

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

FERNANDO DEKEPER BOEIRA

**ESTUDO DA RIGIDEZ, DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE E DA
FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTES
CONVENCIONAIS E MODIFICADOS**

**Santa Maria, RS, Brasil
2018**

Fernando Dekeper Boeira

**ESTUDO DA RIGIDEZ, DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE E DA FADIGA DE
MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTES CONVENCIONAIS E MODIFICADOS**

Tese de doutorado apresentado ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS, Brasil

2018

Boeira, Fernando Dekeper
ESTUDO DA RIGIDEZ, DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE E DA
FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTES CONVENCIONAIS
E MODIFICADOS / Fernando Dekeper Boeira.- 2018.
284 p.; 30 cm

Orientador: Luciano Pivoto Specht
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, RS, 2018

1. Misturas Asfálticas 2. Fadiga por Tração-Compressão
Direta (Uniaxial) 3. Módulo Complexo 4. Modelo S-VECD 5.
Deformação Permanente I. Specht, Luciano Pivoto II. Título.

Fernando Dekeper Boeira

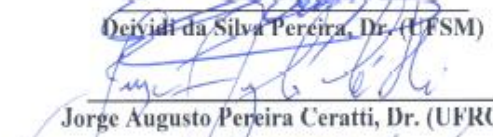
**ESTUDO DA RIGIDEZ, DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE E DA FADIGA DE
MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTES CONVENCIONAIS E MODIFICADOS**

Tese de doutorado apresentado ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Civil**.

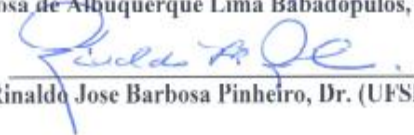
Aprovado em 22 de Novembro de 2018:


Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)


Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)


Jorge Augusto Pereira Ceratti, Dr. (UFRGS)


Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos, PhD. (UFC)


Rinaldo Jose Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2018

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar preciso agradecer profundamente aos meus pais, José Antonio Borges Boeira e Maria Dekeper Boeira, que não mediram esforços para que primeiro terminasse a graduação em engenharia civil, e em seguida a pós-graduação. Agradeço pelo incentivo e principalmente pela confiança depositada. Juntamente com meus pais, devo um agradecimento especial a minha noiva, Eveline Betiolo, pelo seu apoio e compreensão, e principalmente por aguentar a distância e os estress do mestrado e agora do doutorado!

Ao Professor Luciano Pivoto Specht, pela exímia orientação prestada e pelo incentivo de continuar na pesquisa desde a graduação até o doutorado, pelos ensinamentos dentro e fora de sala de aula e, principalmente pelo exemplo de pessoa e profissional que me serviu.

Aos Professores do Grupo GEPPASV, Deividi da Silva Pereira, Magnos Baroni, Rinaldo José Barbosa Pinheiro e Tatiana Cureau Cervo, pelo apoio, amizade e ajuda sempre fornecida durante todo o processo da pós-graduação.

Aos Professores Jorge Augusto Pereira Ceratti e Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos por aceitarem fazer parte da banca examinadora, pelo tempo disponibilizado para avaliação do trabalho e principalmente por seus conhecimentos agregados a este trabalho.

Devo muito um agradecimento especial ao Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos e a Universidade Federal do Ceará, juntamente com o Luis Alberto Herrmann do Nascimento e ao CENPES-PETROBRAS, que me auxiliaram na produção e execução do ensaio de fadiga, nas dicas, nas visitas em ambos os centros e principalmente na disponibilidade de tempo e trocas de idéias. Sem vocês o trabalho teria sido muito mais difícil do que já foi! Muito obrigado.

À CAPES pelo suporte financeiro através da bolsa no decorrer de todo o estudo, e a ANP e PETROBRAS pelo investimento nos equipamentos utilizados.

A todos os amigos que estiveram presentes durante a execução deste trabalho, agradeço a amizade e a compreensão, todos contribuíram de alguma forma! Em especial aos amigos e colegas de Doutorado e Mestrado: Cléber, Eduardo Druzian, Lucas Bueno, Eduardo Renz, Silvio Schuster, Valdir Barboza Jr., Pedro Orlando Borges Almeida Jr. Enfim a todo o grupo GEPPASV, os bolsistas ou voluntários, todos têm a participação neste trabalho.

Devo um agradecimento em separado e principalmente especial ao Eduardo Druzian (vulgo Saca!) e ao Gustavo dos Santos Pinheiro (Grilo!) pelo auxílio na usinagem das peças e nos projetos das mesmas, a ajuda de vocês foi essencial para que podessemos chegar ao fim e deixar o ensaio funcionando perfeitamente!

Por fim gostaria de agradecer a todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho, principalmente aos professores e técnicos do PPGEC e do LMCC da UFSM seja por orientação técnica ou por amizade.

RESUMO

ESTUDO DA RIGIDEZ, DA DEFORMAÇÃO PERMANENTE E DA FADIGA DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTES CONVENCIONAIS E MODIFICADOS

AUTOR: Fernando Dekeper Boeira
ORIENTADOR: Luciano Pivoto Specht

No país, são dois os mais recorrentes defeitos encontrados nas rodovias: deformação permanente e trincamento por fadiga. Dentre as mais variadas causas, a formação e propagação de trincas no revestimento asfáltico podem ocorrer em consequência das repetidas solicitações do tráfego que, com o tempo, reduzem drasticamente a vida de serviço do pavimento, facilitando a penetração de água nas camadas granulares da estrutura e acelerando sua deterioração. Métodos eficientes para prever o desempenho das misturas asfálticas, em muitos países da Europa e da América do Norte, já são uma realidade consolidada, como é o caso da ferramenta que permite a interpretação da viscoelasticidade das misturas asfálticas, o Módulo Complexo. No Brasil, este parâmetro ainda está restrito ao meio acadêmico, assim como os métodos para previsão do desempenho à deformação permanente e ao dano por fadiga. Este trabalho tem o intuito de contribuir para a implementação e disseminação do novo ensaio de Fadiga à Tração Direta Uniaxial Cíclico, e estudar o comportamento de misturas asfálticas quanto a influência do tipo de ligante asfáltico utilizado, do método de dosagem e do arranjo granulométrico quanto às suas propriedades viscoelásticas, deformação permanente e dano por fadiga. Para realização do trabalho, variou-se o método de dosagem, utilizando Marshall e SUPERPAVE; a granulometria, utilizando as faixas B e C da especificação DNIT 031/2006-ES; o método de composição de agregados, utilizando tentativa e erro, de modo a atender a especificação, e método Bailey; e o tipo de ligante asfáltico, utilizando ligante convencional CAP 50/70, ligante modificado por polímero AMP 60/85, e ligante altamente modificado por polímero HIMA. Realizaram-se ensaios mecânicos para caracterização do comportamento das misturas asfálticas em termos da deformação permanente, viscoelasticidade e, principalmente, perante ao dano de fadiga. Para avaliar a deformabilidade, Módulo de Resiliência e Módulo Complexo; e, para avaliar a resistência, Resistência à Tração por Compressão Diametral, *Creep* Dinâmico (*Flow Number*) e Fadiga à Tração Direta Uniaxial Cíclico. Quanto aos resultados, as misturas Marshall apresentaram teores de ligante superiores às misturas SUPERPAVE. As misturas com ligante asfáltico altamente modificados apresentaram as menores rigidez, tanto para o ensaio de Módulo de Resiliência como para Módulo Complexo. Nos resultados de Flow Number a influência significativa do tipo e teor do ligante asfáltico é perceptível. Quanto maior foi a quantidade de modificação no ligante asfáltico por polímero SBS, maior foi o FN das misturas. Para o ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclicos, a implementação do equipamento e da rotina de cálculo apresentou-se adequado, com plena capacidade de caracterização à fadiga de misturas asfálticas. Diferente dos resultados de deformação permanente, para a fadiga, não é tão claro o efeito da modificação do ligante. A utilização do Fator de Área de Fadiga utilizando as envoltórias com base no critério de ruptura G^R apresentou bons indícios para classificação de misturas asfálticas.

Palavras-chave: Misturas Asfálticas, Fadiga por Tração-Compressão Direta (Uniaxial), Módulo Complexo, modelo S-VECD, Deformação Permanente, Trincamento por Fadiga.

ABSTRACT

STUDY OF STIFFNESS, PERMANENT DEFORMATION AND FATIGUE OF ASPHALT MIXTURES WITH CONVENTIONAL AND MODIFIED LIGANTS

AUTHOR: Fernando Dekeper Boeira

ADVISOR: Luciano Pivoto Specht

In Brazil, there are two most recurrent defects found on highways: permanent deformation and cracking due to fatigue. Among the most varied causes, the formation and propagation of cracks in the asphalt coating occurs as a consequence of the repeated loading caused by the traffic that, over time, will drastically reduce the service life of the pavement, for example, facilitating the penetration of water into the granular layers of the pavement. structure and accelerating its deterioration. Efficient methods to predict the performance of asphalt mixtures in many countries of Europe and North America are already a consolidated reality, as is the case of the tool that allows interpretation of the viscoelasticity of asphalt mixtures, the Complex Modulus, which, in Brazil, is still very restricted to the academic, as well as the methods to performance permanent deformation and fatigue damage predict. The aim of this study is to contribute to the implementation and dissemination of the new the Direct Tension Cyclic Fatigue Test. And to study the behavior of asphalt mixtures with respect to the influence of the type of asphalt binder used, the mix design method and the particle size distribution with respect to its viscoelastic properties, permanent deformation and fatigue damage. For the accomplishment of the study the parameters of the Marshall and SUPERPAVE design methods were obtained with different aggregate gradations, two of the band B and two of the band C of the DNIT 031/2006-ES specification. Two bands, B and C, which were composed by trial and error in such a way that meet the specification, and two by the Bailey method, also in band B and band C, for the three asphaltic binders. Mechanical tests were used in this study to characterize the behavior of asphalt mixtures in terms of permanent deformation, viscoelastic behavior and especially the behavior with respect fatigue damage. They were used to evaluate the deformability (Resilience Module and Complex Modulus), and to evaluate the resistance (Indirect Tensile Strength, Flow Number and Direct Tension Cyclic Fatigue). Regarding the results, the Marshall mixtures had higher binder contents than the SUPERPAVE mixtures. In the results of Flow Number it was showed a significant influence of the type and content of the binder. The greater the amount of modification in the asphaltic binder by SBS polymer the greater the FN of the blends. For the Direct Tension Cyclic Fatigue test, the equipment implementation and the calculation routine were adequate, with full capacity to characterize the fatigue of asphalt mixtures. Unlike the results of permanent deformation, for fatigue, the effect of binder modification is not so clear. The utilization of the Fatigue Area Factor using the failure envelopes based on the Gr rupture criterion presented good indications for the classification of asphalt mixtures.

Keywords: Asphalt Mixtures, Direct Tension Cyclic Fatigue Test, Complex Modulus, S-VECD model, Permanent Deformation, Fatigue Cracking.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das componentes de deformação de materiais viscoelastoplástico	28
Figura 2 - Domínios do comportamento típico dos materiais asfálticos, dependendo da amplitude de deformação (ε) e da temperatura (T) (T_g representa a temperatura de transição vítrea), para um determinado número de ciclos.	30
Figura 3 - Domínios do comportamento mecânico típicos de misturas asfálticas dependendo da amplitude de deformação ε e número de ciclos n, para uma dada temperatura.	31
Figura 4 - Rigidez e ângulo de fase <i>versus</i> Número de Ciclos do Carregamento	32
Figura 5 - Ensaio homogêneos	40
Figura 6 - Ensaio não homogêneos	40
Figura 7 - Esquema do ensaio de módulo complexo uniaxial	41
Figura 8 - Curvas Isotermas (A), Isócronas (B), Plano cole-cole (C) e Espaço Black (D)	43
Figura 9 - Exemplo de curva mestra de módulo complexo	44
Figura 10 - Deformações permanentes em pavimentos asfálticos	45
Figura 11 - Influência do agregado e do ligante no desempenho de uma mistura	47
Figura 12 - Gráfico típico do ensaio de <i>creep</i> dinâmico	51
Figura 13 - Regressão das constantes a e b quando traçados em escala log-log.	52
Figura 14 - Analisador de Pavimento Asfáltico – APA	54
Figura 15 - Corpos de prova utilizados no APA	55
Figura 16 - APA com rodas de aço para ensaios de trincamento por fadiga	56
Figura 17 - Demonstração das tensões de um pavimento	58
Figura 18 - Estágios em um processo de fadiga	58
Figura 19 - Definição de ruptura em ensaios com deformação controlada	63
Figura 20 - Esquema de carregamento	66
Figura 21 - Representação do esquema de carregamento e formato das vigas	68
Figura 22 - Determinação de ciclos até a falha do ensaio de fadiga S-VECD	73
Figura 23 - Fluxograma da pesquisa	76
Figura 24 - Coleta do material direto da unidade de produção	78
Figura 25 - Localização da unidade de produção do agregado e sua formação geológica	79
Figura 26 - Distribuição granulométrica dos materiais	80
Figura 27 - Curva granulométrica das misturas (a) Faixa B e (b) Faixa C DNIT 031 (2006)	86
Figura 28 – Nomenclatura das misturas	89
Figura 29 – Simbologia das misturas	89
Figura 30 - Exemplo de um compactador por impacto – Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM	91
Figura 31 - Exemplo de um Compactador giratório – Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM	93
Figura 32 - Imagem da UTM – 25 utilizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil	94
Figura 33 - Realização do Módulo Complexo a temperatura de -10°C	97
Figura 34 - Representação do modelo 2S2P1D	98
Figura 35 - Equipamento para ensaio de Resistência à Tração	100
Figura 36 – (a) Equipamento para ensaio de Resistência à Tração na UTM-25, (b) Corpo de Prova durante a realização do ensaio, (c) Esquema para obtenção dos corpos de prova.	102
Figura 37 - Imagem da UTM – 25 utilizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil e dos corpos de prova antes e depois do ensaio	103
Figura 38 - Gráfico típico da curva de ciclo da carga <i>versus</i> deformação permanente acumulada	104

