valor de FN encontrado foi para a mistura REPAR e o maior a mistura 30/45.

Figura 65 - Resultados de *Flow Number* para as misturas desta pesquisa



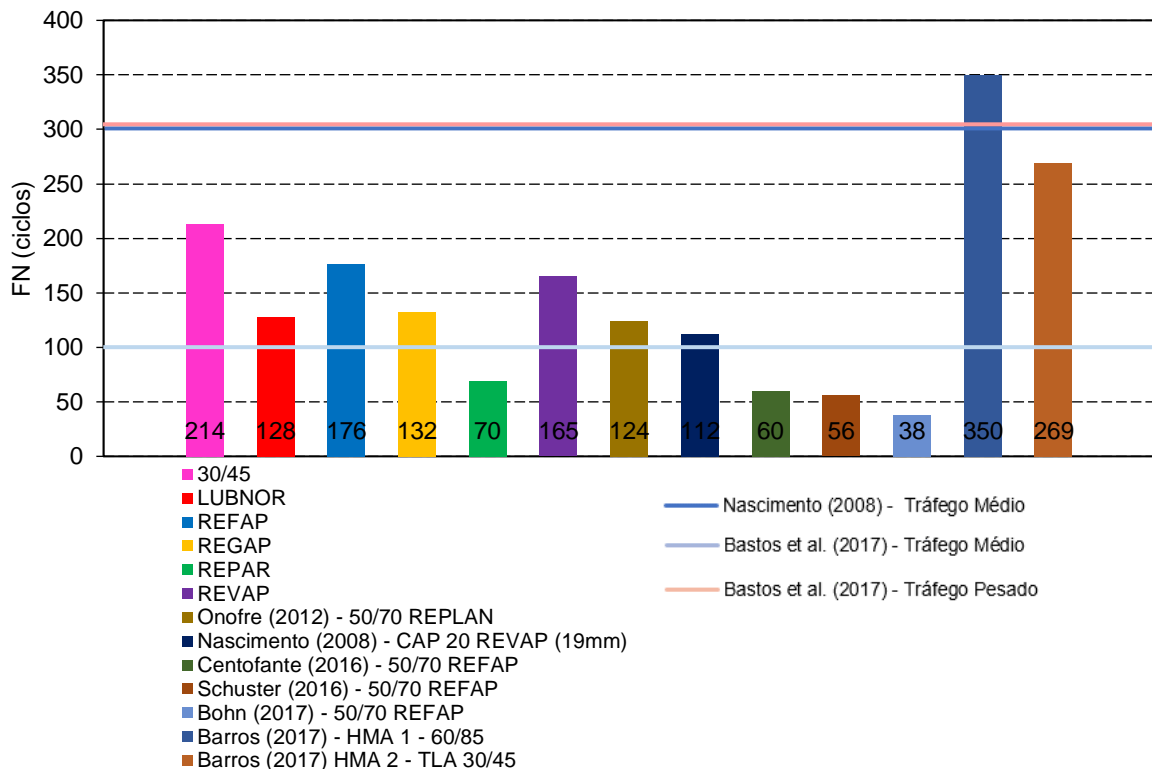
Fonte: (Autora).

As misturas de Nascimento (2008), Centofante (2016), Onofre (2012), Schuster (2016), Barros (2017) e Bohn (2017) foram escolhidas para serem plotadas no gráfico da Figura 66 junto com as misturas desta pesquisa e os limites definidos pelos autores da Tabela 21.

Observa-se que todas as misturas de CAP 50/70 desta pesquisa estão adequadas para os limites de tráfego médio proposto Bastos (2017), exceto a mistura da REPAR. Misturas com CAP raramente estão adequadas para tráfegos pesados.

É importante frisar que as misturas de cada autor têm sua particularidade, principalmente com relação ao teor de ligante e tipo de agregado utilizado e que são fatores de grande influência nas propriedades das misturas.

Figura 66 - *Flow Number* das misturas desta pesquisa e de misturas de outros autores



Fonte: (Autora).

Acredita-se que os valores de FN dos autores Bohn (2017) e Schuster (2016) são baixos comparados com os outros pois o agregado mineral das três misturas é proveniente de uma pedreira em Santo Antônio da Patrulha/RS, cujos resultados para suas misturas são considerados baixos comparando com misturas de agregados de outras origens.

Centofante (2016) utilizou o mesmo agregado e CAP 50/70 (variando apenas o lote) da presente pesquisa. O teor de CAP encontrado pela autora é 5,70%, muito próximo ao desta pesquisa, no entanto obteve valores mais baixos de FN para a sua

mistura de referência. Acredita-se que por usar a cal, as misturas desta pesquisa tiveram maiores valores de FN.

Os resultados de FN para as misturas com ligantes modificados são mais altos, conforme o esperado eles têm maior resistência ao dano por deformação permanente.

Embora os autores Onofre (2012) e Nascimento (2008) tenham misturas com os CAP 50/70, a origem de produção do CAP, o esqueleto pétreo e suas propriedades são diferentes das misturas desta pesquisa, o que explica a diferença nos resultados. Observa-se ainda que as misturas com ligantes modificados de Barros (2017) têm resultados superiores de FN, mostrando a superioridade dos ligantes modificados quanto à deformação permanente. Almeida Jr. (2016) obteve resultados de FN acima de 6000 para ligantes modificados, o que confirma a supremacia dos ligantes modificados frente aos convencionais utilizados nesta pesquisa.

#### 4.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS

Neste item, os resultados de todos os ensaios foram confrontados, de modo a obter correlações entre eles e ter uma visão mais global das misturas.

Na Figura 67 é apresentado um diagrama com todos os resultados. As barras coloridas indicam a proporção dos valores entre colunas (ensaios). O  $|E^*|$  considerado para esta comparação é à 25°C na frequência de 10 Hz. Os Nf de Wöhler e Nf de Nascimento considerados são o calculado a partir das deformações retiradas do AEMC simulado com os valores de  $|E^*|$  para cada revestimento.

O teor de CAP foi adicionado para visualizar a possível relação com a pequena mudança de teor entre as misturas com os resultados de FN, por exemplo.

Observa-se que para todos os ensaios as barras da mistura de CAP 30/45 são as maiores, o que comprova sua supremacia frente as outras misturas. É visível que esta mistura, que tem os valores mais altos de MR, RT e  $|E^*|$  também teve os valores mais altos com relação aos dois tipos de dano.

Com relação aos resultados das misturas de CAP 50/70, não se observa um padrão entre todos os ensaios, embora os resultados de fadiga entre as duas análises sejam coerentes (ranking parecido) e os resultados de MR e  $|E^*|$  também. Ainda, percebe-se que os resultados de MR, RT e  $|E^*|$  possuem padrões similares, comprovando que misturas com CAPs 50/70 de diferentes origens têm o mesmo comportamento nestes ensaios. Acredita-se que a diferença entre as misturas de CAP



50/70 deve-se a variabilidade de moldagem dos CPs, tendo em vista que os coeficientes de variação e desvio padrão dos ensaios mostraram que os resultados dos ensaios de MR e RT das misturas com CAP 50/70 são próximos.

Figura 67 - Diagrama comparativo entre os resultados de todos os ensaios

MISTURA	TEOR DE LIGANTE (%)	MR (MPa)	$ E^* @25^\circ\text{C}$ 10Hz (MPa)	RT (MPa)	FADIGA	
					Nf Wöhler	Nf Nascimento
30/45	5,48	11637	9277	2,3747	83044	38990
LUBNOR	5,42	8912	6463	1,4523	20171	4259
REFAP	5,72	7319	7074	1,3878	43726	12723
REGAP	5,55	7960	6914	1,3030	29259	2947
REPAR	5,85	7343	5964	1,2690	21445	6329
REVAP	5,66	7460	6949	1,4573	27602	6348

Fonte: (Autora).