Figura 39 - (a) Exemplo de carregamento do ensaio de fadiga por tração direta: ensaio típico a 20°C com deformação variando de 0 (zero) a 370 microstrains, 10 Hz, ciclos 1900 a 1905; (b) Evolução do ângulo de fase e do módulo dinâmico de um ensaio típico de fadiga por tração direta, ilustrando o ponto onde ocorre a ruptura	105
Figura 40 - Aparato para realização do ensaio de fadiga tração direta uniaxial cíclico (a) Sistema CENPES (b) Sistema da UFC	106
Figura 41 - Sistema de peças para execução do ensaio no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM.....	106
Figura 42 – Sistema de colagem de um corpo de prova típico para ensaio	108
Figura 43 – Sistema de ensaio de Fadiga por Tração-Compressão Direta (Uniaxial) da UFSM (a) e (b) durante montagem do aparato e (c) apto para realização do teste.....	109
Figura 44 - Gráfico típico da Curva Característica de Dano (<i>C versus S</i>).....	110
Figura 45 – Estruturas típicas dos dados de entrada no AEMC-Sispav.....	112
Figura 46 - Problemas de aderência entre as placas de colagem e os corpos de prova	114
Figura 47 – Exemplo de amostras com rompimento fora das leituras dos LVDT's.....	115
Figura 48 – Teor de Ligante de projeto encontrado com as dosagens	119
Figura 49 – Valores de CDI encontrados com a dosagem SUPERPAVE	120
Figura 50 – Valores de TDI encontrados com a dosagem SUPERPAVE	121
Figura 51 - Resultados de MR a 10°C em função das frequências de carregamento	128
Figura 52 - Resultados de MR a 25°C em função das frequências de carregamento	129
Figura 53 - Resultados de MR a 35°C em função das frequências de carregamento	131
Figura 54 - Isoterma de $ E^* $ a 21°C	134
Figura 55 - Isoterma de ϕ a 37°C.....	134
Figura 56 - Isócrona de $ E^* $ a 10Hz.....	135
Figura 57 - Isócrona de ϕ a 10Hz.....	135
Figura 58 - Comparação das linhas de tendência lineares das curvas $\log [a (21)]$ para todas as misturas (@21°C)	137
Figura 59 - Espaço Cole-Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a mistura M CON FX C 60/85	139
Figura 60 - Espaço Cole-Cole para as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE obtidos com a modelagem 2S2P1D	140
Figura 61 - Espaço Cole-Cole para as misturas dosadas pela metodologia Marshall obtidos com a modelagem 2S2P1D.....	141
Figura 62 - Espaço Cole-Cole para todas as misturas obtidas com a modelagem 2S2P1D ..	142
Figura 63 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a mistura M CON FX C 60/85	144
Figura 64 - Diagrama de Black para as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE obtidos com a modelagem 2S2P1D	144
Figura 65 - Diagrama de Black para as misturas dosadas pela metodologia Marshall obtidos com a modelagem 2S2P1D	145
Figura 66 - Diagrama de Black para todas as misturas obtidas com a modelagem 2S2P1D. 146	146
Figura 67 – Curvas mestras de Módulo Dinâmico para as misturas dosadas pelo SUPERPAVE (@ 20°C).....	148
Figura 68 – Curvas mestras de Módulo Dinâmico para as misturas dosadas pelo SUPERPAVE (baixas frequências) (@ 20°C).....	148
Figura 69 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico para as misturas dosadas pelo MARSHALL (@ 20°C).....	150
Figura 70 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico para as misturas dosadas pelo MARSHALL (baixas frequências) (@ 20°C).....	150

Figura 71 – Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas SUPERPAVE e Marshall (@20°C)	151
Figura 72 - Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas SUPERPAVE e Marshall (baixas frequências) (@20°C)	152
Figura 73 – Curvas mestras de ângulo de fase para misturas dosadas pelo SUPERPAVE (@20°C).....	155
Figura 74 - Curvas mestras de ângulo de fase para misturas dosadas pelo Marshall (@20°C)	156
Figura 75 - Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas SUPERPAVE e Marshall (@20°C)	157
Figura 76 – Inferência à fadiga a 21 °C das misturas dosadas pelo SUPERPAVE	158
Figura 77 – Inferência à fadiga a 21 °C das misturas dosadas pelo Marshall	159
Figura 78 - Inferência à fadiga a 21 °C das misturas	159
Figura 79 – Inferência à deformação permanente das misturas dosadas através do SUPERPAVE nas temperaturas de 37 °C (a) e 54 °C (b)	160
Figura 80 - Inferência à deformação permanente das misturas dosadas através do Marshall nas temperaturas de 37 °C (a) e 54 °C (b)	162
Figura 81 - Inferência à deformação permanente a 37 °C (a) e 54 °C (b) das misturas.....	163
Figura 82 – Resistência à Tração das amostras de Módulo de Resiliência	167
Figura 83 – Relação entre a Resistência à Tração e o Teor de Ligante entre Faixas Granulométricas das Misturas	169
Figura 84 – Resistência à Tração das amostras de Módulo Complexo	172
Figura 85 – Resistência à Tração das amostras de Módulo Complexo	173
Figura 86 - <i>Flow Number</i> obtido para as 24 misturas asfálticas	177
Figura 87 – Comparativo de misturas asfálticas com CAP 50/70 para <i>Flow Number</i>	180
Figura 88 – Correlação do Ponto de Amolecimento dos ligantes com os <i>FNs</i>	182
Figura 89 – Correlação entre o Teor de Ligante de projeto (%) e <i>FN</i> obtido nas misturas asfálticas	183
Figura 90 – Correlação do PG de alta temperatura dos ligantes asfálticos com os <i>FNs</i>	184
Figura 91 – Correlação do parâmetro <i>Jnr</i> dos ligantes asfálticos com os <i>FNs</i>	185
Figura 92 – Correlação da Proporção AG das granulometrias e o <i>FN</i> obtido nas misturas asfálticas	186
Figura 93 – Correlação com a Porosidade FAD e os <i>FN's</i> obtidos nas misturas asfálticas...	187
Figura 94 – Correlação <i>Flow Number</i> com relação $ E^* /\text{sen } \varphi$ na temperatura de 54°C e 1Hz	189
Figura 95 – Correlação <i>Flow Number</i> com relação $ E^* /\text{sen } \varphi$ na temperatura de 37°C e 1Hz	190
Figura 96 – Curvas de Wöhler para as misturas dosadas na metodologia SUPERPAVE	192
Figura 97 - Curvas de Wöhler para as misturas dosadas na metodologia Marshall.....	193
Figura 98 - Curvas de Wöhler para todas as misturas	194
Figura 99 - Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase versus número de ciclos de ensaio de fadiga	197
Figura 100 – Curva C versus S do ajuste <i>Fitting</i> da mistura S CON FX B HIMA.....	200
Figura 101 – Curvas C versus S para as misturas dosadas na metodologia SUPERPAVE ...	200
Figura 102 - Curvas C versus S para as misturas dosadas na metodologia Marshall.....	201
Figura 103 – Curvas C versus S para todas as misturas	202
Figura 104 – Envoltórias de ruptura G^R vs N_f para as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE	203
Figura 105 – Envoltórias de ruptura G^R vs N_f para as misturas dosadas pela metodologia Marshall.....	204

Figura 106 – Envoltórias de ruptura G^R vs Nf para todas as misturas asfálticas	205
Figura 107 – Curvas de Wöhler geradas pelos Nf's calculados pela equação de Nascimento (2016)	208
Figura 108 – Correlação entre o parâmetro FAF e o Nf pelas simulações de G^R na estrutura de 5cm	218
Figura 109 – Correlação entre o parâmetro FAF e o Nf pelas simulações de G^R na estrutura de 10cm	219
Figura 110 – Correlação entre o parâmetro FAF e o Nf pelas simulações de G^R na estrutura de 15cm	219
Figura 111 - Quadro de classificação de desempenho frente à fadiga e à deformação permanente para os resultados de FAF simulados pelas Curvas de Wöhler geradas da Equação de Nascimento (2016)	221
Figura 112 – Quadro de classificação de desempenho frente à fadiga e à deformação permanente para os resultados de Nf simulados na estrutura de 10cm pela Curvas de Wöhler geradas da Equação de Nascimento (2016)	221

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças entre Módulo de Resiliência e Módulo Complexo	35
Tabela 2 - Principais fatores que afetam o comportamento à fadiga de misturas asfálticas	59
Tabela 3 - Número de amostras para execução da pesquisa.....	77
Tabela 4 - Propriedades das frações do agregado utilizado.....	80
Tabela 5 - Característica granulométrica dos materiais.....	80
Tabela 6 – Propriedades da cal hidratada	81
Tabela 7 - Propriedades dos ligantes pela especificação brasileira	83
Tabela 8 - Propriedades dos ligantes pela especificação SUPERPAVE	84
Tabela 9 - Porcentagem de cada fração do agregado utilizado para compor as curvas granulométricas	85
Tabela 10 - Percentual passante de cada mistura com agregados	86
Tabela 11 - Análise das quatro granulometrias nos parâmetros estabelecidos pelo método Bailey	87
Tabela 12 - Peneiras utilizadas para composição das misturas	90
Tabela 13 - Valores do Coeficiente de Poisson para as temperaturas utilizadas.....	95
Tabela 14 - Tempo mínimo recomendado para equilíbrio da temperatura para amostras para o ensaio de $ E^* $	97
Tabela 15 – Valores de Módulo Dinâmico das misturas.....	113
Tabela 16 – Quantidade de amostras ensaiadas versus quantidade de amostras com o rompimento fora da leitura dos LVDT's	115
Tabela 17 – Parâmetros volumétricos obtidos nas dosagens.....	118
Tabela 18 – Porosidade FAD e Faixa de Agregado Dominante das misturas.....	122
Tabela 19 - Resultados de Módulo de Resiliência para todas as misturas	125
Tabela 20 - Resultado das Regressões para o ensaio de MR.....	127
Tabela 21 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2	136
Tabela 22 – Valores de RT, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação das amostras de Módulo de Resiliência.....	165
Tabela 23 – Resultados do ensaio de RT e parâmetros de tenacidade, Energia Máxima, Energia Total, Índice de Tenacidade e Índice de Flexibilidade	171
Tabela 24 – Valores normalizados dos parâmetros de Resistência à Tração das misturas	174
Tabela 25 - <i>Flow Number</i> para cada mistura obtido pelo Modelo Francken e seus respectivos parâmetros	176
Tabela 26 – Critérios de <i>Flow Number</i> para diferentes níveis de tráfego	178
Tabela 27 – Equações geradas pelas Curvas de Wöhler	193
Tabela 28 – Classificação das misturas asfálticas pelo FAF das curvas de Wöhler – Abordagem Clássica.....	196
Tabela 29 - Coeficientes C_{11} , C_{12} , Y e Δ para cada mistura	199
Tabela 30 – Equações geradas pelas Curvas da Envoltórias de ruptura G^R vs N_f para todas as misturas asfálticas.....	204
Tabela 31 – Equações geradas pelas Curvas de N_f versus deformação inicial medida para todas as misturas asfálticas	207
Tabela 32 – Classificação e comparação dos FAF para o modelo com o uso do S-VECD e pelas curvas de Wöhler para os dados brutos de ensaio	209
Tabela 33 – Resultados de ϵ_t (μS) no fundo do revestimento simulando o pavimento no AEMC-Sispav	211
Tabela 34 – Resultados de N_f utilizando as equações das curvas geradas para a estrutura de 5cm	212

Tabela 35 - Resultados de Nf utilizando as equações das curvas geradas para a estrutura de 10cm.....	212
Tabela 36 - Resultados de Nf utilizando as equações das curvas geradas para a estrutura de 15cm.....	213
Tabela 37 - Relação dos R^2 para os modelos gerados com os resultados de Nf.....	215
Tabela 38 - Relação de R^2 para resultados dos indicadores de desempenho e dos Nf's do pavimento de 5cm.....	216
Tabela 39 - Relação de R^2 para resultados dos indicadores de desempenho e dos Nf's do pavimento de 10cm.....	216
Tabela 40 - Relação de R^2 para resultados dos indicadores de desempenho e dos Nf's do pavimento de 15cm.....	217

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ϕ : Ângulo de fase
°C: Graus Celsius
 τ = Tempo Característico
 σ_0 : Tensão inicial
 ξ : Tempo Reduzido
 α : Taxa de Evolução do Dano
 ε^R : Pseudo-deformação
 $E(\xi)$: Módulo de Relaxação Viscoelástico Linear do Material;
 E_R : Módulo de referência, normalmente unitário.
 E_{00} = Módulo Estático
 E_0 = Módulo em Transição Vítea
 ε_0 : Deformação Inicial
 ε_e : Deformação da Parcela Elástica
 ε_p : Deformação da Parcela Plástica
 ε_{ve} : Deformações Viscoelásticas
 ε_{vp} : Deformações Viscoplasticas
 μ : Coeficiente de Poisson
 ω = Pulsação
 η = Viscosidade Newtoniana
 ν_{00} = Coeficiente de Poisson Estático
 ν_0 = Coeficiente de Poisson Estático em Transição Vítea
AASHTO: American Association of Highway and Transportation Officials
AB: Asfalto Borracha
ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABPC: Associação Brasileira de Produtores de Cal
AG: Agregado Graúdo
AMP: Asfalto Modificado por Polímero
APA: Analisador de Pavimento Asfáltico
ASTM: American Society of Testing and Materials
ATR: Afundamento de Trilha de Roda
BBR: Bending Beam Rheometer
C: Integridade do Material
CA: Concreto Asfáltico
CAP: Cimento Asfáltico de Petróleo
CENPES: Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello
CGS: Compactador Giratório Superpave
cm: Centímetros
CNT: Confederação Nacional de Transportes
DAER: Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
DASR: Dominant Aggregate Size Range model
DMN: Diâmetro Máximo Nominal
DMR: Módulo de Elasticidade Dinâmico
DNER: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR: Dynamic Shear Rheometer
E: Módulo de Elasticidade

|E*|: Módulo Complexo
E1: Módulo Elástico Real
E2: Módulo de Perda
EUA: Estados Unidos da América
FAF: Fino do Agregado Fino
FHWA: Federal Highway Administration
FN: Flow Number
GAF: Graúdo do Agregado Fino
GEPPASV: Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária
GLWT: Georgia Loaded Wheel Test
HIMA: Highly Modified Asphalt
Hz: Hertz
IDOT: Departamento de Transportes de Illinois
k,h = Expoentes
kPa: Quilopascal
LCPC: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LMCC: Laboratório de Materiais de Construção Civil
LVDT: Linear Variable Differential Transformer
mm: Milímetros
MPa: Mega Pascal
MR: Módulo de Resiliência
N = Número de repetições de carga de um eixo padrão a que o pavimento estará sujeito ao longo de sua vida de serviço
NCHRP: National Cooperative Highway Research Program
Pa: Pascal
PAV: Pressure Aging Vessel
PG: Performance Grade
PR: Paraná
RBV: Relação Betume Vazios
RS: Rio Grande do Sul
RTFOT: Rolling Thin Film Oven Test
RT: Resistência à Tração
S: Dano
s: Segundos
SBS = Estireno-Butadieno-Estireno
SHRP: Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE: Superior Performing Asphalt Pavement System
S-VECD: Simplified Viscoelastic Continuum Damage
 T_L : Tensão Inicial
UFC: Universidade Federal do Ceará
UFRJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSM: Universidade Federal de Santa Maria
UTM-25: Universal Test Machine
VAM: Vazios do Agregado Mineral
VECD: Viscoelastic Continuum Damage
VV: Volume de Vazios

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVO GERAL.....	25
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
2. REVISÃO DA LITERATURA	27
2.1 COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	27
2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	33
2.2.1 Rigidez	34
2.2.1.1 <i>Módulo de Resiliência</i>	36
2.2.1.2 <i>Módulo Complexo</i>	38
2.2.2 Deformação Permanente	45
2.2.2.1 <i>Ensaio Creep Dinâmico</i>	51
2.2.2.2 <i>Simuladores de Tráfego</i>	53
2.2.3 Fenômeno de Fadiga	57
2.2.3.1 <i>Fenômenos não correlatos ao fenômeno de fadiga</i>	64
2.2.3.2 <i>Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral (Tração Indireta)</i>	65
2.2.3.3 <i>Ensaio de Fadiga à Flexão em Viga Quatro Pontos</i>	67
2.2.3.4 <i>Dano por Fadiga pelo Ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico para utilização do Protocolo de Análise pelo Modelo S-VECD</i>	69
3. METODOLOGIA	75
3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA.....	75
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	78
3.2.1 Agregados Minerai s.....	78
3.2.2 Cimento Asfáltico de Petróleo	82
3.3 MISTURAS ASFÁLTICAS UTILIZADAS	85
3.3.1 Nomenclatura das Misturas Asfálticas	88
3.4 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	90
3.4.1 Dosagem das Misturas Asfálticas	90
3.4.1.1 <i>Dosagem Marshall</i>	90
3.4.1.2 <i>Dosagem SUPERPAVE</i>	92
3.4.2 Propriedades de Deformabilidade	94
3.4.2.1 <i>Ensaio de Módulo de Resiliência</i>	94
3.4.2.2 <i>Ensaio de Módulo Complexo</i>	96
3.4.3 Propriedades de Resistência	99
3.4.3.1 <i>Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Indicadores do Desempenho de Misturas Asfálticas</i>	99
3.4.3.2 <i>Ensaio de Creep Dinâmico (Flow Number)</i>	102
3.4.3.3 <i>Ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico</i>	104
3.4.3.3.1 <i>Problemas de execução do ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico</i>	113
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	117
4.1 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS UTILIZADAS	117
4.1.1 Metodologia Faixa de Agregados Dominantes (FAD)	122
4.2 PROPRIEDADES DE DEFORMABILIDADE.....	123
4.2.1 Ensaio de Módulo de Resiliência	124
4.2.2 Ensaio de Módulo Complexo	133
4.2.2.1 <i>Espaço Cole-Cole</i>	139
4.2.2.2 <i>Diagrama de Black</i>	143
4.2.2.3 <i>Curvas Mestras de Módulo Dinâmico</i>	147

4.2.2.4	<i>Curvas Mestras de Ângulo de Fase</i>	154
4.2.2.5	<i>Obtenção de Indicador de Resistência à Fadiga e à Deformação Permanente</i>	157
4.3	PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA	163
4.3.1	Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Indicadores de Desempenho das Misturas Asfálticas	164
4.3.1.1	<i>Indicadores do Desempenho das Misturas Asfálticas</i>	169
4.3.2	Ensaio de Creep Dinâmico (<i>Flow Number</i>)	175
4.3.2.1	<i>Correlação do FN em função dos parâmetros dos ligantes asfálticos</i>	181
4.3.2.2	<i>Correlação do FN em função dos parâmetros do agregado</i>	185
4.3.2.3	<i>Correlação do FN em função dos parâmetros do Módulo Complexo</i>	188
4.3.3	Ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico	190
4.3.3.1	<i>Curvas de Wöhler – Abordagem Clássica</i>	191
4.3.3.2	<i>Caracterização a Fadiga através do Protocolo de Análise pelo Modelo S-VECD</i>	197
4.3.3.3	<i>Avaliação da Vida de Fadiga pelas Deformações de Estruturas de Pavimentos</i>	210
4.3.3.3.1	<i>Correlações dos valores de N_fs com os principais parâmetros das misturas</i>	214
4.3.4	Classificação das Misturas Asfálticas pela Deformação Permanente e Fadiga ..	220
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	225
5.1	CONCLUSÕES	225
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	229
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	231
	APÊNDICE A – AS BUILT DOS PROJETOS DAS PEÇAS ADAPTADAS	245
	APÊNDICE B – RESULTADOS BRUTOS DO ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO	253
	APÊNDICE C – CURVAS CARACTERÍSTICAS DE DANO PARA AJUSTE DO FITTING	278

1. INTRODUÇÃO

Para o Brasil, o modo de transporte rodoviário apresenta grande importância uma vez que promove a integração dos demais modais contribuindo de forma estratégica para o país. Na maior parte das rodovias brasileiras, utiliza-se como revestimento uma mistura de agregados minerais de vários tamanhos e fontes mineralógicas com ligantes asfálticos que, de forma adequadamente proporcional, possa garantir ao serviço executado os requisitos de impermeabilidade, flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à derrapagem, resistência à fadiga e, ainda, de modo a propiciar aos usuários condições de rolamento com conforto, economia e segurança.

O bom desempenho dos revestimentos depende de procedimentos corretos no projeto, da escolha adequada dos materiais e da formulação das proporções ou misturas que atendam os condicionantes de uso. Posteriormente ao projeto, depende de técnicas adequadas de produção, distribuição e execução das camadas asfálticas no pavimento. De maneira a atender à crescente demanda de durabilidade aliada à escassez de recursos do setor rodoviário, o desempenho de revestimentos do tipo Concreto Asfáltico (CA), muito utilizado em rodovias brasileiras de volume médio a alto de tráfego, tem sido extensivamente estudado pelo meio acadêmico, tanto seus componentes individuais – ligantes e agregados – quanto à mistura.

Devido ao intenso uso do modo rodoviário, aliado ao crescente aumento da frota e ao excesso de cargas transportadas, há um comprometimento do comportamento dos pavimentos asfálticos, o que favorece à ocorrência de deteriorações prematuras e, conseqüentemente, gera aumento no custo de transporte. A degradação dos pavimentos asfálticos brasileiros se intensifica por se tratar de um país com clima tropical, em que na maior parte do ano, as temperaturas são elevadas.

Os principais defeitos encontrados nas rodovias brasileiras são a deformação permanente e o trincamento por fadiga, relacionados diretamente com o tráfego atuante, estrutura do pavimento/mistura e condições climáticas. Ultimamente, estas degradações vêm ocorrendo de forma precoce, prejudicando a estrutura dos pavimentos, muito pelo excesso de carga transportado pelos veículos comerciais ou pela incompatibilidade dos projetos rodoviários. A deformação permanente provoca afundamentos nas trilhas de roda, afundamentos localizados e corrugações nos revestimentos, dificultando a drenagem da água e aumentando o risco de hidroplanagem. Já o trincamento por fadiga é proveniente dos efeitos

cumulativos causados pela repetição de cargas e dos consequentes deslocamentos, resultando em perda de flexibilidade e durabilidade do revestimento.

No Brasil, tanto os métodos para a dosagem como para previsão do comportamento das misturas asfálticas são baseados em métodos empíricos, como por exemplo, a especificação dos ligantes asfálticos por penetração. Todavia, muitos desses problemas se devem à seleção inadequada dos materiais empregados, principalmente pela falta de conhecimento relacionada ao comportamento dos materiais utilizados. Assim, métodos de dosagem que levam em conta o desempenho das misturas asfálticas podem contribuir para o aumento da vida útil do pavimento.

Métodos eficientes para prever o desempenho das misturas asfálticas, em muitos países da Europa e da América do Norte, já são uma realidade consolidada, como é o caso da ferramenta que permite a interpretação da viscoelasticidade das misturas asfálticas, o Módulo Complexo, que, no Brasil, ainda é muito restrito ao meio acadêmico, assim como os métodos para prever o desempenho à deformação permanente e o dano por fadiga.

Algumas técnicas para modificação do esqueleto mineral (Bailey e *Faixa de Agregados Dominantes*) e modificadores empregados nos ligantes asfálticos, vêm sendo utilizadas no Brasil para melhorias das propriedades do concreto asfáltico, principalmente quanto ao trincamento por fadiga e à deformação permanente. O fenômeno de fadiga é de natureza complexa, e está relacionado tanto às características estruturais, quanto de materiais nos pavimentos revestidos por concreto asfáltico. Atualmente, no Brasil, os ensaios disponíveis e protocolos de análises são pouco confiáveis para uma previsão adequada do desempenho de misturas asfálticas perante a fadiga. Muitos pesquisadores têm proposto métodos diferentes de teste e geometrias de amostras para caracterização de dano por fadiga, tais como vigas de flexão, tração indireta em amostras cilíndricas, ensaios em amostras trapezoidais, e outros.

Recentemente foi desenvolvido pelo professor Y. Richard Kim, da *North Carolina State University*, nos Estados Unidos, um novo tipo de ensaio para previsão da vida de fadiga em misturas asfálticas, levando em conta propriedades fundamentais para caracterização efetiva do comportamento das misturas asfálticas. O ensaio consiste em aplicar no corpo de prova uma deformação ou com uma tensão cíclica senoidal, de amplitude constante, até que ocorra a ruptura ou a defasagem do ângulo de fase. Na realização do ensaio são coletados e monitorados além da deformação, a carga, o ângulo de fase e o módulo dinâmico. No programa experimental, em relação aos ensaios tradicionais, como é o caso do ensaio de fadiga à compressão diametral, vem a ser mais simplificado, demandando menos corpos de prova e muito menos tempo de realização do ensaio (MARTINS, 2014).

Isto posto, o presente trabalho tem o intuito de contribuir para a implementação e disseminação do novo ensaio de Fadiga à Tração Direta Uniaxial Cíclico, recentemente implantado no Brasil através do CENPES (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello), UFC (Universidade Federal do Ceará) e pela UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul). Também visa estudar o comportamento de misturas asfálticas quanto à influência do tipo de ligante asfáltico utilizado, do método de dosagem e do arranjo granulométrico quanto as suas propriedades viscoelásticas, de deformação permanente e de dano por fadiga.

Por fim, este estudo busca responder a questões essenciais como, qual o benefício da utilização do método Bailey e/ou a utilização das diferentes faixas granulométricas? O ligante asfáltico convencional da refinaria do estado do Rio Grande do Sul é adequado ao tráfego rodoviário? Que benefícios a utilização de ligantes modificados apresentam nestas misturas? Ou ainda, qual a influência no teor de projeto dos métodos SUPERPAVE *versus* Marshall no desempenho das misturas? Justificando assim, o conhecimento dos principais fatores que influenciam no desempenho das misturas asfálticas perante estas propriedades.

1.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo desta pesquisa é avaliar o comportamento mecânico das misturas asfálticas com diferentes composições e faixas granulométricas com ligantes asfálticos convencional, modificado e altamente modificado.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são enumerados como segue:

- a) Determinar os parâmetros das dosagens Marshall e SUPERPAVE, analisando a influência das composições granulométricas, do Método Bailey e Método de tentativa e erro (método convencional); das faixas granulométricas, Faixa B e C do DNIT- ES 031/2006; e do tipo de ligante asfáltico no teor de projeto de dosagem;
- b) Verificar o comportamento mecânico das misturas estudadas, para as propriedades de Resistência à Tração e Módulo de Resiliência, em diferentes temperaturas e frequências de carregamento;

- c) Avaliar a influência das misturas estudadas no comportamento viscoelástico linear por meio do ensaio de Módulo Complexo Uniaxial;
- d) Verificar o comportamento perante a deformação permanente das misturas dosadas com auxílio dos métodos de dosagem, Marshall e SUPERPAVE, das composições e faixas granulométricas, e do tipo de ligante asfáltico utilizado por meio do ensaio de *Creep* Dinâmico (*Flow Number*);
- e) Implementar o ensaio de Fadiga à Tração Direta Uniaxial Cíclico no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), contribuindo com o conceito de dano por fadiga através da tração direta que ainda é pouco disseminado no Brasil;
- f) Investigar, através da influência das variáveis de misturas estudadas nas propriedades de dano à fadiga, o ensaio de Fadiga à Tração Direta Uniaxial Cíclico.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O comportamento dos pavimentos asfálticos brasileiros apresentando desempenho insatisfatório devido à alguns fatores, tais como, o aumento do tráfego de veículos pesados, o crescimento das cargas e aumento da pressão de enchimento dos pneus e da obsolescência da metodologia de projeto, que causam defeitos de deformação permanente nas trilhas de roda e trincamento por fadiga (além de outros defeitos não estruturais). Assim, é de suma importância o estudo de novas tecnologias para revestimento asfáltico, tanto de seus componentes individuais – ligantes e agregados – quanto da mistura, de maneira a atender à crescente demanda de durabilidade aliada à escassez de recursos do setor rodoviário. Ainda, de modo a se ter uma previsão do desempenho antes de aplicá-lo nos pavimentos, reduzindo os gastos com restaurações.