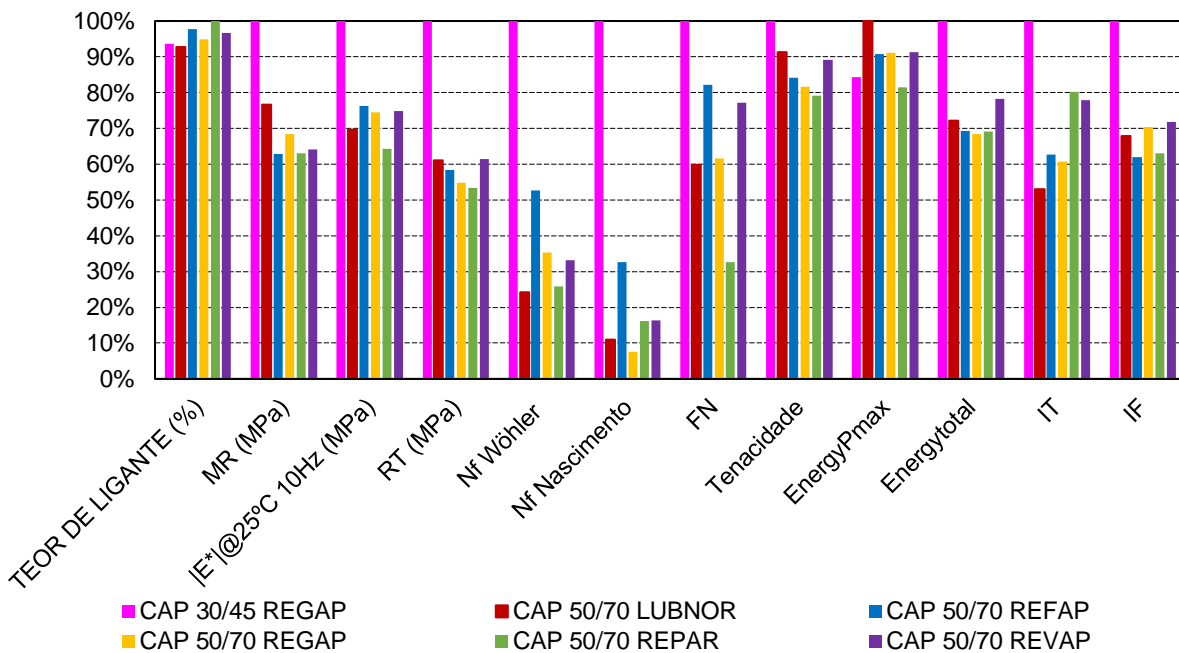
Os resultados de todos os ensaios foram normatizados (o valor mais alto considerado 100% enquanto os outros uma proporção deste valor) e plotados na Figura 68 com os resultados dos índices obtidos no ensaio de RT. Percebe-se que a mistura de CAP 30/45 também teve os melhores resultados, enquanto as misturas CAP 50/70 ficaram com resultados parecidos, constatando que os CAP 50/70 de todas as regiões possuem comportamentos análogos.

Não é possível afirmar que existe relação entre os índices IT, IF ou de energia com os resultados de fadiga ou deformação permanente desta pesquisa, tendo em vista que as misturas com CAPs 50/70 têm resultados parecidos onde o ranking varia sensivelmente para cada resultado de ensaio.

A inferência de dano por fadiga a partir dos resultados de  $|E^*| \cdot \sin \delta$  não se mostrou eficiente quando comparada aos resultados de dano por fadiga. Na inferência de dano por fadiga (Figura 48) as misturas de CAP 50/70 apresentam valores mais baixos, o que indicaria que estas teriam melhores comportamentos frente à fadiga com destaque para a mistura REPAR, que apresentaria o melhor comportamento. No entanto com os resultados do ensaio de fadiga tração-compressão verifica-se que a mistura com o melhor desempenho à fadiga foi a com CAP 30/45, em ambos os métodos de análise.

Na inferência à deformação permanente (Figura 49) a mistura que obteve o melhor comportamento foi a de CAP 30/45. Este resultado da inferência para a mistura de CAP 30/45 pode ser confirmado, pois o FN da mistura 30/45 foi o mais alto de todos, o que comprova que esta é a mistura mais resistente à deformação permanente. Assim como nos outros ensaios, as misturas de CAP 50/70 ficaram sobrepostas nas inferências, o que traria a ideia de que estas misturas estariam no mesmo patamar quanto à deformação permanente. No entanto, não é o que acontece no ensaio de FN, onde as misturas com CAP 50/70 se dividem em três patamares de comportamento.

Figura 68 - Comparação entre os resultados normalizados de todos os ensaios



Fonte: (Autora).

Destaca-se que nas curvas mestras de módulo dinâmico (Figura 44) a mistura REPAR teve os módulos mais baixos nas altas frequências, o que pode explicar seu resultado baixo no ensaio de FN.

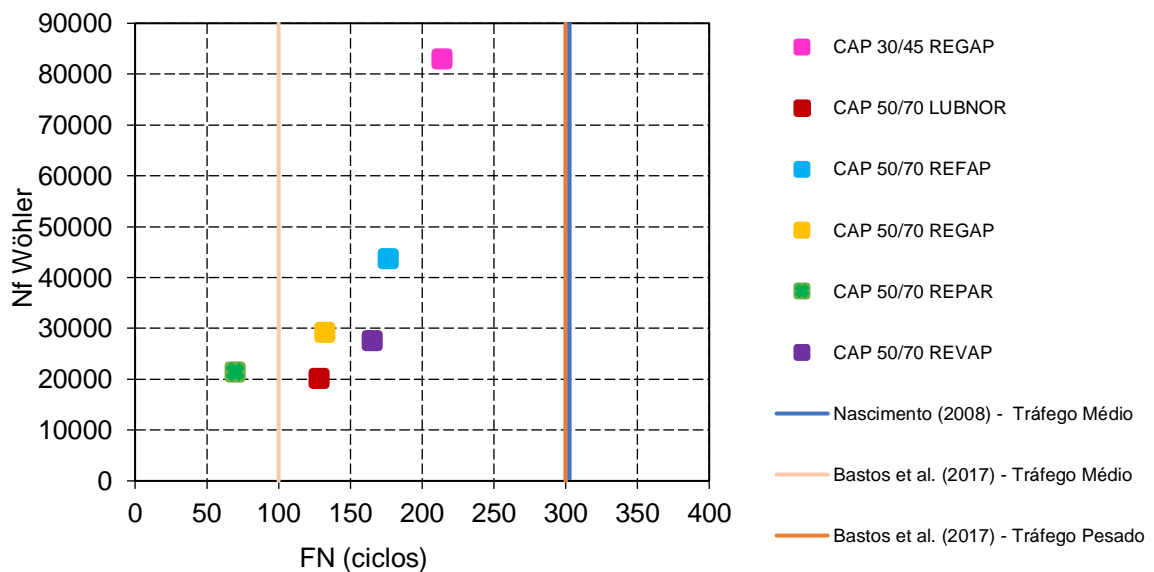
Na Figura 69 foram plotados os resultados de Fadiga versus os resultados de FN para situar as misturas asfálticas estudadas frente ao dano. Também foram adicionados os limites para FN disponíveis na literatura. Ainda não existem valores de Nf que limitem o tráfego para resultados de ensaio de fadiga. Percebe-se no gráfico que a mistura de CAP 30/45 teve o melhor desempenho à fadiga e deformação

permanente, seguida da mistura da REFAP. Os resultados de FN da mistura REPAR são baixos, mas em contrapartida ela apresenta melhor comportamento à fadiga quando comparada às outras misturas 50/70. Isso pode ser devido ao teor de CAP ser um pouco maior que das outras misturas. As misturas REGAP, REVAP e LUBNOR estão em um patamar muito parecido quanto aos dois tipos de dano.

Embora a mistura de CAP 30/45 tenha um bom comportamento quando comparada as misturas de CAP 50/70, esta não atinge o valor mínimo de FN para suportar tráfegos pesado e médio de Nascimento (2008), nem tráfego pesado conforme Bastos (2017).

Ainda, se observa que as misturas que têm o pior comportamento à fadiga não são as mesmas que têm o pior comportamento ao dano por deformação permanente.

Figura 69 - Verificação da resistência ao dano por deformação permanente e fadiga das misturas e critérios de *Flow Number*



Fonte: (Autora).

## 5 CONCLUSÕES

O estudo da influência dos ligantes asfálticos nas misturas asfálticas é recorrente em pesquisas desenvolvidas no Brasil e no mundo. A presente pesquisa poderá colaborar para o avanço do conhecimento das misturas e suas características atribuídas por CAPs produzidos em refinarias brasileiras. Além disto, o trabalho visa contribuir com dados e avaliações sob o ponto de vista da rigidez e comportamento das misturas asfálticas frente aos danos por fadiga e deformação permanente.

É importante ressaltar que determinar a viscoelasticidade das misturas desta pesquisa e utilizar o modelo 2S2P1D para avaliar os resultados favorece a disseminação dos conceitos e resultados de comportamento reológico das misturas brasileiras. Com a análise dos resultados de módulo dinâmico percebeu-se que as misturas com CAPs 50/70 apresentaram comportamentos muito próximos enquanto a mistura com CAP 30/45 apresentou maior rigidez. Conclui-se que as misturas com CAP 50/70 possuem comportamento viscoso e elástico similares, e que quando comparadas à mistura com CAP 30/45 são menos rígidas.

Realizar o ensaio de fadiga tração-compressão pelo método S-VECD é uma inovação no país e os resultados obtidos nesta pesquisa serão alvo de avaliações criteriosas. Além da abordagem clássica pelas curvas de Wöhler, o S-VECD foi utilizado como premissa de análise dos resultados de fadiga tração-compressão, onde a supremacia da mistura com CAP 30/45 é notável frente às misturas com CAPs 50/70, que se dispõem em três patamares de resistência, sendo a com CAP 50/70 da REFAP a mais resistente e as menos resistentes foram as misturas de CAP 50/70 da LUBNOR, REVAP e REGAP.