O comportamento mecânico dos revestimentos asfálticos depende da obtenção de uma mistura com graduação adequada e de um teor de projeto bem dosado, de modo a proporcionar conforto e segurança ao rolamento dos veículos, além de apresentar durabilidade e resistência frente as solicitações do tráfego e variações nas condições climáticas. O revestimento asfáltico deve se deformar prontamente sem romper e, recuperar-se elasticamente para não fluir plasticamente, resistindo às principais tensões geradas pelo tráfego.

Há dois tipos de solicitações mecânicas em estruturas de pavimentos flexíveis. A primeira delas é a flexão repetida, a qual gera tensões de tração no revestimento e conseqüentemente resulta em fadiga do material (trincamento por fadiga). A segunda é a compressão na superfície do revestimento, que contribui para o acúmulo de deformações permanentes (MOTTA e PINTO, 1994)

Neste capítulo será abordado o comportamento das misturas asfálticas, relacionados à rigidez, deformação permanente e fadiga.

2.1 COMPORTAMENTO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

O pavimento é uma estrutura formada por múltiplas camadas capazes de suportar a ação danosa do tráfego e do meio ambiente, propiciando aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Já o revestimento asfáltico é a camada destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e distribuir, de forma atenuada, às camadas inferiores. O revestimento asfáltico é constituído pela combinação do ligante asfáltico e agregado mineral (mistura asfáltica), ainda, pode ser composto por material de enchimento

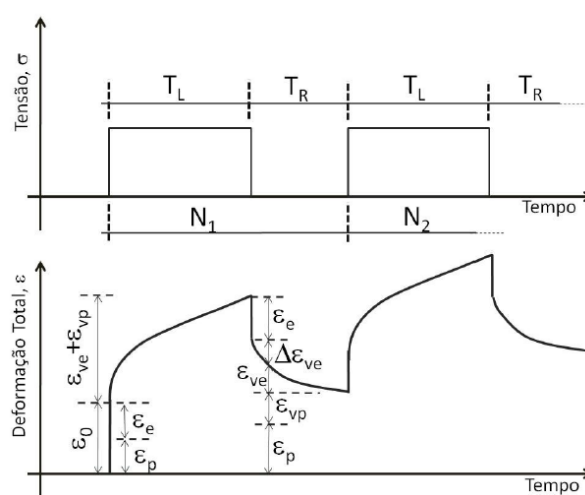
(fíler mineral), aditivos, e outros. O desempenho das misturas depende não só das propriedades de seus componentes individuais, mas também da combinação deles (agregados e ligante).

Os concretos asfálticos herdaram do ligante a viscoelasticidade, por isso são suscetíveis a variações de temperatura e de frequência de aplicação da carga. Essa viscoelasticidade exerce uma combinação no comportamento das misturas asfálticas (elásticos e viscosos). Pode-se interpretar da seguinte forma: quando esses materiais são submetidos a carregamentos rápidos, tempo de duração pequeno e altas frequências, exibem um comportamento próximo dos sólidos elásticos. Já quando o carregamento é aplicado por um longo período, tempo de duração alto e baixas frequências, o material tende a apresentar deformações permanentes, assemelhando-se ao comportamento de fluidos viscosos.

Vários trabalhos científicos publicados no Brasil e no exterior, afirmam que as misturas asfálticas apresentam no domínio das pequenas deformações o comportamento representado pelo modelo viscoelástico (Pinto, 1991; Park e Kim, 1998; Momm, 2001; Daniel e Kim, 2002; Soares e Souza, 2002). Entretanto, para algumas condições, o concreto asfáltico exibe parcelas elásticas e plásticas, e ainda, viscoplásticas.

A Figura 1 mostra as parcelas de deformações de um material viscoelastoplástico quando submetido à uma sollicitação particular.

Figura 1 - Representação das componentes de deformação de materiais viscoelastoplástico



Fonte: Adaptado de Sides, *et al.* (1985)

Quando aplicada uma tensão no material e mantendo-a constante (T_L), o material responde inicialmente com a deformação (ϵ_0), que é composta por uma parcela elástica (ϵ_e) e uma parcela plástica (ϵ_p). Juntamente com essas deformações viscoelásticas com o

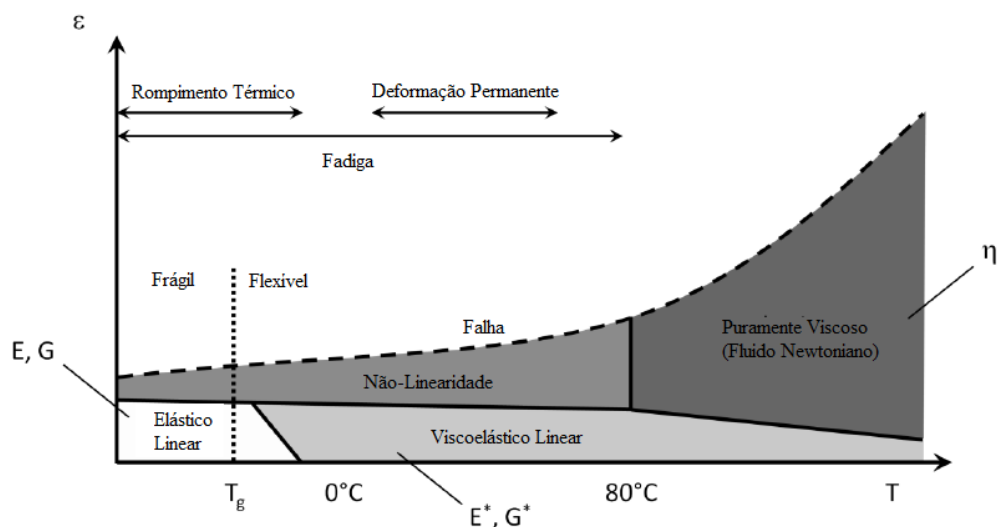
carregamento, surgem as deformações viscoplásticas (ε_{ve} e ε_{vp}). Já no momento em que há o descarregamento, desenvolve-se uma deformação elástica, seguida da parcela viscoelástica durante o período sem carregamento (T_R), e, com a sequência dos carregamentos, o material acumula deformações plásticas.

Nota-se que, dependendo da magnitude, tempo, taxa e temperatura de carregamento, essas parcelas têm diferentes graus de importância. As misturas asfálticas geralmente são caracterizadas pelo modelo de viscoelasticidade. Christensen (2003) comenta que a aplicação da teoria da viscoelasticidade linear é recente, e de certa forma ocorre pela aplicação em larga escala dos materiais poliméricos, porém o comportamento desses materiais demonstra respostas mecânicas que se apresentam fora da teoria da elasticidade linear. Ainda, o autor comenta que a teoria da elasticidade considera que os materiais possuem capacidade de armazenar energia mecânica sem dissipá-la, já um fluido viscoso (newtoniano), é caracterizado por dissipar a energia sem armazená-la, levando em conta um estado de tensão não hidrostático.

Existem então, materiais que possuem a propriedade de dissipar e armazenar energia mecânica, exibindo a característica de elasticidade instantânea e de fluência. Ou seja, estes materiais são caracterizados com o efeito de memória, a principal característica é a dependência relativa ao estado de tensões do passado, não levando em conta apenas a dependência do estado de tensão atual (CHRISTENSEN, 2003). Melo (2014) comenta que é essa dependência temporal do campo de tensão e deformação advinda dos fenômenos de fluência e relaxação, que confere aos materiais viscoelásticos a denominação de materiais com memória.

Mangiafico (2014) demonstra através da Figura 2 que, dependendo da tensão aplicada, os materiais apresentam comportamentos distintos. Se a tensão é de pequena amplitude e com um número de ciclos reduzido, o material assume comportamento viscoelástico linear, e seu comportamento viscoso é desprezado (presumindo como um material elástico linear) a temperaturas muito baixas. No entanto, se é aplicada uma tensão pequena, há um número de ciclos elevado, poderá ocorrer fadiga, conduzindo o material à falha. Já se o material está sujeito à tensão de amplitude grande, o comportamento se torna não linear. Os esquemas propostos de domínios do comportamento para ligantes e misturas asfálticas devem ser considerados como indicações gerais. Estes valores-limites entre os diferentes domínios são mostrados apenas como indicações das ordens de magnitude. Na realidade, a transição entre os domínios não ocorre tão abruptamente.

Figura 2 - Domínios do comportamento típico dos materiais asfálticos, dependendo da amplitude de deformação (ϵ) e da temperatura (T) (T_g representa a temperatura de transição vítrea), para um determinado número de ciclos.



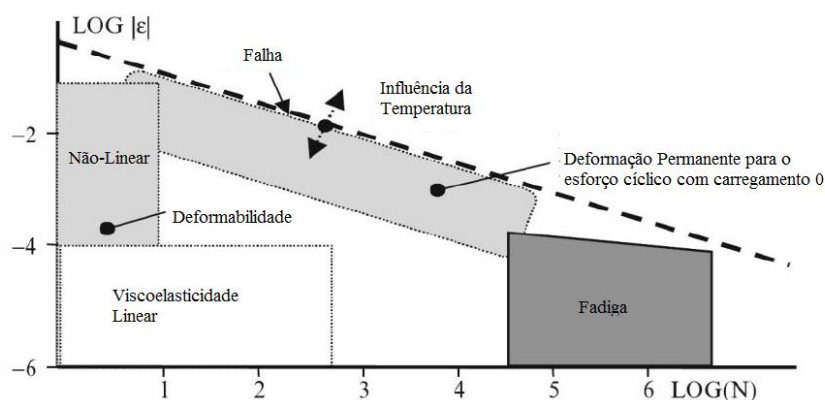
Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014).

Esses comportamentos dependem dos níveis de tensão e deformação aos quais os materiais são submetidos e ainda, conforme comenta Ferry (1980), o material pode receber uma deformação máxima sem entrar no domínio de não linearidade. Evidentemente, isso depende principalmente do tipo de material e da temperatura utilizada. Desta forma, as misturas asfálticas podem exibir tanto o comportamento linear quanto o comportamento não linear. Sendo assim, os principais parâmetros viscoelásticos, como módulo dinâmico e o ângulo de fase, são definidos no domínio da viscoelasticidade linear (SCHAPERY, 1969).

Uma vez que a rigidez de uma mistura asfáltica, expressa pelo módulo complexo, é dependente da temperatura e da frequência de aplicação de carga, e relacionado à velocidade em que os veículos circulam, quando um material apresenta rigidez elevada em baixas temperaturas e altas frequências, tende a um comportamento elástico. Por outro lado, a rigidez é baixa para altas temperaturas e baixas frequências, tendendo a um comportamento viscoso. Para a obtenção da influência do tempo de carregamento e da temperatura, os ensaios desses materiais devem ser executados em diferentes frequências de carga e temperatura.

Como é comentado por Di Benedetto *et al.* (2013), a caracterização viscoelástica deve estar dentro do limite de viscoelasticidade linear (Figura 3) para níveis de deformações menores que 100 microdeformações, reduzindo a possibilidade de induzir dano no material ou não atingindo o comportamento não linear, para que não haja a deformabilidade.

Figura 3 - Domínios do comportamento mecânico típicos de misturas asfálticas dependendo da amplitude de deformação ϵ e número de ciclos n , para uma dada temperatura



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

Para um bom entendimento do comportamento de misturas asfálticas, é necessário o conhecimento da natureza das solicitações, o tipo de resposta a evolução das deteriorações no tempo. Assim, os ensaios no domínio de frequência, como é o caso do módulo complexo permitem descrever o comportamento mais próximo do real, possibilitando o conhecimento da rigidez do material em um amplo espectro de temperaturas e frequências.

Os diferentes métodos analíticos, como “Princípios de Superposição”, possibilitam a construção de curvas, como a curva mestra gerada pelo ensaio de Módulo Complexo, onde claramente há dependência do módulo em função do tempo ou frequência e da temperatura (JUNG, 2006 *apud* Melo, 2014). Com as curvas mestras, é possível obter o mesmo valor de rigidez em qualquer temperatura ou frequência. Dessa forma, compatibilizar o efeito do tempo e da temperatura como único parâmetro, o processo é feito mudando-se horizontalmente os valores de módulo à diferentes temperaturas em uma temperatura de referência (WOLDEKIDAN, 2011).

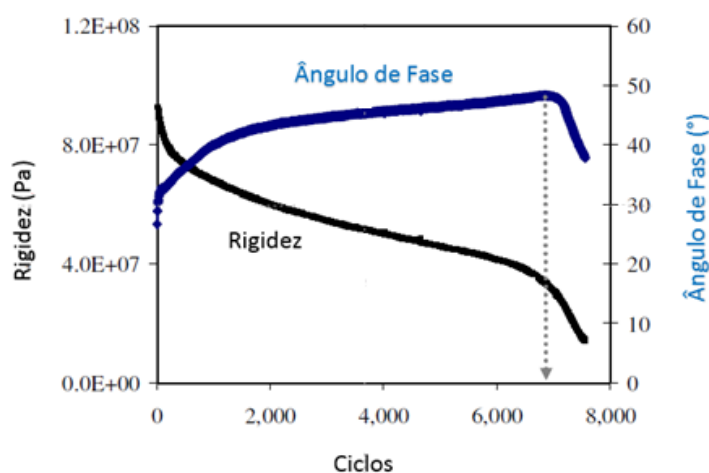
Da mesma forma que a rigidez é importante no comportamento das misturas, o dano por fadiga (formação e propagação de trincas) também o é, uma vez que este tipo de dano é o principal defeito observado em pavimentos brasileiros. Além disso, possui relação de dependência com a temperatura e a frequência de aplicação de carga (ocasionado por carregamento dinâmico).

A tendência na mistura asfáltica é que, uma vez que a aplicação da carga é regular, e, principalmente, sob a forma de carga vertical por um meio de contato flexível (pneu dos veículos) com ciclos regulares, as tensões começam a se acumular. Há também efeitos de influências ambientais, incluindo a radiação ultravioleta, a oxidação, o ciclo térmico, a

infiltração de umidade, e outras que podem degradar o material. Essas influências podem mudar o comportamento dos materiais ou, como os efeitos térmicos, podem ter suas próprias influências cíclicas. Sob a repetição destes distúrbios microfissuras começam a ocorrer dentro da mistura asfáltica compactada.

Um dos maiores desafios na caracterização das misturas asfálticas é a separação das respostas viscoelásticas das respostas causadas pelo desenvolvimento do dano por fadiga. Isto acontece, pois tanto a não linearidade, como o dano, têm efeitos semelhantes na resposta do material, ou seja, módulo dinâmico baixo e, conseqüentemente, aumento no ângulo de fase (CASTELO BRANCO, 2008). O aumento no ângulo de fase e a diminuição no módulo dinâmico são de difícil caracterização pois não ocorre mudança abrupta que evidencie isto. A Figura 4 demonstra o comportamento da rigidez e do ângulo de fase durante um ensaio com dano.

Figura 4 - Rigidez e ângulo de fase *versus* Número de Ciclos do Carregamento



Fonte: Adaptado de Castelo Branco (2008).

Esse comportamento pode ser dividido em três regiões, a primeira com o comportamento linear, a segunda com comportamento não linear e a última região representando dano. A linha pontilhada indicada, mostra a falha (rompimento) da amostra no ensaio e também o fim da região de dano. A primeira região é caracterizada com baixos níveis de tensões, a segunda região é caracterizada pela linearidade da resposta da deformação e, conseqüentemente, com níveis de tensões intermediários. Já a região de dano se caracteriza pelo dano à fadiga, sendo que a cada ciclo de carga, esse dano é adicionado ao material e é evidenciado por altas amplitudes de tensão. O conhecimento desse limite de transição é

importante para que se possa quantificar a energia dissipada durante o comportamento viscoelástico não linear e durante a resposta de dano por fadiga (COUTINHO, 2011).

2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A caracterização do comportamento mecânico das misturas asfálticas, tanto em campo como em laboratório, é uma tarefa complexa em virtude dos parâmetros que definem esse tipo de material serem dependentes de vários fatores (meio ambiente, tempo de aplicação e frequência da carga dos veículos...), e pode se agravar devido à oxidação do ligante.

Desta forma, na caracterização das misturas deve haver um balanço entre a praticidade e, principalmente, precisão, uma vez que nem todas as variáveis podem ser consideradas simultaneamente. Desta forma, dá-se preferência à aspectos considerados de maior relevância para previsão do comportamento das misturas asfálticas em campo.

Nos primeiros dois terços do século XX, a caracterização das misturas e materiais de pavimentação era empírica, restringindo-se em abordagens de dimensionamento de pavimentos pelo método do CBR, ou método da AASHTO até 1986; e a análise da mistura asfáltica através dos ensaios de estabilidade Marshall e Hveem. O primeiro, ainda é amplamente utilizado pela praticidade, mas inapropriado para previsão de desempenho (BERNUCCI *et al.*, 2006).

A tendência mundial é o estabelecimento de métodos de dimensionamento mecânicos para pavimentos flexíveis ou rígidos, novos ou restaurados. Esse método utiliza ferramentas de análise estrutural no cálculo de tensões e deformações e determina os mecanismos de fadiga e de deformabilidade (MEDINA e MOTTA, 2005).

O dimensionamento dos pavimentos por um método mecânico deve considerar parâmetros como: deformabilidade dos materiais, fatores ambientais, tráfego, e critérios de aceitação (vida de fadiga e afundamento de trilha de roda). Assim, o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais é indispensável para o desempenho satisfatório do pavimento ao longo de sua vida útil. Neste contexto, os ensaios dinâmicos ou de cargas repetidas, que procuram simular as condições reais de tráfego, mostram-se ferramentas importantes nesta caracterização.

O conhecimento do comportamento mecânico dos materiais, e as respostas estruturais do pavimento, são capazes de proporcionar aos projetistas uma variedade de alternativas que de forma mais adequada, podem levar a projetos de pavimentos resistentes, duráveis e economicamente viáveis. Este capítulo ilustra os principais ensaios para o conhecimento do comportamento mecânico de misturas asfálticas.

2.2.1 Rigidez

De acordo com Kim (2009), a rigidez em concretos asfálticos é um parâmetro do material, representado pela inclinação da curva de tensão-deformação, sendo essa uma propriedade única (independente do ensaio, do tamanho ou geometria da amostra). O autor comenta ainda, que a rigidez em concreto asfáltico (CA) 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 no mástique, os vazios, o envelhecimento da mistura asfáltica, a reatividade com o oxigênio, e, os aditivos ou modificadores que foram adicionados ao CA.

A análise de rigidez dos pavimentos mais utilizada no Brasil se dá pelo ensaio de Módulo de Resiliência (MR), que nada mais é do que o módulo de elasticidade (E), tendo a mesma definição pela teoria da elasticidade, porém, determinado a partir de cargas repetidas. Por outro lado, em outros países utiliza-se o ensaio de Módulo Complexo, que no Brasil se restringe ao meio acadêmico.

Com o ensaio de módulo complexo existe a possibilidade de contabilizar os efeitos da temperatura e principalmente o tempo de carregamento nas propriedades dos materiais asfálticos. Características viscoelásticas lineares podem ser obtidas por meio deste ensaio que consiste na aplicação de um carregamento de compressão axial senoidal em Corpos de Prova (CPs) cilíndricos, na medição dos deslocamentos verticais correspondentes.

Os ensaios de Módulo de Resiliência e Módulo Complexo, apesar de ambos medirem a rigidez das misturas asfálticas, são métodos com características diferentes (Tabela 1). Conforme a norma brasileira (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. Já o Módulo Complexo leva em consideração diferentes frequências, temperaturas, carregamentos de compressão axial senoidal, obtendo-se as curvas mestras dos materiais, se pode 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. Desta forma, pode-se dizer que o Módulo Complexo é uma característica mais próxima do material (BABADOPULOS, 2013).

Tabela 1 - Diferenças entre Módulo de Resiliência e Módulo Complexo

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

As principais diferenças entre o Módulo de Resiliência e o Módulo Complexo é que, neste último, levam-se em conta as parcelas elásticas e não elásticas das deformações, enquanto no Módulo de Resiliência só a parcela elástica é considerada no cálculo do módulo.

Os estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais usados em pavimentação foram iniciados na década de 1930 com Francis Hveem, que foi o primeiro a relacionar as deformações recuperáveis (resiliência) com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos. Foi ele também quem adotou o termo “resiliência”, que é definido classicamente como “energia armazenada num corpo deformado elasticamente, a qual é devolvida quando cessam as tensões causadoras das deformações”. Hveem criou um equipamento chamado estabilômetro para medir essas deformações verticais através de sensores eletromecânicos (*strain gages*). O nome módulo de resiliência (*resilient modulus*, em inglês) foi criado para que não fosse confundido com o módulo de Young, determinado estaticamente. Outro termo utilizado é rigidez, principalmente no estudo de misturas asfálticas, onde indica a capacidade de o material resistir às deformações (MEDINA E MOTTA, 2015).

A seguir é realizada uma revisão sobre os ensaios (Módulo de Resiliência e Módulo Complexo), para avaliação da rigidez de misturas asfálticas.

2.2.1.1 Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas é padronizado no Brasil através da norma DNIT-ME 135/2010 e ABNT NBR 16018/2011, e pela norma internacional AASHTO TP 31-1994. Porém, a norma brasileira, DNIT-ME 135/2010, não comenta sobre a deformação específica, tanto a instantânea, como a específica total, como é realizado na ASTM D 4123:1982. Estas deformações acabam permitindo a obtenção de dois valores de Módulo de Resiliência, o MR instantâneo e o total. O MR instantâneo é calculado com base na deformação horizontal que ocorre na fase de descarregamento de um ciclo de carga-descarga. O MR total, utiliza a deformação total recuperável, que inclui a deformação recuperável instantânea e a dependente do tempo durante a fase de descarregamento.

Por outro lado, a NBR 16018/2011 determina, a partir da respectiva curva de deslocamento *versus* tempo, os deslocamentos instantâneos por regressão, dividindo-se a curva deslocamento (horizontal e vertical) *versus* tempo em três segmentos: (I) segmento 1: representa a porção linear do período de descarregamento; (II) segmento 2: representa o trecho curvilíneo que conecta o Segmento 1 ao início da fase de recuperação viscosa; e (III) segmento 3: representa a fase de recuperação viscosa.

O ensaio é realizado aplicando uma carga repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico (10,2cm de diâmetro e altura variável, com valor aproximado de 6,35cm), num intervalo de tempo de 0,1 s e repouso de 0,9 s. Essa carga gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação de carga. Dessa forma, mede-se o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada. Este tipo de aplicação de carga simula o efeito do tráfego, o qual aplica cargas transientes do movimento dos veículos.

Os picos de tensão e de deformação recuperável usados para calcular as constantes elásticas resilientes, mesmo que esses picos não ocorram ao mesmo tempo, em um ensaio dinâmico como este (BARKSDALE *et al.* 1997 *apud* BRITO 2006). A definição de "deformação recuperável" varia de padrão com a norma, sendo uma porção da deformação total gerado em um ciclo de carregamento. Devido à suposição de que a deformação recuperável é utilizada no cálculo MR, considera-se que só deformação elástica está presente no teste, embora isto não seja verdadeiro para misturas asfálticas (SOARES E SOUZA, 2003).

O MR em misturas asfálticas pode ser determinado com vários tipos de cargas repetidas: 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. No Brasil, o

ensaio mais utilizado é o de Tração por Compressão Diametral (tração indireta), tanto pela cultura de utilização desse parâmetro, essencial para o dimensionamento de pavimentos (após o desenvolvimento dos métodos mecânicos), quanto pela dificuldade de aquisição dos equipamentos para obtenção do Módulo Complexo.

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

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

Para as misturas asfálticas, o MR pode variar com o tipo de mistura, faixa granulométrica, tipo de ligante (maior quanto menor a penetração do asfalto ou maior a sua viscosidade), propriedades volumétricas, energia de compactação, temperatura de compactação e temperatura do ensaio. O MR para materiais viscoelásticos varia tanto com o tempo de aplicação da carga como com o tempo de repouso, uma vez que o deslocamento recuperável depende dos dois. Para materiais viscoelásticos lineares, embora o deslocamento total possa variar com o número de ciclos de aplicação de carga devido ao acúmulo de deslocamentos não-recuperáveis, o deslocamento não-recuperável deve se manter constante ao longo dos ciclos.

No entanto, o uso de uma única temperatura e uma única frequência de carregamento negligencia o comportamento viscoelástico (dependência de tempo ou frequência) natureza da mistura asfáltica e sua suscetibilidade à temperatura, herança do ligante asfáltico. Procedimentos e tamanhos de amostras diferentes também podem levar a resultados diferentes (no Brasil, utiliza-se as amostras moldadas no Marshall, apresentando 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura) (SPECHT *et al.*, 2017).

Há uma diferença entre os métodos de dosagem (Marshall e Superpave), uma vez que em energias equivalentes e teores de ligante similares, o valor do MR e RT variam. Isso ocorre,

pois, a estrutura de agregado mineral resultante do tipo de compactação, impacto ou amassamento, são diferentes. Em relação ao ligante, os asfaltos modificados por polímero ou por borrachas apresentam valores de MR inferiores às misturas com asfaltos de consistência dura.

De acordo com uma pesquisa realizada pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1998), sobre o comportamento mecânico de misturas asfálticas modificadas, mostram-se baixos valores de módulo de resiliência para misturas com ligantes modificados em relação as misturas confeccionadas com ligante convencional. Isto ocorre pelo fato de que a introdução de polímero no ligante asfáltico é capaz de melhorar a flexibilidade das misturas, visualizada com base na redução do módulo de resiliência e no aumento relativo da resistência à tração em relação às misturas preparadas com ligantes convencionais (LEITE, 1999).

Motta (1998) descreve que muitos fatores influenciam na estimativa do Módulo de Resiliência de misturas asfálticas e não é trivial se obter uma relação simples de estimativa que leve em conta todos os aspectos da mistura. Brito (2006) enfatiza que juntamente com todas essas variáveis que influenciam no Módulo de Resiliência, adiciona-se ainda as variáveis ambientais, como a temperatura, umidade e qualquer outro fator que altere as propriedades do material durante a vida de serviço. E conforme comenta Widyatmoko (2002), uma variação de 1°C em uma mistura asfáltica poderá gerar uma variação na sua rigidez em até 10%.

2.2.1.2 Módulo Complexo

A determinação das propriedades viscoelásticas em misturas asfálticas é de fundamental importância para o estudo do comportamento mecânico. Desta forma, 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 (SIDES *et al.*, 1985).

Um ensaio que leve em consideração os efeitos viscoelásticos em sua formulação se torna imprescindível na correta caracterização de misturas asfálticas e na consequente obtenção das tensões e deformações, necessárias ao dimensionamento de estruturas de pavimentos por métodos mecanísticos.

Então, o ensaio de módulo complexo foi desenvolvido para medir tanto a viscoelasticidade, quanto propriedades viscoelásticas de materiais de pavimentação. Por definição, o módulo complexo ($|E^*|$) é um número complexo que relaciona tensão e deformação

para materiais viscoelásticos sujeitos a carregamento senoidal aplicado num certo domínio de frequência, sendo o valor absoluto do módulo complexo definido como módulo dinâmico. Para determinação do módulo complexo de misturas asfálticas é utilizada a norma americana AASHTO T 342/2011.

A norma da AASHTO T 342/2011 para o ensaio de módulo complexo estabelece um procedimento de ensaio com frequências que variam de 0,1Hz a 25Hz em temperaturas de -10°C a 54,4°C, e que o carregamento dinâmico depende da rigidez do material, podendo variar de 15kPa a 2800kPa. Dessa forma, torna a construção de curvas mestras mais precisas, pois faz uma varredura mais ampla nas propriedades das amostras. As amostras devem apresentar dimensões de 100mm de diâmetro e 150mm de altura.

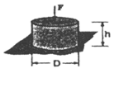


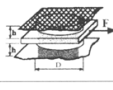

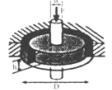
Por outro lado, a norma da ASTM D 3497 estabelece apenas três temperaturas de ensaio (5°C, 25°C e 40°C), três frequências de carregamento (1Hz, 4Hz e 16Hz), e carregamentos com valores de até 200kPa, tornando imprecisa a construção das curvas mestras. Os CPs possuem diâmetro mínimo de 100mm e relação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

O ensaio é realizado aplicando um carregamento axial semi-senoidal (*haversine*) em Corpos de Prova cilíndricos, onde são medidos os deslocamentos verticais correspondentes. Di Benedetto e Corté (2005) comentam que o domínio desses deslocamentos/deformações deve ser pequeno (menor que $100 \cdot 10^{-6}$ m/m ou 100 microdeformações) para que não ocorra dano ao material. Avaliando uma mistura asfáltica no domínio das pequenas deformações o comportamento esperado é o viscoelástico linear.