Com relação aos resultados de FN, a mistura com CAP 30/45 suportou maior número de ciclos quando comparada às misturas de CAP 50/70, que apresentaram entre si diferentes patamares de comportamento, sendo as misturas com CAP 50/70 da REFAP e da REVAP as com maior FN e a mistura com CAP 50/70 da REPAR com o menor FN.

O CAP 30/45 é notavelmente mais consistente que os 50/70. Seria um CAP mais adequado para aplicar em regiões em que o revestimento asfáltico atinge temperaturas elevadas pois tem uma menor suscetibilidade térmica; ou ainda em rodovias em que a estrutura do pavimento apresente baixas deflexões reversíveis,

pois é mais rígido; e também em vias de tráfego intenso, pois resiste melhor ao dano por fadiga e deformação permanente.

Este trabalho trouxe resultados de um conjunto de ensaios de caracterização mecânica de suma importância para a comunidade acadêmica, com resultados que vão desde a caracterização das misturas quanto à rigidez até a determinação de dano por fadiga e deformação permanente. Com os resultados do trabalho ficou evidente a necessidade de melhorias nas especificações brasileiras de ligantes asfálticos, que atualmente estão embasadas em ensaios empíricos que não consideram a rigidez nem o dano nos materiais.

Com relação às conclusões práticas, é possível afirmar que considerando os resultados de ensaios laboratoriais de dano e rigidez realizados nesta pesquisa, o CAP 50/70 da REFAP (o mais utilizado no Rio Grande do Sul) não é inferior aos outros CAPs brasileiros.

Ficou claro que, sob o ponto de vista da rigidez, todas as misturas com CAP 50/70 têm comportamentos similares. No entanto, sob o ponto de vista de dano há diferenças entre as misturas de CAP 50/70, mostrando que mesmo com rigidezes similares elas apresentam diferentes comportamento frente ao dano por fadiga e deformação permanente.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a elaboração desta dissertação de mestrado foram verificadas algumas possibilidades continuidade da pesquisa:

- Ensaiar os ligantes asfálticos para obter suas propriedades reológicas e comparar com os resultados da reologia das misturas e dos ensaios de dano realizados nesta pesquisa;
- Realizar ensaios de dano nos ligantes asfálticos e misturas de agregados finos (MAF) compostas pelos materiais desta pesquisa;
- Verificar a composição química dos ligantes asfálticos, principalmente com relação ao fracionamento SARA e confrontar com os resultados reológicos de ligantes e misturas;
- Dar continuidade a esta pesquisa utilizando CAM por polímero, borracha, TLA e outros para ter um espectro maior de caracterização de misturas asfálticas a quente;

- Considerar utilizar outras matrizes e tipos de agregados para realização do ensaio de fadiga tração-compressão;

- Na etapa de moldagem dos corpos de prova desta pesquisa, foram moldados 15 corpos de prova com 63 mm de altura e 100 mm de diâmetro para cada mistura, para realização de ensaios de fadiga por compressão diametral e não foram utilizados durante a pesquisa. Estes ensaios podem ser realizados e seus resultados confrontados com os resultados do ensaio de fadiga tração-compressão. O ensaio de fadiga por compressão diametral é importante no Brasil pois é o tipo de ensaio de fadiga usual na maioria dos laboratórios de pavimentação;

- E por fim, utilizar o Software FlexPave 1.0 para fazer análise mecânica considerando o dano contínuo viscoelástico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCR - Associação Brasileira de Concessionárias de Rodovias. Avaliação de cimentos asfálticos de petróleo para emprego em pavimentação. **Relatório técnico IMPERPAV Engenharia S/C Ltda.** São Paulo, SP, 2004.

ADVANCED ASPHALT TECHNOLOGIES (AAT), LLC. **A manual for design of hot mix asphalt with commentary, NCHRP Report 673**, National Cooperative Highway Research Program, Washington, 2011.

ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem.** Dissertação de Mestrado. UFSM – Santa Maria. Junho. 2016.

ALVES, V.A.H.S. **Avaliação da resistência a degradação mecânica de agregados da região metropolitana do Rio de Janeiro por técnicas digitais de imagens.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Maio, 2014.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO PP 42: Determination of Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders.** Washington, D. C., 2000.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. **Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Asphalt Mixtures Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT).** AASHTO Designation: TP - 79-15. 2015.

\_\_\_\_\_. **AASHTO Designation TP1-97, TP-6-94.** Superpave Series SP-1.

\_\_\_\_\_. **AASHTO M323. Superpave Volumetric Mix Design.** American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2013.

\_\_\_\_\_. **AASHTO MP-2-01. Standard Specifications for Superpave volumetric mix design.** American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2001.

\_\_\_\_\_. **AASHTO R 28: Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV).** American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2002.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 209-15 - Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot Mix Asphalt,** 2015.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 313-12 (R2016). Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR).** American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2016.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 314: Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)**. Washington, D. C., 2000.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 342-11. Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures**. Washington, D. C., 2011.

\_\_\_\_\_. **AASHTO TP 101-12 (R2016). Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2016.

\_\_\_\_\_. **AASHTO TP 107-14 (R2016). Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2016.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 209-15 - Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Hot Mix Asphalt**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2015.

\_\_\_\_\_. **AASHTO T 315: Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 4124 Standard test for separation of asphalts into four fractions**. American Society for Testing and Materials. ASTM, 2001.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 6521-2013. Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**. American Society for Testing and Materials.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 6648-08. Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)**. American Society for Testing and Materials. ASTM.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 7175-08. Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. American Society for Testing and Materials. ASTM.

\_\_\_\_\_. **ASTM D 7405-10. Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer**. American Society for Testing and Materials. ASTM.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. **Planilhas de produção de derivados de petróleo por município**. Página na web. <  
<http://www.anp.gov.br/wwwanp/petroleo-e-derivados2/asfalto>> Acesso em 10 de outubro de 2017.



ASPHALT INSTITUTE. **Superpave Level 1 Mix Design (SP-2)**. Sixth Edition, USA, 1995.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook**. MS-4. 7th. Asphalt Institute, USA, 2007.

ASPHALT INSTITUTE. **The Bailey Method Achieving Volumetrics and HMA Compactibility**. Asphalt Institute, Lexington KY USA, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6296: **Materiais Betuminosos – Determinação da massa específica e densidade relativa**. ABNT, RJ, 2004.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 6560: **Materiais Betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento: anel e bola**. ABNT, RJ, 2000.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 6473:2003 - **Cal Virgem E Cal Hidratada - Análise Química**. ABNT, RJ, 2003.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 16505:2016 **Misturas asfálticas - Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida**. Rio de Janeiro, 2016.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 15619:2012 **Misturas asfálticas – Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas**. ABNT/NBR 15619:2012. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. ABNT NBR 15184: **Materiais Betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro, 2004.

BABADOPULOS, L. F. A. **Avaliação do modelo viscoelástico linear aplicado a misturas asfálticas utilizadas em revestimentos de pavimentos no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Ceará. 2013.

BABADOPULOS, L. F. A. L. **A contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. M.Sc. Thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brazil, 2014.

Bahia, H. U., H. Zhai, S. Kose, and K. Bonnetti. **Non-linear Viscoelastic and Fatigue Properties of Asphalt Binders**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 68, 1999, pp. 1–34.

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

BARROS, L. M. de. **Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho pelo critério de *Flow Number* de misturas quentes e mornas**. Dissertação PPGc Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017 Porto Alegre.

- BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. e NASCIMENTO, L. A. H. **Crerios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laborat3rio a partir do desempenho em campo.** Revista Transportes, v. 25, n. 2, 2017.
- BECKER, M. Y.; MÜLLER, J. A.; RODRIGUEZ, Y. **Use of rheological compatibility criteria to study SBS modified asphalts.** Journal of applied polymer science, New York, v. 90, n. 7, p. 1772-1782, 2003.
- BERNUCCI, L.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** 504 f. 3ª Reimpress3o. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2010.
- BESSA; I.S.; CASTELO BRANCO, V.T.F.; SOARES, J.B. **“Evaluation of polishing and degradation resistance of natural aggregates and steel slag using AIMS”.** 2nd Symposium on Asphalt Pavements and Environment, Fortaleza, 2012.
- BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales.** 2014. 148p. Dissertaç3o (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018. N3o publicado.
- BOHN, K. A. **Utilizaç3o de material fresado em misturas asfálticas mornas.** Dissertaç3o de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2016.
- BONAQUIST, R. **Evaluation of Flow Number (FN) as a discriminating HMA mixture property. Wisconsin Highway Research Program.** Projeto N3mero 0092-09-01, 2012.
- BRONDANI, C. **Estudo laboratorial da influênci da areia natural na viscoelasticidade das misturas asfálticas.** Trabalho de conclus3o de curso. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2016.
- BRUXEL, D. F. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados atraves de ensaios laboratoriais e de análise de desempenho.** 2015. 129 p. Dissertaç3o de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduaç3o em Engenharia Civil, Santa Maria, RS,2015.
- BRÛLÉ, B.; MIGLIORI, F. SUCH C. **Composition structure et component des bitumes routiers.** Bull Liaison Labo P. et Ch., n. 141, p. 81-120, 1986.
- CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilizaç3o de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente.** 2016. 152 p. Dissertaç3o de mestrado.

Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2016.

CORBETT L.W. **Composition of asphalt based on generic fractionation using solvent deasphalting, elution-adsorption chromatography and densimetric characterization.** An. Chem., v.41 p576, 1969.

CUNHA, M. C.; ZEGARRA, J. R. E.; FERNANDES JR., J. L. **Revisão da seleção do grau de desempenho (PG) de ligantes asfálticos por estados do Brasil.** XXI Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

DANIEL, J. S., KIM, Y. R. (2004) **Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic, continuum damage model (with discussion).** Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists Volume: 71 Technologists (AAPT) ISSN: 0270-2932

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

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 136/2010. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. DNIT 031/2006. **Pavimentos Flexíveis - Concreto asfáltico.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Especificação de Serviço, 2006.

\_\_\_\_\_. DNIT 095/2006. **Cimento Asfáltico de Petróleo – Especificação de Material.** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 035/98: **Agregados – Determinação da abrasão Los Angeles.** Rio de Janeiro, 1998.

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

\_\_\_\_\_. DNIT 155/2010-ME - Material asfáltico – **Determinação da penetração – Método de ensaio.** Norma. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2010.

\_\_\_\_\_. DNER-ME 148/1994 - Material betuminoso - **determinação dos pontos de fulgor e de combustão (vaso aberto Cleveland).** Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 1994.

DI BENEDETTO, H., GABET, T., GRENFELL, J., PERRATON, D., SAUZÉAT, C., & BODIN, D. **Mechanical testing of bituminous mixtures.** In M. N. Partl, H. U. Bahia, F. Canestrari, C. de la Roche, H. Di Benedetto, H. Piber, & D. Sybilski (Eds.), Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials: State-of-

the-Art Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB Series (pp. 143-256). Dordrecht: Springer 2013.

DI BENEDETTO, H.; CORTÉ, J. F. **Matériaux routiers**. Tome 2. 2005. 283p.

DI BENEDETTO, H.; DE LA ROCHE, C.; BAAJ, H.; PRONK, A.; LUNDSTRÖM, R. **Fatigue of Bituminous Mixtures**. Materials and Structures, v. 37, p. 202-216, apr. 2004.

DI BENEDETTO, H.; OLARD, F.; SAUZÉAT, C.; DELAPORTE, B. **Linear Viscoelastic Behaviour of Bituminous Materials: from binders to mixes**. Road Materials and Pavements Design. Departement Génie Civil et Bâtiment, Ecole Nationale des TPE (ENTPE), 2004. 41p.

ERKENS, S.M.J.G., 2002. **Asphalt Concrete Response - Determining, Modelling and Predicting**, PhD. thesis Delft University of Technology.

EN 12697-24:2012. (2012). Bituminous mixtures. **Test methods for hot mix asphalt**. Part 24: Resistance to fatigue. 2012

EULA – European Lime Association. **Hydrated lime: a proven additive for durable asphalt pavements**. Critical literature review. Report to the European Lime Association/Asphalt Task Force. 2010.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha**. Tese de Doutorado, Engenharia Civil – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, FHWA. Superpave **Binder Specification**. 115p. Washington, D.C. [www.fhrc.gov/](http://www.fhrc.gov/). 2002.

FERNANDES, M. **Characterization of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumens**. In PPS 2004 Americas Regional Meeting, Florianópolis, 2004.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SISPAV**. 315 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

GAESTEL, C., SMADJAR, R., LAMMINAN, K. A. **Contribution à la connaissance des propriétés des bitumens routiers**. Bull. Laboratoire des ponts e chaussées, v.466, p.85-97, 1971.

GODOI, L. C.. **Ensaio de flexão em amostra Semicircular para avaliação de trincamento de misturas asfálticas**. Dissertação PPGeC Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017 Porto Alegre.

HUNTER, R. N.. **Bituminous Mixtures and road construction**. English. London 1994.

ILLINOIS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Illinois Flexibility index Test Procedure - 405** (2015).

JOLIET, Y., MALLOT, M. **Precautions when interpreting rutting results from the LCPC traffic simulator**. 2° Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona, 2000.

KAMEL, I. N.; MILLER, L. J.; **Comparative Performance of Pavement Mixes Containing Conventional and Engineered Asphalts**. Transportation Research Board. n° 1454, p 172-180. 1994.

KIM, S. **Identification and assessment of the dominant aggregate size range of asphalt mixture**. Phd. University of Florida, 2006.

KIM, Y. R. **Modeling of asphalt concrete**. American Society of Civil Engineers, McGraw-Hill Construction, 1<sup>a</sup> Ed. 2009.

KIM, Richard; Wen & Y Haifang. (2002). **Fracture Energy from Indirect Tension Testing**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. 71. 779-793.

KIM, Y.-R., Little, D. N., & Song, I. (2003). **Effect of mineral fillers on fatigue resistance and fundamental material characteristics: Mechanistic evaluation**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1832, 1-8. DOI: 10.3141/1832-01.

KING, G.; KING, R. D. H.; PAVLOVICH, A. L. E.; PRITHVI, K. **Additives in asphalt. Asphalt Paving Technology**, Lino Lakes, v. 68A, p. 32-69, 1999.

LEITE, L. F. M. e TONIAL, I. A. **Qualidade dos cimentos asfálticos brasileiros segundo as especificações SHRP**. 12º Encontro do asfalto do instituto brasileiro de petróleo. 1994.

LEITE, Leni F. M. **Estudos reológicos de cimentos asfálticos**. Tese de doutorado. Rio de Janeiro, RJ, 1990.

LESUEUR, D. **The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification**. Advances in Colloid and Interface Science, vol.145, p. 42-82, 2009.

LEWANDOWSKI, L. H. **Polymer Modification of Paving Asphalt Binders**. Rubber Chemistry and Technology. vol. 67, p. 447-480, 1994.

MAHMOUD, E.; GATES, L.; MASAD, E.; ERDOGAN, S.; GARBOCZI, E. **"Comprehensive evaluation of AIMS texture, angularity, and dimension measurements"**. Journal of Materials in Civil Engineering. April, 2010.

MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends**. Tese de Doudorado. l'École Nationale des Travaux Publics de l'État. 2014.

MARTINS, A. T. **Contribuição para a Validação do Ensaio de Resistência ao Dano por Fadiga para Ligantes Asfálticos**. Dissertação de Mestrado - COPPE-UFRJ, 2014.

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

MENDES, L. O. **Utilização do Método Bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas**. 2011. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Área de concentração: Ambiente Construído) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

MOMM, L. **Estudo dos Efeitos da Granulometria sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. São Paulo, 1998.

MOTTA, L. M. G.; Tonial, I.; Leite, L. M. F e Constantino, R. S. (1996) **Princípios do Projeto e Análise Superpave de Misturas Asfálticas**. Tradução Comentada, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1996.

NASCIMENTO, L. A. H. do. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso compactador giratório e foco na deformação permanente**. 2008. 204 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NASCIMENTO, L. A. H. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil. Dissertation (Doctor of Philosophy)**. Graduate Faculty of North Carolina State University, 2015.

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

NASCIMENTO, L. A.. **Caracterização Avançada de Materiais Asfálticos: Dano por Fadiga**. Curso. Universidade Federal de Santa Maria. 30 e 31 de março de 2016.

OLARD, F.; DI BENEDETTO, H. **General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binders and mixes**. Road Materials and Pavement Design, 4, p 185-224. 2003.

ONOFRE, F. C. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2012.

OSMARI, P. H.. **Caracterização química, reológica e de morfologia superficial de ligantes asfálticos modificados por diferentes agentes rejuvenescedores.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

PAZOS, A. G.. **Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas.** Dissertação de mestrado. COPPE. UFRJ, Rio de Janeiro, 2015.

PERRET, J. **Déformations dos Couches Bitumens au Passage D'une Charge de Trafic.** 2003. 263 f. Tese (Doutorado em engenharia civil). É cole Polytechnique Fédéral de Lausanne, Lausanne, 2003.

PETROBRAS. **Refinarias brasileiras.** 2016. Página na web. Link: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principaioperacoes/refinarias/>> Acesso em 11/11/2016.