O módulo complexo é um número complexo capaz de representar a lei constitutiva de materiais viscoelásticos lineares em solicitações harmônicas. Atualmente, existe uma série de ensaios para a obtenção do módulo complexo em misturas asfálticas e o ensaio pode ser realizado com vários tipos de corpos de prova, entre eles, amostras cilíndricas, com diâmetro mínimo de 100 mm, usado por pesquisadores americanos; e amostras em formato de vigas trapezoidais à flexão em dois pontos, propostos pelos pesquisadores do *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) (BRITO, 2006).

Nas Figuras 5 e 6 estão apresentados os ensaios considerados homogêneos e não homogêneos.


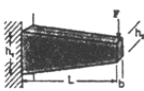
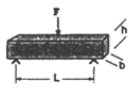
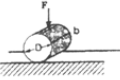

Figura 5 - Ensaios homogêneos

(a)	Principle	Shape factor* γ [L ⁻¹]	Literature
Tension compression (with or without confining pressure)		$\frac{h}{\pi D^2}$	Charif [3] Doubbaneh [12] Witzcak <i>et al.</i> [27]
Shearing test		$\frac{l}{hc}$	Assi [1] de La Roche [5]
Constant height shearing test		$\frac{h}{\pi D^2}$	Sousa [24]
Shearing test machine		$\frac{h}{\pi D^2}$	Lempe <i>et al.</i> [20]
		$\frac{h}{2Lb}$	
Co-axial shearing test**		$\frac{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}{2\pi h}$	Gubler [17]

Fonte: Di Benedetto *et al* (2001)

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

Figura 6 - Ensaio não homogêneos

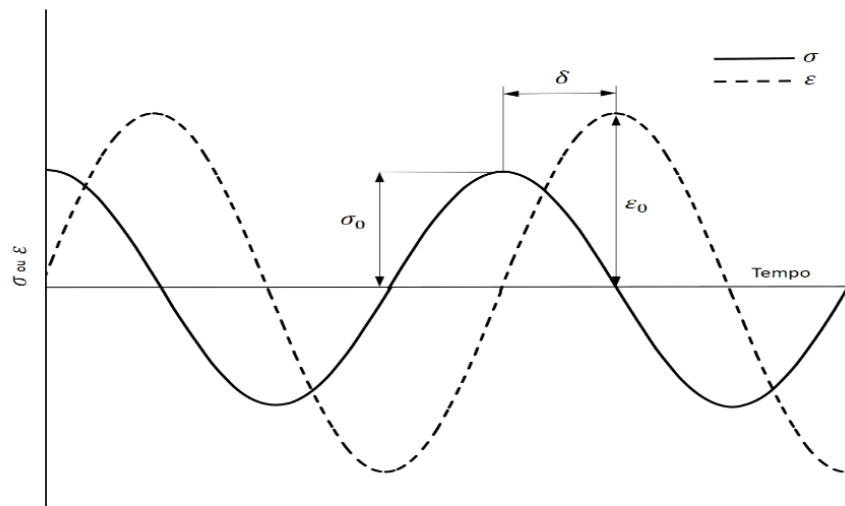
(b)	Principle	Shape factor* γ [L ⁻¹]	Literature
2-point bending		$\frac{4L^3}{bh^3}$	Francken <i>et al.</i> [13]
		$\frac{12L^3}{b(h_1 - h_2)^3} \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1} \right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right]$	Huet [18] Chauvin [4]
3-point bending		$\frac{24L^3}{\pi^4 bh^3}$	Myre [21]
Indirect tensile test		$\frac{1}{b} (v + 0.27)$	Brown [2] Kennedy <i>et al.</i> [19] Tayebali <i>et al.</i> [25]
4-point bending		$\frac{2L^3 - 3Ll^2 + l^3}{8bh^3}$	Pronk [23]

Fonte: Di Benedetto *et al* (2001).

No Brasil, apesar de recente, a utilização do módulo complexo é restrita ao meio acadêmico. Desde a década de 1960, investiga-se a substituição do ensaio de módulo de resiliência pelo módulo complexo, sendo que ambos são indicadores da propriedade de rigidez de misturas asfáltica. A maior diferença entre os ensaios é a vantagem de incluir os efeitos da temperatura e do carregamento nas propriedades dos materiais asfálticos, o que se consegue com o ensaio de módulo complexo.

No módulo complexo para cada temperatura, há uma curva de frequência ou tempo por módulo dinâmico ou ângulo de fase. O módulo complexo é dado pela razão entre a amplitude da tensão aplicada e a amplitude da deformação (Figura 7) correspondente a 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 parcela elástica), e valor próximo de 90°, a mistura tende a apresentar um comportamento mais viscoso (maior parcela viscosa) (ONOFRE, 2012).

Figura 7 - Esquema do ensaio de módulo complexo uniaxial



Fonte: Mensch (2017).

Como é visto na Figura 7, a definição da equação matemática (Equação 1) do módulo complexo se dá pela tensão dinâmica máxima (σ_0) dividida pela deformação axial recuperável máxima (ϵ_0), desta forma:

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

A matemática complexa proporciona uma ferramenta matemática que auxilia na resolução do comportamento viscoelástico das misturas asfálticas em carregamentos cíclicos. O carregamento senoidal uniaxial pode ser representado da forma complexa na Equação 2 (Kim, 2009):

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

Onde:

σ_0 = amplitude da tensão

ω = velocidade angular, a qual é relacionada com a frequência pela Equação 3.

$$f = 2\pi\omega \quad (3)$$

Sendo a resposta a deformação conforme Equação 4.

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

Onde:

ε_0 = amplitude da deformação

φ = ângulo de fase.

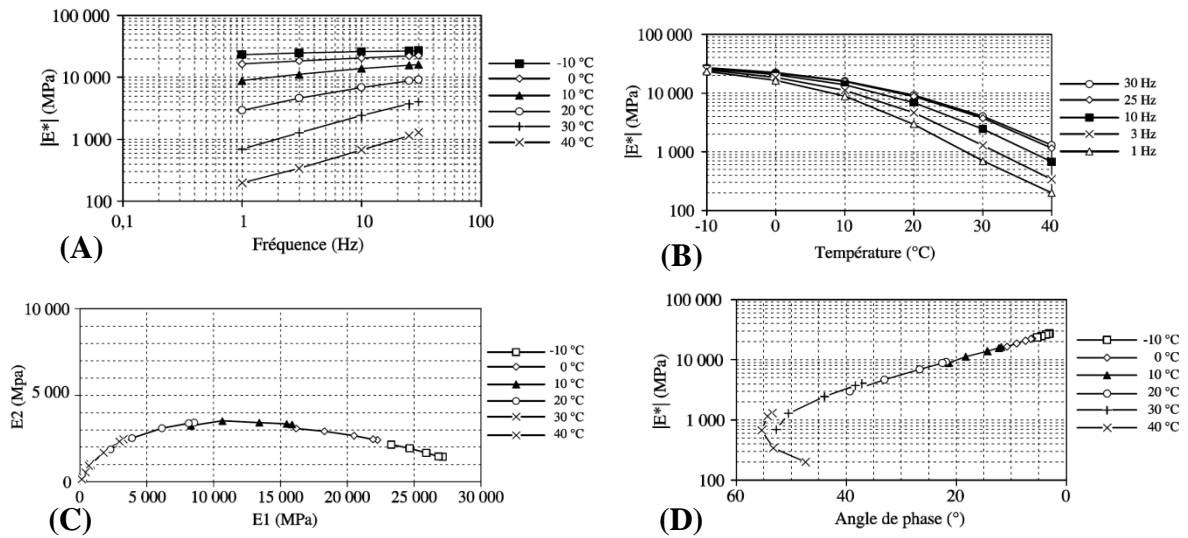
i = número imaginário ($= \sqrt{-1}$)

Sendo que, as porções real e imaginária do módulo complexo ($|E^*|$) são denominadas E_1 e E_2 , onde: E_1 é denominado módulo elástico real e representa a parte real do módulo e que está associado ao comportamento elástico do material (Equação 5), no qual avalia a parte recuperável da energia armazenada; E_2 é denominado módulo da perda, representando a parte imaginária do módulo e está associada ao comportamento viscoso irreversível do material devido a uma dissipação de energia. Este valor representa a energia produzida por atrito interno no material (Nascimento, 2008). Podem ser descritas da seguinte forma:

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (5)$$

Os resultados obtidos através do ensaio de módulo complexo (E_1 , E_2 , E^* e φ) são demonstrados através da Figura 8, as curvas isothermas (A), isócronas (B), plano Cole-Cole (C) e do espaço de Black (D), a partir dos quais se pode verificar o comportamento do material quanto a rigidez.

Figura 8 - Curvas Isotermas (A), Isócronas (B), Plano cole-cole (C) e Espaço Black (D)



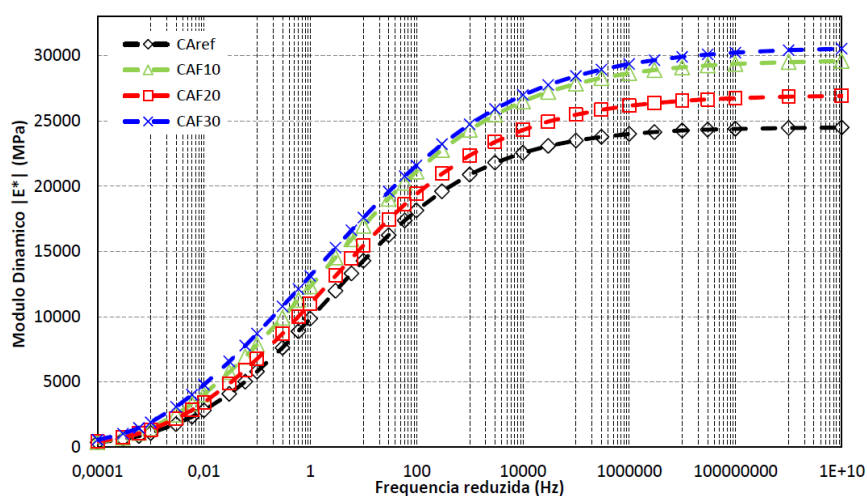
Fonte: Di Benedetto e Corté (2005).

As curvas isotermas (A) são obtidas para cada nível de temperatura do ensaio, no qual é traçado o módulo dinâmico em função da frequência na escala logarítmica. A suscetibilidade cinética pode ser apreciada pela inclinação da curva em relação à uma temperatura. Já as curvas isócronas (B) representam o módulo complexo para cada nível de frequência, em função da temperatura em escala semi logarítmica. Permitindo a verificação da suscetibilidade térmica das misturas em função da variação do módulo para a variação da temperatura.

O plano cole-cole (C) é realizado em função da parte imaginária E_2 pela parte real E_1 em coordenadas aritméticas independente da frequência e da temperatura. O espaço black (D) é o módulo complexo em função do ângulo de fase em uma escala logarítmica, onde, se a sobreposição frequência-temperatura for perfeita a curva deve ser única. É possível, desta forma visualizar na curva a zona dos módulos em que há uma redução do ângulo de fase para temperaturas elevadas.

A curva mestra (Figura 9) é obtida pela translação das isotermas (curvas módulo-frequência) nas diferentes temperaturas. Dessa forma, a viscoelasticidade do material é caracterizada de modo que na curva horizontal se representa a mistura com comportamento puramente elástico, enquanto a vertical mostra o comportamento da mistura suscetível às variações de temperatura e de frequência (MOMM, 1998). Ferry (1980) comenta que este princípio permite que os dados obtidos a diferentes temperaturas sejam deslocados horizontalmente relativamente a uma temperatura de referência.

Figura 9 - Exemplo de curva mestra de módulo complexo



Fonte: Centofante (2016).

O módulo complexo cresce em função da frequência, e isto se deve a um período de tempo menor em carga, não havendo tempo para manifestações de deformações viscoelásticas. Quando a frequência é muito alta, o módulo complexo atinge seu maior valor, pois existem predominantemente deformações elásticas no material. Quando a temperatura é baixa, o tempo de carregamento é longo e as deformações viscoelásticas podem se manifestar em sua totalidade, provocando assim módulo complexo baixo. Para frequências muito baixas, o módulo complexo atinge seu menor valor, assim explicando o formato da curva mestra (THEISEN, 2011).

O valor do módulo complexo varia em função da temperatura e frequência do ensaio, e, principalmente, pela formulação do concreto asfáltico, que depende de sua natureza, teor de ligante e de finos, esqueleto mineral e do modo e grau de compactação. O aumento da temperatura provoca diminuição da rigidez do corpo de prova, nesta condição, a defasagem aumenta até um valor máximo, o que se traduz em um comportamento mais viscoso. De uma maneira geral, quanto mais rígido for o ligante asfáltico, maior será o valor do módulo complexo da mistura asfáltica.

Di Benedetto e De La Roche (1998) dividem em duas categorias os parâmetros que influenciam os valores de Módulo Complexo nas misturas asfálticas:

- I. Parâmetros relativos às condições de ensaio: frequência de aplicação da carga, temperatura, nível de carregamento e tipo de ensaio;
- II. Parâmetros relativos à composição da mistura: tipo e teor de ligante asfáltico, volume de vazios, tipo de agregados e fíler.

A mineralogia e a forma dos agregados também possuem forte influência no comportamento das misturas asfálticas. Quando o ligante asfáltico apresenta comportamento mais viscoso (baixas frequências e temperaturas elevadas), o esqueleto mineral influencia no comportamento da mistura, pois a curva granulométrica está vinculada ao volume de vazios, de modo que a diminuição do volume de vazios resulta em aumento do módulo complexo.

2.2.2 Deformação Permanente

No Brasil, o trincamento por fadiga e a deformação permanente são os principais defeitos estruturais encontrados nos pavimentos. Outros defeitos como perda de adesividade e durabilidade por oxidação e desagregação são importantes, mas podem ser resolvidos ou contornados na fase de definição/escolha dos materiais (MOURA, 2010).