PINHEIRO, J.H.M. **Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco).** 2004. Dissertação (de Mestrado) - Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.

PUTMAN Bradley J., Serji N. AMIRKHANIAN. **Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures.** Resources, Conservation and Recycling, Volume 42, Issue 3,2004, Pages 265-274,ISSN 0921-3449.

PREUSSLER, E. S. **Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço.** Tese (Doutorado) COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, 1983.

RIBAS, J. **Parâmetros elásticos típicos de materiais de pavimentos flexíveis do Rio Grande do Sul e sua aplicação em uma análise de custo/benefício.** Dissertação. Universidade Federal de Santa Maria. 2014.

ROBERTS, F. L., KANDHAL, P. S., BROWN, E. R., LEE, D. Y., KENNEDY, T. W., **Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction.** 2ª edição, Lanham, Maryland, USA, National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, 1996.

SANTOS, T. A. **Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no Estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

SCHUSTER, S. L. **Estudo da influência da areia natural nas propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2016.

SHRP-A-410. Strategic Highway Research Program. **Superior Performing Asphalt Pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research Program.** Washington, DC. 1994.

SIDES, A.; J. UZAN E M. PERL. **A comprehensive visco-elastoplastic characterization of sand-asphalt under compression and tension cyclic loading.** ASTM Journal of Testing and Evaluation (n° 13), p. 59, 1985.

SOMÉ, S.C.; GAUDEFROY, V.; PAVOINE, A. - **Viscoelastic behavior of fluxed asphalt binders and mixes. 22ème Congrès Français de Mécanique.** Lyon, France, 2015.

SPECHT, L. P.; SILVA, L. S.; FORTES, M.; CERATTI, J. A. P. **Polímeros como modificadores asfálticos.** Transportes, Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p. 84-106, 2002.

SPECHT, LUCIANO P. et. al. **Modeling of Asphalt-rubber Rotational Viscosity by Statistical Analysis and Neural Networks.** Materials Research, Vol. 10, N° 1, p. 69-74, 2007.

SPECHT, L. P., Lucas F. de A.L. Babadopulos, Hervé Di Benedetto, Cédric Sauzéat, Jorge Barbosa Soares. **Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes.** Construction and Building Materials, Volume 149, 2017, Pages 648-658, ISSN 0950-0618.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R. **Analytical techniques for determining the endurance limit of hot mix asphalt concrete.** In: 2nd International Conference on Perpetual Pavements. Columbus, Ohio, Estados Unidos, 2009.

UNDERWOOD, B., Baek, C., and Kim, Y., 2012. **Simplified viscoelastic continuum damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis.** Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2296, 36–45. doi:10.3141/2296-04. 2012.

WHITEOAK, D. **The SHELL Bitumen Handbook.** 1<sup>a</sup> ed. Reprinted, Inglaterra, SHELL, 1991.

WOLDEKIDAN, M. F. **Response modelling of bitumen, bituminous mastic and mortar.** Dissertação (Mestrado). Section of Road and Railway Engineering, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, The Netherlands. 260f. 2011.

YEN, T. F.; EDERMAN, J.G.; POLLACK, S. S. **Investigation of the structure of petroleum asphaltene by X-ray diffraction.** Analytical Chemistry, v.33, p. 1587-1594, 1961.

YODER E. J., M. W. WITCZAK. **Principles of Pavement Design.** Jan 1, 1975 - Technology & Engineering - 711 pages.



## APÊNDICE A – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO COMPLEXO

Tabela 35 - Resultados do ensaio de módulo complexo da mistura CAP 30/45 REGAP

CAP 30/45 REGAP					
Temp.	Freq. (Hz)	E*  (MPa) CP 1	E*  (MPa) CP 2	δ (°) CP 1	δ (°) CP 2
-10 °C	25	24498	24715	1,43	1,30
-10 °C	20	24347	24677	1,56	1,46
-10 °C	10	24038	24531	1,72	1,43
-10 °C	5	23700	24225	1,95	1,72
-10 °C	2	23215	23746	2,30	2,03
-10 °C	1	22792	23366	2,59	2,31
-10 °C	0,5	22353	22937	2,84	2,61
-10 °C	0,2	21698	22321	3,31	3,00
-10 °C	0,1	21144	21719	3,65	3,32
-10 °C	0,01	19661	20197	4,86	4,19
4 °C	25	20612	20612	3,94	3,94
4 °C	20	20177	21443	4,41	3,82
4 °C	10	19724	20787	4,69	4,32
4 °C	5	18966	20066	5,30	4,91
4 °C	2	17882	19001	6,16	5,71
4 °C	1	16975	18170	6,85	6,33
4 °C	0,5	16044	17276	7,63	7,08
4 °C	0,2	14794	15998	8,71	8,08
4 °C	0,1	13940	15101	9,60	8,93
4 °C	0,01	11249	12202	13,1	12,2
21 °C	25	13216	13216	11,16	11,16
21 °C	20	12950	13499	11,73	10,65
21 °C	10	11828	12306	13,24	12,02
21 °C	5	10691	11033	14,95	13,52
21 °C	2	9190	9438	17,29	16,05
21 °C	1	8036	8293	19,27	18,56
21 °C	0,5	6930	7150	21,37	21,20
21 °C	0,2	5491	5701	24,47	24,99
21 °C	0,1	4440	4625	27,00	27,70
21 °C	0,01	1651	1846	35,63	36,35
37 °C	25	5028	5028	31,35	31,35
37 °C	20	3982	4702	32,29	31,33
37 °C	10	3084	3713	34,64	33,69
37 °C	5	2287	2836	37,09	36,19
37 °C	2	1454	1874	40,41	39,04
37 °C	1	1002	1317	42,25	40,71
37 °C	0,5	691,3	904,3	43,04	41,67
37 °C	0,2	420,7	535,4	42,34	42,42
37 °C	0,1	283,7	349,6	39,34	42,33
37 °C	0,01	110,3	112,2	9,61	31,10
54 °C	25	703,6	703,6	45,93	45,93
54 °C	20	1013	639,6	44,39	43,89
54 °C	10	672,1	407,1	44,41	43,62
54 °C	5	433,4	258,3	45,09	43,27
54 °C	2	242,9	145,2	45,02	40,93
54 °C	1	171,8	106,0	40,19	36,94
54 °C	0,5	126,7	80,1	33,59	32,78
54 °C	0,2	86,6	59,4	14,55	28,09
54 °C	0,1	58,5	48,1	8,83	23,85
54 °C	0,01	36,8	33,0	22,51	7,65

Fonte: (Autora).

Tabela 36 - Resultados do ensaio de módulo complexo da mistura CAP 50/70 LUBNOR

CAP 50/70 LUBNOR					
Temp.	Freq. (Hz)	E*  (MPa) CP 1	E*  (MPa) CP 2	$\delta$ (°) CP 1	$\delta$ (°) CP 2
-10 °C	25	24422	24216	1,55	1,93
-10 °C	20	24250	25319	1,63	0,70
-10 °C	10	23931	25071	1,94	1,34
-10 °C	5	23515	24733	2,24	1,88
-10 °C	2	22920	23965	2,70	2,69
-10 °C	1	22411	23355	3,06	3,07
-10 °C	0,5	21834	22631	3,51	3,49
-10 °C	0,2	20989	21741	4,18	4,17
-10 °C	0,1	20231	21026	4,72	4,65
-10 °C	0,01	18184	18852	6,49	6,72
4 °C	25	18146	19933	5,62	4,85
4 °C	20	18120	19731	6,13	5,09
4 °C	10	17267	18994	7,08	5,90
4 °C	5	16316	18115	8,10	6,83
4 °C	2	14966	16806	9,62	8,16
4 °C	1	13914	15758	10,97	9,33
4 °C	0,5	12782	14633	12,5	10,64
4 °C	0,2	11257	13070	14,73	12,66
4 °C	0,1	10230	11934	16,50	14,41
4 °C	0,01	7364	8220	22,30	20,83
21 °C	25	10628	10628	17,06	17,06
21 °C	20	10191	11545	17,86	15,8
21 °C	10	8900	10060	20,35	18,25
21 °C	5	7601	8635	22,97	20,76
21 °C	2	5974	6839	26,56	24,70
21 °C	1	4844	5596	29,32	27,93
21 °C	0,5	3808	4425	31,96	31,23
21 °C	0,2	2609	3100	35,37	35,78
21 °C	0,1	1856	2223	37,60	39,25
21 °C	0,01	466,5	580,1	39,50	46,76
37 °C	25	2297	2629	43,96	41,46
37 °C	20	2209	2478	40,90	42,79
37 °C	10	1553	1774	42,04	49,30
37 °C	5	1044	1173	43,65	43,65
37 °C	2	589,2	638,3	45,9	45,90
37 °C	1	382,2	422,5	45,43	45,43
37 °C	0,5	249,1	295,6	43,77	52,34
37 °C	0,2	147,6	179,8	40,18	42,04
37 °C	0,1	101,3	121,7	36,66	54,00
37 °C	0,01	48,5	31,0	26,79	24,45
54 °C	25	431,7	423,8	42,45	42,45
54 °C	20	384,2	420	47,23	49,07
54 °C	10	255,2	290,7	43,93	44,06
54 °C	5	160,1	183,6	41,97	42,54
54 °C	2	94,2	109,4	34,69	34,27
54 °C	1	54,7	54,7	32,96	32,96
54 °C	0,5	43,8	43,8	43,16	43,16
54 °C	0,2	12,4	29,5	27,81	24,79
54 °C	0,1	11,5	11,5	18,38	18,38
54 °C	0,01	12	12,0	6,03	17,08

Fonte: (Autora).

Tabela 37 - Resultados do ensaio de módulo complexo da mistura CAP 50/70 REFAP

CAP 50/70 REFAP					
Temp.	Freq. (Hz)	E*  (MPa) CP 1	E*  (MPa) CP 2	$\delta$ (°) CP 1	$\delta$ (°) CP 2
-10 °C	25	23493	25807	1,94	1,44
-10 °C	20	23406	25573	1,87	1,66
-10 °C	10	23065	25281	1,98	1,91
-10 °C	5	22713	24865	2,26	2,20
-10 °C	2	22128	24262	2,66	2,59
-10 °C	1	23765	23765	2,95	2,95
-10 °C	0,5	21070	23142	3,39	3,34
-10 °C	0,2	20323	22262	3,95	3,83
-10 °C	0,1	19588	21686	4,36	4,21
-10 °C	0,01	17765	19689	5,69	5,45
4 °C	25	18249	21426	5,00	4,76
4 °C	20	18175	21048	5,64	5,03
4 °C	10	17479	20191	6,25	5,60
4 °C	5	16677	19290	6,98	6,28
4 °C	2	15511	18015	8,09	7,23
4 °C	1	14585	16967	8,99	8,07
4 °C	0,5	13605	15868	9,99	8,97
4 °C	0,2	12259	14385	11,42	10,25
4 °C	0,1	11363	13360	12,41	11,28
4 °C	0,01	8173	9836	16,8	16,04
21 °C	25	12459	12459	14,08	14,08
21 °C	20	9559	9559	16,51	16,51
21 °C	10	8380	10650	18,6	16,37
21 °C	5	7216	9308	20,44	18,15
21 °C	2	5795	7694	23,09	20,78
21 °C	1	4820	6538	25,18	22,81
21 °C	0,5	3943	5434	27,7	24,96
21 °C	0,2	2910	4136	31,38	28,06
21 °C	0,1	2224	3217	33,91	30,53
21 °C	0,01	1114	1114	36,57	36,57
37 °C	25	2933	2933	48,89	48,89
37 °C	20	2785	2785	41,4	41,4
37 °C	10	1968	1968	36,69	36,69
37 °C	5	1339	1339	37,16	37,16
37 °C	2	787,2	787,2	38,11	38,11
37 °C	1	500,1	500,1	37,77	37,77
37 °C	0,5	347,2	347,2	32,44	32,44
37 °C	0,2	212,3	212,3	29,76	29,76
37 °C	0,1	139,4	139,4	34,98	34,98
37 °C	0,01	52,1	52,1	30,93	30,93
54 °C	25	543,8	543,8	43,25	43,25
54 °C	20	499,3	499,3	40,48	40,48
54 °C	10	214	330,1	39,9	37,82
54 °C	5	142,7	213,5	36,33	36,15
54 °C	2	89,4	125,3	30,17	32,23
54 °C	1	72,7	95,2	21,98	21,53
54 °C	0,5	61,9	82,8	20,00	17,83
54 °C	0,2	50,8	68,8	16,62	13,00
54 °C	0,1	46,7	61,2	10,77	10,05
54 °C	0,01	29,5	52,0	14,24	6,31

Fonte: (Autora).

Tabela 38 - Resultados do ensaio de módulo complexo da mistura CAP 50/70 REGAP

CAP 50/70 REGAP					
Temp.	Freq. (Hz)	E*  (MPa) CP 1	E*  (MPa) CP 2	δ (°) CP 1	δ (°) CP 2
-10 °C	25	22936	22023	2,10	0,55
-10 °C	20	22836	22720	2,19	2,80
-10 °C	10	22460	22622	2,49	0,70
-10 °C	5	22008	22463	2,78	1,67
-10 °C	2	21367	21791	3,27	3,11
-10 °C	1	20807	21234	3,67	3,49
-10 °C	0,5	20226	20695	4,08	3,84
-10 °C	0,2	19373	19850	4,75	4,59
-10 °C	0,1	18700	19170	5,21	5,08
-10 °C	0,01	17089	17460	6,30	6,40
4 °C	25	18470	-	5,39	-
4 °C	20	18227	-	5,57	-
4 °C	10	17492	-	6,38	-
4 °C	5	16625	-	7,18	-
4 °C	2	15393	16026	8,28	7,12
4 °C	1	14392	15094	9,28	8,59
4 °C	0,5	13335	14104	10,42	9,90
4 °C	0,2	11986	12720	12,01	12,00
4 °C	0,1	11136	11709	13,18	13,38
4 °C	0,01	8138	8529	17,50	18,92
21 °C	25	12276	11609	12,11	15,05
21 °C	20	11480	11158	14,07	15,49
21 °C	10	10111	9903	16,22	17,29
21 °C	5	8740	8692	18,62	19,26
21 °C	2	7034	7099	21,74	22,13
21 °C	1	5824	5954	24,84	24,46
21 °C	0,5	4728	4884	28,00	26,90
21 °C	0,2	3459	3602	32,33	30,28
21 °C	0,1	2603	2709	35,47	32,72
21 °C	0,01	803,1	805	46,61	37,66
37 °C	25	2456	2498	39,44	41,91
37 °C	20	2228	2410	39,02	38,88
37 °C	10	1582	1679	40,64	41,37
37 °C	5	1079	1116	42,04	43,96
37 °C	2	628,2	626,7	43,38	47,06
37 °C	1	422,9	412,6	42,62	47,41
37 °C	0,5	287,2	285,4	41,00	47,14
37 °C	0,2	178,5	183,7	37,71	40,02
37 °C	0,1	126,7	133,0	34,37	35,28
37 °C	0,01	60,7	64,2	23,95	8,73
54 °C	25	531,3	473,8	46,34	43,45
54 °C	20	480,3	445,9	43,45	40,19
54 °C	10	323,9	296,3	40,76	37,55
54 °C	5	215,8	195,5	38,24	35,30
54 °C	2	128,8	114,1	34,34	32,41
54 °C	1	101,6	90,3	27,71	27,38
54 °C	0,5	82,2	75,3	22,58	23,17
54 °C	0,2	65	60,9	17,75	19,62
54 °C	0,1	59,6	51,1	16,06	18,10
54 °C	0,01	40,8	35,7	11,72	20,62

Fonte: (Autora).

Tabela 39 - Resultados do ensaio de módulo complexo da mistura CAP 50/70 REPAR

CAP 50/70 REPAR					
Temp.	Freq. (Hz)	E*  (MPa) CP 1	E*  (MPa) CP 2	$\delta$ (°) CP 1	$\delta$ (°) CP 2
-10 °C	25	21795	19795	1,57	3,05
-10 °C	20	21725	19892	1,69	0,00
-10 °C	10	21375	19932	2,08	2,54
-10 °C	5	21002	19642	2,29	3,03
-10 °C	2	20434	19038	2,73	4,07
-10 °C	1	19987	18523	3,11	4,71
-10 °C	0,5	19498	17899	3,51	3,73
-10 °C	0,2	18656	17004	4,10	4,01
-10 °C	0,1	18054	16412	4,54	4,44
-10 °C	0,01	16518	15164	5,80	6,32
4 °C	25	16648	17258	5,72	2,70
4 °C	20	16460	17217	5,90	2,13
4 °C	10	15715	17129	6,64	5,48
4 °C	5	14945	16444	7,49	6,07
4 °C	2	13815	15313	8,69	7,39
4 °C	1	12917	14472	9,75	8,44
4 °C	0,5	12001	13555	10,88	9,35
4 °C	0,2	10791	12289	12,45	10,97
4 °C	0,1	10049	11338	13,52	12,14
4 °C	0,01	7505	8145	18,05	17,63
21 °C	25	9119	9119	15,09	15,09
21 °C	20	9827	9094	14,34	16,78
21 °C	10	9002	7958	15,92	18,80
21 °C	5	7814	6865	17,50	20,83
21 °C	2	6368	5458	20,36	23,67
21 °C	1	5382	4460	23,00	26,10
21 °C	0,5	4417	3584	25,44	29,32
21 °C	0,2	3298	2565	30,23	35,61
21 °C	0,1	2450	1928	28,99	47,30
21 °C	0,01	755,4	645,3	30,50	20,70
37 °C	25	2739	2458	37,69	38,75
37 °C	20	2621	2310	36,49	38,19
37 °C	10	1914	1674	38,80	40,04
37 °C	5	1348	1174	42,02	42,28
37 °C	2	812	707,9	46,51	44,69
37 °C	1	542,8	479,7	48,32	45,00
37 °C	0,5	373,9	329,4	49,24	43,94
37 °C	0,2	230,4	203,9	42,40	41,20
37 °C	0,1	147,3	141,5	13,28	37,74
37 °C	0,01	50,3	63,6	26,72	17,02
54 °C	25	452,4	498,9	46,34	40,82
54 °C	20	440,8	466,0	41,64	37,88
54 °C	10	291,1	322,0	39,38	35,60
54 °C	5	187,3	216,2	38,24	34,16
54 °C	2	111,9	127,5	34,21	32,72
54 °C	1	87,2	98,0	27,85	28,49
54 °C	0,5	72,6	83,4	23,67	21,93
54 °C	0,2	58,6	67,8	19,01	14,89
54 °C	0,1	51,7	60,7	15,25	7,44
54 °C	0,01	40,9	41,7	2,350	30,22