Yoder & Witczac (1975) afirmam que a deformação permanente ou afundamento de trilha de roda pode ser definida como uma distorção na superfície do pavimento causado pela consolidação de uma ou mais camadas do pavimento. Define-se, então, a deformação permanente como o acúmulo de pequenas ou grandes deformações não recuperáveis decorrente da aplicação de carga proveniente do tráfego de veículos, e, pode ser atribuída ao revestimento, ou às subcamadas, ou ainda a uma combinação de efeitos, conforme mostra a Figura 10. As camadas não-asfálticas abaixo do revestimento podem apresentar deformações permanentes por densificação adicional pelo tráfego e por ruptura ao cisalhamento.

Figura 10 - Deformações permanentes em pavimentos asfálticos



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al* (2007).

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 solevamento e pode, ainda, apresentar afundamento plástico ou de consolidação.

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, conforme a norma do DNIT 005/2003-TER. Os afundamentos por consolidação têm sua origem pela deformação acentuada das camadas inferiores granulares, ou de solo, com a diminuição de volume, ou, 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, assim como qualquer outro defeito nos pavimentos asfálticos, causa desconforto e insegurança nas rodovias, 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.

No revestimento asfáltico, a deformação permanente ocorre devido às características visco elasto plásticas do material. 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. Portanto, 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.

Nas misturas asfálticas, os problemas são complexos e muitos fatores devem ser investigados. Pode-se citar o uso de elevados teores de ligante nas misturas e o tráfego no revestimento ainda quente. Outro ponto importante é a densidade adequada para o bom desempenho do revestimento; densidades fora das de projeto com o elevado número de repetições de carga pesada dos eixos aliadas às elevadas pressões de enchimento dos pneus poderá induzir ao afundamento das trilhas de roda (SÁ, 1996).

Muitos são os fatores que afetam a deformação permanente, Nascimento (2008) apresenta detalhadamente os fatores, dentre eles podemos 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, 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;

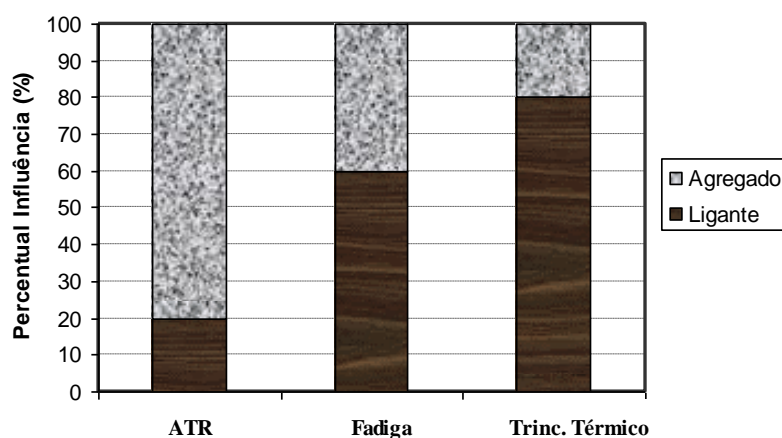
- II. Ligante Asfáltico: excesso de ligante - tende a funcionar como lubrificante facilitando o movimento relativo entre as partículas; viscosidade do ligante asfáltico - o uso de ligantes mais duros ou modificados aumenta a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas.

Estes fatores podem ser a causa ou contribuir para a ocorrência de afundamento em trilha de roda (ATR) no revestimento asfáltico. Ainda, outro fator causador do defeito, é a compactação insuficiente da camada, o que resultaria em volume de vazios elevado, propiciando a ocorrência de deformações permanentes prematuras. Um esforço maior de compactação leva a um maior contato entre as partículas de agregados.

A *Federal Highway Administration* (FHWA, 2002) em uma avaliação, mostrou que os agregados exercem maior influência na resistência à deformação permanente quando comparados ao ligante asfáltico. Pela Figura 11, percebe-se que os agregados respondem a cerca de 80% da responsabilidade de prevenção ao ATR.

A distribuição granulométrica dos agregados em misturas asfálticas tem influência significativa na deformação permanente. Isso acontece devido ao intertravamento a que os grãos devem estar submetidos, com os agregados mais finos ocupando os vazios entre os agregados maiores.

Figura 11 - Influência do agregado e do ligante no desempenho de uma mistura



Fonte: Adaptado de FHWA (2002).

De acordo com Nascimento (2008), a melhor granulometria seria aquela onde ocorre o melhor empacotamento dos agregados (máxima densidade), pois esse arranjo resultaria em maior estabilidade pelo seu elevado contato partícula-partícula, reduzindo a porcentagem de VAM (vazios do agregado mineral). Por outro lado, na mistura asfáltica deve haver um espaço

mínimo para a incorporação do ligante asfáltico, visando a durabilidade, além de vazios com ar para evitar a exsudação do material e a instabilidade do sistema.

Roberts *et al.* (1996) comentam que os agregados utilizados em misturas asfálticas devem ser cúbicos ao invés de chatos ou alongados, pois após a compactação, partículas mais angulares apresentam maior intertravamento e atrito interno, e conseqüentemente, maior estabilidade mecânica.

Diante da importância da estrutura granulométrica para o desempenho das misturas asfálticas, especialmente quanto à deformação permanente, uma vez que as especificações brasileiras (DNIT e DAER) não propõem nenhuma metodologia de escolha de composição, servindo apenas como instrumentos de verificação de enquadramento final da curva granulométrica, é importante que o projetista saiba determinar uma composição adequada quanto à resistência à deformação permanente pelo esqueleto mineral. Ainda que os órgãos regulamentadores não preconizem nenhuma metodologia de composição, a literatura mostra alternativas, visando o cuidado com o esqueleto mineral, como o método Bailey (Vavrik, 2000) e mais recente *Dominant Aggregate Size Range model (DASR)* (Kim, 2006). Ambos são métodos de seleção granulométrica que se baseiam essencialmente à prevenção de deformação permanente em misturas asfálticas (FERREIRA *et al.*, 2015).

O Método Bailey é um método de seleção de agregados para uso em pavimentos asfálticos, desenvolvido pelo engenheiro Robert Bailey, do Departamento de Transportes de Illinois (IDOT), utilizado e aprimorado desde a década de 1980. O método conta com dois princípios básicos: arranjo de agregados e a definição de agregados graúdos e miúdos; que se diferenciam das definições utilizadas normalmente. Primeiramente, é selecionado um grau de intertravamento dos agregados, responsável por tornar a mistura capaz de resistir à deformação permanente. Para garantir que a quantidade de ligante asfáltico seja suficiente, modifica-se a quantidade de agregados graúdos e miúdos, alterando os Vazios no Agregado Mineral (VAM). Para iniciar a aplicação do método, combinam-se os agregados em volume e a mistura resultante é analisada (MENDES, 2011).

Já o método DASR, proposto por Kim (2006), da Universidade da Flórida, apresenta a curva granulométrica em função de um ou mais diâmetros de agregados que interajam entre si, formando um esqueleto pétreo mais resistente. A principal proposta do método é avaliar a estrutura formada por agregados graúdos (<1,18mm).

Apesar da influência exercida pelos agregados na deformação permanente, o ligante também interfere na ocorrência deste defeito. A deformação permanente em misturas asfálticas é um fenômeno característico de altas temperaturas e ocorre geralmente no verão. Asfaltos que

possuem características cisalhantes fracas (pela composição ou temperatura) reduzem a coesão da mistura, que tende a se comportar como uma massa de agregados desunida (FHWA, 1994).

Joliet e Malot (2000) discorrem que a deformação permanente é simultaneamente a deformação viscosa do ligante asfáltico e a deformação plástica da estrutura mineral. Ainda, os autores mencionam 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 (NASCIMENTO, 2008).

Specht (2004), em sua tese de doutorado, avaliou a resistência ao acúmulo de deformações permanentes de misturas asfálticas com a adição de borracha moída de pneus através do ensaio de *creep* dinâmico com amostra confinada e do ensaio em simulador de tráfego tipo LCPC. O autor comprovou que ambos os ensaios realizados qualificaram de maneira semelhante as misturas estudadas, as de melhor desempenho foram preparadas com ligante asfalto-borracha, seguidas das misturas com ligante convencional e das misturas tipo borracha-agregado.

Nascimento (2008) estudou o comportamento à deformação permanente de misturas densas, concluindo que misturas com ligantes asfálticos com menor consistência e esqueleto pétreo deficiente obtiveram desempenho inferior ao de misturas com ligantes asfálticos de menor consistência com esqueleto pétreo projetado corretamente. O autor concluiu que, caso o esqueleto pétreo não suporte as cargas, dificilmente o ligante compensará esta deficiência.

Moura (2010) avaliou a deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas, e concluiu, com base nos resultados de ensaios de deformação permanente com a utilização de simulador de tráfego do tipo LCPC, que o teor e as propriedades reológicas de ligante asfáltico exercem influência na resistência à deformação permanente. No trabalho, o autor chegou à essa conclusão por meio de ensaios conduzidos em misturas de mesma granulometria, porém diferentes tipos de ligantes (convencionais e modificados).

Em um estudo semelhante, Corté *et al.* (1994) verificaram a influência dos ligantes asfálticos modificados e convencionais, e ainda, do carregamento na deformação permanente. Os resultados mostraram que as misturas asfálticas confeccionadas com ligante asfáltico modificado por polímero SBS possuíam maior resistência às deformações permanentes quando comparadas com misturas confeccionadas com ligante asfáltico convencional (CAP 50/70).

Almeida Jr (2016), na sua dissertação, buscou analisar a influência do método de dosagem, da granulometria e do ligante no comportamento mecânico de misturas asfálticas. No

trabalho, utilizou-se dois métodos de dosagem (Superpave e Marshall), quatro granulometrias, sendo duas pelo método Bailey (Faixa B e C) e duas por tentativa (Faixa B e C – simples enquadramento nas faixas), e dois tipos de ligantes asfálticos (CAP 50/70 e AMP 60/85). Os resultados mostraram que o maior fator que alterou a resistência à deformação permanente das misturas foi o tipo de ligante asfáltico, com melhor comportamento do ligante modificado. O autor comenta ainda que o método Bailey de seleção granulométrica também melhorou o comportamento das misturas, porém em menor escala de influência.

Para prevenir a deformação permanente, é importante ter uma mistura com alto teor de agregados angulosos, baixa porcentagem de ligante e alta porcentagem de vazios. No entanto, para a fadiga, que ocorre devido à deformação elástica, quanto menor a porcentagem de vazios, melhor seu desempenho. Por este motivo é importante compatibilizar a porcentagem de vazios para cada mistura, tendo em vista os aspectos estabilidade-durabilidade, fadiga *versus* afundamento de trilha de roda (MOTTA, 1991).

Segundo Medina e Motta (2015), a previsão do afundamento de trilha de roda é bastante complexa, especialmente em misturas asfálticas, pois o problema não se resume apenas na caracterização dos materiais, mas também, na avaliação do impacto das condições ambientais no material, além do cálculo das tensões atuantes durante a vida de serviço do pavimento, no qual haverá influência do envelhecimento do ligante.

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

Os principais ensaios utilizados para caracterizar o comportamento das misturas asfálticas quanto à deformação permanente são: ensaios fundamentais (triaxial com carregamento repetido e compressão uniaxial não-confinada - *creep* estático e *creep* dinâmico); e ensaios de simulação (simuladores de laboratório). Ensaios triaxiais dinâmicos têm por objetivo 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), visam simular as condições citadas, onde a velocidade e fluxo de tráfego são simulados, respectivamente, pelo tempo de pulso e frequência da aplicação da carga.

A seguir, será realizada uma revisão sobre os ensaios que caracterizam o desempenho das misturas asfálticas quanto à deformação permanente em laboratório.

2.2.2.1 Ensaio Creep Dinâmico

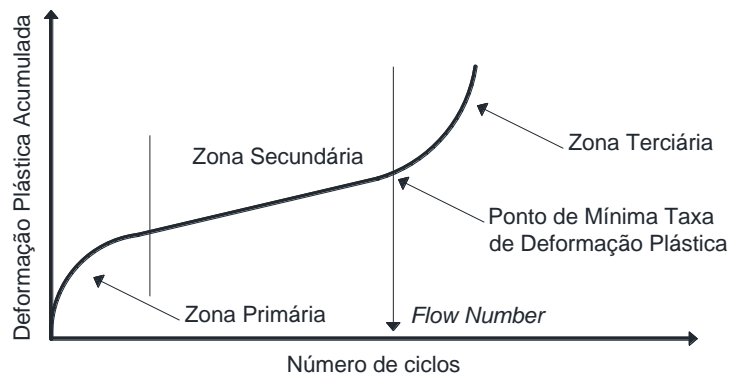
O ensaio de *Creep* Dinâmico é conhecido também por ensaio Uniaxial de Carga Repetida, ou ainda, pelo resultado obtido no ensaio: *Flow Number* (FN), que representa o número de ciclos em que a taxa de deformação plástica é mínima em um corpo de prova que atinja a ruptura (NASCIMENTO, 2008). O *Flow Number* é um parâmetro gerado pelo ensaio de *Creep* Dinâmico sem confinamento que melhor relaciona a deformação permanente de acordo com o *Report 465* (WITCZAK *et al.*, 2002).

Em misturas asfálticas, o ensaio apresenta um bom potencial para correlação do desempenho perante à deformação permanente da mistura asfáltica em campo. O ensaio consiste em um carregamento cíclico (semi-senoidal), temperatura de 60°C, com 0,1 segundo de carga e 0,9 segundos de descanso, onde as deformações acumuladas são obtidas a partir do número de ciclos. A tensão aplicada em cada ciclo é de 204kPa no período de 0,1s e de 10,2kPa durante os 0,9s de repouso. Os corpos de prova utilizados no ensaio devem ter 15cm \pm 0,25cm de altura e 10cm de diâmetro. O ensaio se finaliza em três situações:

- I. Quando 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;
- II. Quando o número de ciclos chegar a 10000;
- III. Quando o corpo de prova atinge 5% de deformação.

O resultado do ensaio é apresentado em deformação plástica acumulada em função do número de ciclos de carga aplicada (Figura 12).