Fonte: (Autora).

Tabela 40 - Resultados do ensaio de módulo complexo da mistura CAP 50/70 REVAP

CAP 50/70 REVAP					
Temp.	Freq. (Hz)	E*  (MPa) CP 1	E*  (MPa) CP 2	$\delta$ (°) CP 1	$\delta$ (°) CP 2
-10 °C	25	23610	22400	2,13	0,83
-10 °C	20	23427	22472	2,29	2,09
-10 °C	10	22975	22095	0,60	2,52
-10 °C	5	22458	21722	2,92	2,91
-10 °C	2	21730	21060	3,43	3,37
-10 °C	1	21099	20486	3,81	3,73
-10 °C	0,5	20439	19889	4,20	4,15
-10 °C	0,2	19496	19001	4,89	4,69
-10 °C	0,1	18789	18392	5,38	5,18
-10 °C	0,01	16860	16505	6,84	6,75
4 °C	25	18076	16989	5,56	5,37
4 °C	20	17852	16933	5,70	5,51
4 °C	10	17095	16282	6,49	6,15
4 °C	5	16257	15561	7,23	6,84
4 °C	2	15053	14505	8,39	7,96
4 °C	1	14111	13690	9,36	8,95
4 °C	0,5	13114	12826	10,5	10,06
4 °C	0,2	11755	11650	12,21	11,77
4 °C	0,1	10744	10744	13,68	13,23
4 °C	0,01	7519	7659	19,36	19,27
21 °C	25	10452	10794	14,86	13,85
21 °C	20	10060	10475	15,60	14,75
21 °C	10	8849	9373	18,10	16,78
21 °C	5	7663	8275	20,45	19,26
21 °C	2	6159	6808	23,95	22,31
21 °C	1	5097	5751	27,01	24,73
21 °C	0,5	4126	4741	30,14	27,09
21 °C	0,2	2970	3513	34,86	30,33
21 °C	0,1	2208	2675	38,31	32,58
21 °C	0,01	637,6	855,8	49,15	37,18
37 °C	25	1907	3313	38,53	35,39
37 °C	10	1976	2194	40,77	37,92
37 °C	5	1365	1568	43,57	40,33
37 °C	2	794,6	963,3	49,07	43,74
37 °C	1	515,4	647,7	54,80	44,81
37 °C	0,5	355,4	435,8	51,64	43,72
37 °C	0,2	216,9	248,1	45,90	37,16
37 °C	0,1	141,0	158,1	32,78	32,27
54 °C	25	-	812,8	-	42,58
54 °C	20	539,7	738,7	45,07	39,98
54 °C	10	356,6	496,4	43,06	39,21
54 °C	5	230,9	324,3	42,07	38,65
54 °C	2	130,4	186,1	38,85	37,16
54 °C	1	95,4	136,0	24,4	32,56
54 °C	0,5	76,2	104,2	18,05	27,91
54 °C	0,2	61,1	79,3	9,47	22,14
54 °C	0,1	51,0	66,2	2,58	18,41
54 °C	0,01	35,1	47,1	42,95	11,38

Fonte: (Autora).

## ANEXO A – LAUDOS DOS CAP

Figura 70 - Laudo do CAP 30/45 da REGAP

<b>BR PETROBRAS</b>		Número: 1273-16 G		
		CÓPIA		
<b>CERTIFICADO DE ENSAIO</b>				
Produto: CIMENTO ASFALTICO 30/45		Código: 71J		
Local de Amostragem: TQ 250116E		Laboratório: REGAP/OT/QP		
Data/ hora Amostragem: 03/07/16 21:30		Endereço: Rodovia Fernão Dias Km 427		
Data/ hora Recebimento: 03/07/16 22:12		Betim/MG		
		Telefone: (0XX31) 3529-4420 Fax: (00X31) 3529-4151		
Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PERMEABILIDADE	D 5	30 a 45	38	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	62 min	63,2	grau C
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135GC-SP21 20RPM	D 4402	374 min	430	gr
VISCOSIDADE BROOKFIELD 150 GC-SP21	D 4402	203 min	211	gr
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177GC SP21	D 4402	76 a 285	78	gr
RTFOT PENETRAÇÃO RETIDA	D 5	60 min	78	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	8 max	6,2	grau C
RTFOT - DUCTILIDADE A 25GC	D 113	10 min	>180	cm
RTFOT VARIAÇÃO EM % MASSA	D 2072	0,5 max	-1,168	%
DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	60 min	>180	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	99,5 min	99,9	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min	304	grau C
ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE TÉRMICA	X 816	-1,5 a 0,7	-1,5	N/A
DENSIDADE RELATIVA A 20º GRAUS C/25ºC	D 70	Anotar (1)	1,811	N/A
AQUECIMENTO A 177 GC	X 215	NESP (2)	NESP	N/A
<b>Notas:</b> (1) Ensaio não faz parte da especificação. Informação para fins de faturamento. (2) NESP = Não espuma				
Data de Emissão: 04/07/2016 09:57:24		Página: 1 de 1		
Os resultados deste Certificado de Ensaio referem-se à amostra acima especificada. Este certificado só pode ser reproduzido integralmente com a autorização do responsável pelo seu conteúdo.		Original Assinado Por: Responsável: Elisa Mara Silva Moraes de Oliveira CRC: Nº 02202821		

Fonte: (Petrobras, 2016).

Figura 71 - Laudo do CAP 50/70 da LUBNOR

<b>BR PETROBRAS</b>		Número: 1407-16 G		
		CÓPIA		
<b>CERTIFICADO DE ENSAIO</b>				
Produto: CIMENTO ASFALTICO 50/70		Código: 71K		
Local de Amostragem: TQ 260F207C		Laboratório: AB-UO/LUBNOR		
Data/ hora Amostragem: 02/11/16 12:50		Endereço: Av Leite Barbosa, s/n		
Data/ hora Recebimento: 02/11/16 14:30		Fortaleza/CE - CEP 60180-420		
		Telefone (0XX85)3266-3583 Fax: (0XX85)3266-3306		
Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRACAO	D 5	50 a 70	62	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	46 min	48,2	grau C
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROL A 135 GC	F 102	141 min	188,0	s
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135GC-SP21 20RPM	D 4402	274 min	369	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD 150 GC-SP21	D 4402	112 min	181	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177GC SP21	D 4402	57 a 285	67	cp
RTFOT PENETRACAO RETIDA	D 5	55 min	74	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	8 max	3,2	grau C
RTFOT - DUCTILIDADE A 25GC	D 113	20 min	>150	cm
RTFOT VARIACAO EM % MASSA	D 2872	0.50 a 0.50	0,029	%
DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	60 min	>150	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2143	99.3 min	100,0	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min	>300	grau C
INDICE DE SUSCETIBILIDADE TERMICA	X 018	-1,5 a 0,7	-1,2	N/A
AQUECIMENTO A 177 GC	X 215	NESP (1)	NESP	N/A
<b>Notas:</b>				
(1) NESP = Nao espuma				
Data de Emissão: 02/11/2016 20:40:17		Página: 1 de 1		
Os resultados deste Certificado de Ensaio referem-se à amostra acima especificada.		Original Assinado Por:		
Este certificado só pode ser reproduzido integralmente com a autorização do responsável pelo seu conteúdo.		Responsável: Paulo Roberto Nogueira Tavares CRQ: 10.400.065		



Figura 72 - Laudo do CAP 50/70 da REFAP

PETRÓLEO BRASILEIRO S/A - PETROBRAS - BDEMQ

Emissão: 04/07/17 17:51

**Consultar Amostras**

Tanque: 116C

Produto: CIMENTO ASFALTICO 50/70

Complemento:

Solicitante: 245 - REFAP PB

Executante: 245 - REFAP PB

Data/Hora da Amostra: 17/12/16 11:00

Certificado: 2185 - 18/12/16 14:23

Finalidade: NAC - VENDA NACIONAL

Data/Hora Recebimento: 17/12/16 13:51

Inspeccionada: Não

Situação: Histórico

Tipo Amostr.: 016 - COMPUNITQ

**Resultados dos Ensaaios**

Ensaio	Resultado	Unidade de Medida	Método	Especificação
DUCTILIDADE A 25 GC	>147	cm	D - 113	60 min.
IND. SUSCET.TERMICA	-1,3		X - 018	-1.5 a 0.7
PENETRACAO	57	0,1 mm	D - 5	50 a 70
PONTO AMOLECIMENTO	48,6	grau C	D - 36	46 min.
RTFOT PENETR. RETIDA	65	%	D - 5	55 min.
RTFOT VAR.EM %MASSA	0,053	%	D - 2872	-0.50 a 0.50
RTFOT-AUM.PTO AMOLEC	4,8	grau C	D - 36	8 max.
RTFOT-DUCTIL. A 25GC	>147	cm	D - 113	20 min.
SOLUB. TRICLOROETIL.	100,0	% massa	D - 2042	99,5 min.
AQUECIMENTO A 177 GC	NESP		X - 215	NESP
VIS.B.135GC-SP21,20R	300	cp	D - 4402	274 min.
VISC.BROOK.150GCSP21	156	cp	D - 4402	112 min.
VISC.BROOK.177GCSP21	60	cp	D - 4402	57 a 285
DENSIDADE A 20/4 GC	1,000		D - 70	Anotar
PONTO DE FULGOR	>236	grau C	D - 92	235 min.

Fonte: (Petrobras, 2017).

Figura 73 - Laudo do CAP 50/70 da REGAP

<b>BR PETROBRAS</b>		Número: 2830-15 G		
		CÓPIA		
<b>CERTIFICADO DE ENSAIO</b>				
Produto: CIMENTO ASFALTICO 50/70		Código: 71K		
Local de Amostragem: TQ 25096E		Laboratório: REGAP/OT/QP		
Data/ hora Amostragem: 13/12/15 14:00		Endereço: Rodovia Ferrão Dias Km 427		
Data/ hora Recebimento: 13/12/15 14:03		Betim/MG		
		Telefone: (0XX31) 3529-4420 Fax: (0XX31) 3629-4151		
Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRAÇÃO	D 5	55 a 70	60	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	46 min	68,2	grau C
VISCOSEZ DE BROOKFIELD 1350C-SP21 20RPM	D 4402	278 min	218	cp
VISCOSEZ DE BROOKFIELD 150 GC-SP21	D 4402	112 min	159	cp
VISCOSEZ DE BROOKFIELD A 1770C SP21	D 4402	97 a 208	84	cp
RTFOT PENETRAÇÃO RETIDA	D 5	55 mm	58	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	5 min	4,8	grau C
RTFOT - DUCTILIDADE A 250C	D 113	20 mm	>108	cm
RTFOT VARIACAO EM N MASSA	D 2872	-0,50 a 0,50	-0,121	%
DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	80 mm	>108	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	98,5 mm	99,9	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	225 min	328	grau C
ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDADE TÉRMICA	X 016	-1,5 a 0,7	-1,1	NA
DENSIDADE RELATIVA A 204 GRAUS CÉLSIUS	D 70	Anote (1)	1,911	NA
AQUECIMENTO A 177 GC	X 215	NESP (2)	NESP	NA
<b>Notas:</b>				
(1) Ensaio não faz parte da especificação. Informação para fins de fechamento.				
(2) NESP = Não espuma				

Data de Emissão: 14/12/2015 01:47:11	Página: 1 de 1	Original Assinado Por:
Os resultados deste Certificado de Ensaio referem-se à amostra acima especificada. Este certificado só pode ser reproduzido integralmente com a autorização do responsável pelo seu conteúdo.		Responsável: Elisa Mara Silva Moraes de Oliveira CRQ: N° 02202621

Figura 74 - Laudo do CAP 50/70 da REPAR



Número: 1142-2016

## CERTIFICADO DE ENSAIO CÓPIA

Produto: CIMENTO ASFALTICO 50/70	Código: PB71K
Local de amostragem: TQ 2954386	Laboratório: REPAR
Data/hora da amostragem: 14/06/2016 14:10	Endereço: Rodovia do Xisto (BR-476), km 16 - 83.707-440 Araucária - PR
Data/hora do Recebimento: 14/06/2016 15:00	Tel: +55 41 36412524 Fax: +55 41 36412524

Descrição	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRACAO	D 5	50 a 70	59	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	46 min.	48,1	grau C
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROL A 135 GC	E 102	141 min.	161,5	s
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135GC-SP21 20RPM	D 4402	274 min.	314	cp
VISC. SSF. 150GC	E 102	50 min.	84,1	s
VISCOSIDADE BROKFIELD 150 GC-SP21	D 4402	112 min.	160	cp
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROL A 177 GC	E 102	30 a 150	32,4	s
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177GC SP21	D 4402	57 a 285	59	cp
RTFOT PENETRACAO RETIDA	D 5	55 min.	70	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	8 max.	2,3	grau C
RTFOT - DUCTILIDADE A 25GC	D 113	20 min.	>100	cm
RTFOT VARIACAO EM % MASSA	D 2872	-0.50 a 0.50	-0,024	%
DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	60 min.	>100	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	99.5 min.	99,9	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min.	>235	grau C
INDICE DE SUSCETIBILIDADE TERMICA	X 018	-1.5 a 0.7	-1,3	
DENSIDADE RELATIVA A 20/4 GRAUS CELSIUS	D 70	Anotar (1)	1,013	
AQUECIMENTO A 177 GC	X 215	NESP (2)	NESP	

**Notas:**

- (1) Ensaio nao faz parte da especificacao. Informacao para fins de faturamento.  
 (2) NESP = Nao espuma

Data de Emissão : 14/06/2016 17:33	Página 1 de 1	Original assinado por:
Os resultados deste Certificado de Ensaio referem-se à amostra acima especificada. Este certificado só pode ser reproduzido integralmente e com a autorização do responsável pelo seu conteúdo.		Responsável Cassia Jansson Lopes CRQ:09300978

Figura 75 - Laudo do CAP 50/70 da REVAP



Número: 1552-2016

## CERTIFICADO DE ENSAIO      CÓPIA

Produto: CIMENTO ASFALTICO 50/70      Código: PB71K

Local de amostragem: TQ 28544115 Data/hora da amostragem: 15/04/2016 04:10 Data/hora do Recebimento: 15/04/2016 07:00	Laboratório: REVAP Endereço: Rod Pres Dutra Km 143 Jd Diamante - Rod Pres Dutra Km 143 Jd Diamante Tel: (012) 3928-8542    Fax: (012) 3928-8408
---	--

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRAÇÃO	D 5	50 a 70	54	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 38	45 min.	49,0	grau C
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135GC-SP21 20RPM	D 4402	274 min.	392	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD 150 GC-SP21	D 4402	112 min.	193	cp
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177GC-SP21	D 4402	57 a 285	74	cp
RTFOT PENETRAÇÃO RETIDA	D 5	55 min.	63	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 38	8 max.	4,2	grau C
RTFOT - DUCTILIDADE A 25GC	D 113	20 min.	>150	cm
RTFOT VARIAÇÃO EM % MASSA	D 2872	-0,50 a 0,50	-0,100	%
DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	60 min.	>150	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	98,5 min.	100,0	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min.	284	grau C
ÍNDICE DE SUSCETIBILIDADE TÉRMICA	X 018	-1,5 a 0,7	-1,3	
DENSIDADE RELATIVA A 20/4 GRAUS CELSIUS	D 70	Anotar (1)	1,019	
AQUECIMENTO A 177 GC	X 215	NESP (2)	NESP	

**Notas:**

(1) Ensaio não faz parte da especificação. Informação para fins de faturamento.

(2) NESP = Não espuma

Data de Emissão : 15/04/2016 22:04	Página 1 de 1	Original assinado por:
<b>Os resultados deste Certificado de Ensaio referem-se à amostra acima especificada. Este certificado só pode ser reproduzido integralmente e com a autorização do responsável pelo seu conteúdo.</b>		<b>Responsável</b>  <b>Alexsander Shigueru Araujo</b> <b>CRQ:4244796</b>

Fonte: (Petrobras, 2016).