Figura 12 - Gráfico típico do ensaio de *creep* dinâmico



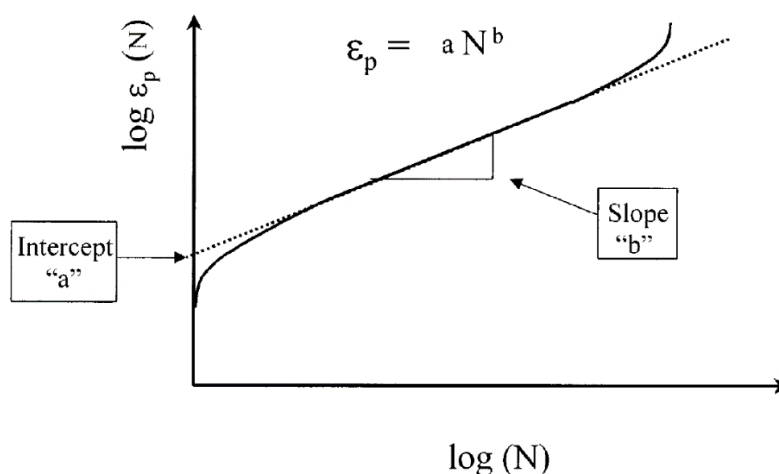
Com a Figura 12, nota-se que há três regiões de deformação durante o ensaio, sendo elas:

- I. Região Primária: Período inicial do ensaio, onde há uma taxa elevada de densificação da amostra (acomodação dos agregados e diminuição do volume de vazios);
- II. Região Secundária: Período em que a taxa de deformação é praticamente constante (caracterizada como a região da resistência à deformação, período de deformações elásticas e início das deformações plásticas);
- III. Região Terciária: Período onde há elevada taxa de deformação plástica, caracterizando a perda de estabilidade da mistura (levando a amostra ao colapso).

O *Flow Number* é identificado na passagem da região secundária para a terciária, 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. Na literatura (Nascimento, 2008), encontra-se recomendações em que para FN @ 60°C (204KPa) > 300 ciclos a mistura é adequada para tráfego médio e para que seja adequada para tráfego pesado necessita-se de FN @ 60°C (204KPa) > 750 ciclos.

Conforme a Figura 13, o intercepto (*a*) e a inclinação da curva da deformação na região secundária (*b*). Sendo que o intercepto *a* representa a deformação plástica na primeira região, e a inclinação *b* demonstra a taxa de variação da deformação plástica em função do número de ciclos.

Figura 13 - Regressão das constantes *a* e *b* quando traçados em escala log-log.



Nota-se, que um alto valor do intercepto a indica menor rigidez da mistura, o que causa maior tendência à densificação, resultando em baixa resistência à deformação permanente. Já para a inclinação b , um alto valor de inclinação demonstra que a amostra/mistura tende a deformar a uma taxa acelerada, evidenciando a baixa resistência à deformação permanente (ONOFRE, 2012).

As misturas asfálticas com alta rigidez devido ao uso de algum modificador ou de ligante de elevada consistência, no ensaio de *creep* dinâmico, dificilmente chegam ao *Flow Number*. Ou seja, dificilmente atingem a Região Terciária do gráfico da deformação plástica acumulada em função do número de ciclos de carga aplicada, antes de chegar aos 10000 ciclos ou atingir 5% de deformação.

Onofre (2012) utilizando ligantes modificados em misturas asfálticas com agregados de origem basáltica, concluiu que as misturas com ligantes asfálticos modificados proporcionaram aumento da resistência à deformação permanente quando comparadas com ligantes convencionais. No trabalho o autor verificou que as únicas misturas que atingiram o *Flow Number* no ensaio de *creep* dinâmico foram as misturas confeccionadas com ligantes convencionais. Em outra pesquisa com ligantes modificados, Bennert e Martin (2012) também não atingiram o *Flow Number* no ensaio de *creep* dinâmico.

Em uma pesquisa semelhante, Barros *et al.* (2015) investigaram o desempenho de misturas asfálticas com ligante convencional (CAP 50-70), ligante modificado por polímero (AMP 60-85-E) e ligante modificado com borracha (CAP AB 8) quanto à deformação permanente com ensaio de *creep* dinâmico. Os autores constataram que as misturas moldadas com ligantes modificados apresentaram desempenho superior às misturas com ligante convencional, com destaque para as amostras moldadas com AMP 60/85-E, que não atingiram o FN aos 10000 ciclos, resultando em um desempenho significativamente superior às demais.

2.2.2.2 Simuladores de Tráfego

A utilização de simuladores de tráfego é aplicada em pequenas seções quando comparadas com as dimensões de um pavimento, porém em escala real quanto aos materiais, com aplicação acelerada de cargas predefinidas, reduzindo assim o tempo necessário para o desenvolvimento de variações na serventia. Esses equipamentos têm a finalidade de realizar, em curto espaço de tempo, a determinação da vida útil dos pavimentos através de ensaios

acelerados. Porém, não conseguem reproduzir os fatores climáticos, como temperatura, umidade e insolação.

Os simuladores de tráfego são divididos em três grupos: de pequeno porte ou de laboratório; médio porte; e de grande porte. Os simuladores de tráfego de pequeno porte, desempenham papel complementar aos das pistas experimentais. São ensaios acelerados para o estudo do fenômeno da deformação permanente, e bastante próximos às condições reais sofridas pelo pavimento em campo. Com os resultados pode-se promover um critério de seleção de materiais para a dosagem das misturas asfálticas.

O Analisador de Pavimento Asfáltico (APA), no inglês *Asphalt Pavement Analyzer*, é um exemplo de simulador de pequeno porte capaz de avaliar a deformação permanente, o trincamento por fadiga e a suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas a quente e a frio. O ensaio surgiu em 1985, no Departamento de Transportes da Geórgia (EUA), com o objetivo de desenvolver um método simplificado de ensaios para a previsão de características de deformação plásticas de misturas asfálticas.

Em sua versão original em 1985, o APA era denominado *Georgia Loaded Wheel Test* (GLWT), baseado no equipamento para ensaio de lama asfáltica desenvolvido por C.R. Benedict da empresa *Benedict Slurry Seals Inc.* No início, o GLWT tinha o propósito de verificar em laboratório o comportamento e a qualidade das misturas asfálticas em campo. Em 1996, foi realizada a modificação da versão GLWT, e resultou no APA (Figura 14), e desde então é utilizado por algumas agências de transportes dos Estados Unidos para avaliar a deformação permanente, fadiga e suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas (KANDHAL & COOLEY, 2003).

Figura 14 - Analisador de Pavimento Asfáltico – APA



Como mostra a Figura 15, o APA é capaz de ensaiar corpos de prova cilíndricos ou em placas, preparados em laboratório ou extraídos de pista. No caso dos corpos de prova cilíndricos, utiliza-se o produzido no compactador giratório. O corpo de prova cilíndrico tem dimensões de 150mm de diâmetro por 75mm de altura, já as placas tem dimensões de 125mm de largura, 300mm de comprimento e 75mm de altura. Ambas as amostras têm volume de vazios entre 4 e 7%.

O ensaio no APA é preconizado pela AASHTO TP 63-03 (*Standard Test Method for determining Rutting Susceptibility of Asphalt Paving Mixtures using the Asphalt Pavement Analyzer*), onde a simulação do tráfego é feita pela passagem das rodas metálicas côncavas sobre mangueiras (Figura 15). As rodas se movem ao longo da mangueira de borracha com tamanho de $\frac{3}{4}$ " (19mm) de diâmetro pressurizada e esticada longitudinalmente sobre a amostra, gerando uma pressão de contato de 100psi (690kPa), e carga vertical de 445N. Para a execução do ensaio, a temperatura pode variar de 35 a 70°C, sendo a mais usual a de 60°C. No ensaio, é recomendado um limite máximo de deformação de 7mm ou 8.000 ciclos de carga, o que ocorrer primeiro, para o fim do ensaio (SKOK *et al.*, 2002).

Figura 15 - Corpos de prova utilizados no APA

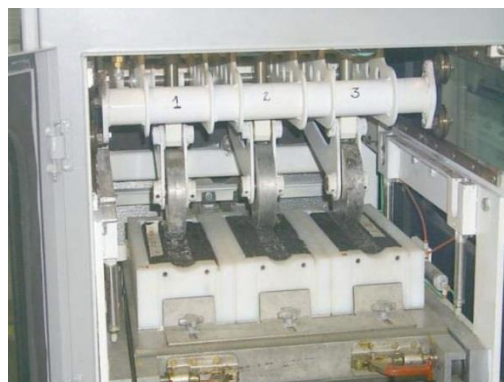


Fonte: www.pavementtechnology.com (2016).

Para determinar a resistência à fadiga, a mangueira de borracha usada no teste de deformação permanente é substituída por uma roda de aço (Figura 16). O equipamento permite

que o ensaio para a previsão da deformação permanente e do trincamento à fadiga sejam efetuados simultaneamente sobre três amostras (em forma de viga, ou seis cilindros, ou a combinação de ambos).

Figura 16 - APA com rodas de aço para ensaios de trincamento por fadiga



Fonte: Fritzen (2005).

Kandhal & Cooley (2003) comentam que as medidas de deformação permanente obtidas com o ensaio de APA apresentam boa correlação com o desempenho das misturas asfálticas, quando são conhecidas as condições ambientais e de tráfego na qual a mistura asfáltica estará submetida. Já quando não se conhece essas condições, não é possível prever o desempenho perante a deformação permanente em trilha de roda.

O simulador de laboratório de pequeno porte conhecido como LPC – Wheel-Tracking Rutting Test, foi desenvolvido pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), da França, no período entre 1968 e 1970. E tem como finalidade, estudar a contribuição do revestimento asfáltico para o afundamento de trilha de roda (ATR) na fase de dosagem.

Como avaliação da medida dos ATR's submetidas ao simulador de tráfego LCPC, é fundamentada na experiência francesa que relaciona as medidas obtidas em laboratório, com os resultados encontrados de pista ao longo dos anos. Uma vez, que o critério especifica a porcentagem máxima do ATR de 10% em relação à espessura da amostra ensaiada para 30000 ciclos, dependendo do tráfego da via (FRITZEN, 2005).

Para a execução do ensaio são necessários sempre dois corpos de prova, cujos moldes são fixados no simulador. O nível de temperatura do ensaio pode ser ajustado conforme desejado, porém em geral se utiliza 60°C. A roda começa a passar sobre a amostra com ciclo de 1Hz. De acordo com a norma francesa de 1991, as leituras do valor do afundamento de trilha de roda devem ser realizadas quando o eixo da roda atingir: 30; 100; 1000; 3000; 10.000; 30.000

e 100.000 ciclos, e o ensaio devem ser interrompidos se o afundamento for maior que 15 mm (FRITZEN, 2005).

2.2.3 Fenômeno de Fadiga

Conforme é definido por Yoder e Witczak (1975), o fenômeno de fadiga em misturas asfálticas se caracteriza por trincas induzidas por carregamento repetido do tráfego devido à repetição dos estados de tensão ou deformação inferiores ao estado último de tensão ou deformação dos materiais.

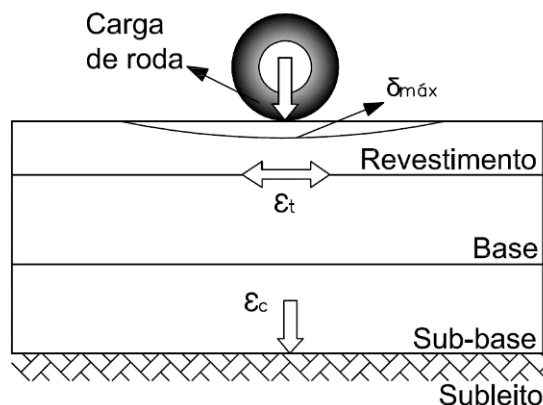
Pinto (1991) descreve que o material sofre um processo de deterioração estrutural quando submetido a um estado repetido de tensões e deformações, resultando na perda da resistência, gerando trincas ou mesmo a fratura completa do material após um número de repetições suficientes do carregamento.

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

O primeiro estudo em laboratório sobre a vida de fadiga em misturas asfálticas no Brasil foi apresentado por Preussler, Pinto e Medina (1981). Os autores apresentaram os primeiros modelos de fadiga de concretos asfálticos, esboçando um exemplo de aplicação dos resultados dos ensaios no projeto de reforço de uma estrutura de pavimento, introduzindo de maneira pioneira no país este estudo sobre o mecanismo de fadiga. Internacionalmente, os primeiros pesquisadores a relacionar as trincas nos pavimentos flexíveis com carregamento cíclico causado pelo tráfego foram Porter, em 1942, Nijboer e Van der Poel, em 1953, Hveem, em 1955 e Moavenzadeh, em 1971 (NUÑEZ, 2013).

O fenômeno de fadiga é caracterizado como a degradação do material sob carregamento repetido, reconhecido como uma das principais causas da deterioração ou degradação dos materiais dos pavimentos. É sempre iniciado 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 17).

Figura 17 - Demonstração das tensões de um pavimento

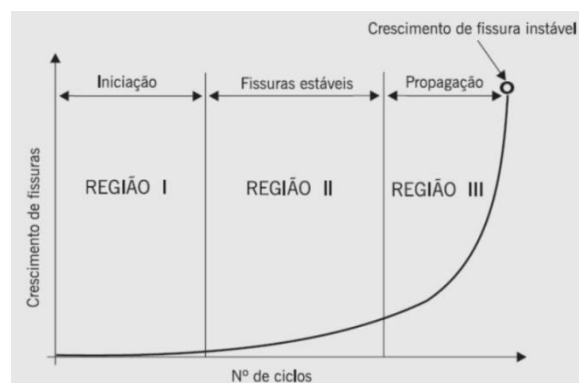


Fonte: Adaptado Franco (2007).

As solicitações sofridas pelo pavimento perante a repetição de cargas são causadas pela passagem dos veículos. Na superfície do pavimento é aplicada uma carga vertical de compressão, e nas fibras inferiores da camada asfáltica surgem tensões de tração e de compressão devido ao carregamento e descarregamento repetido. Normalmente as trincas surgem primeiramente 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. Esse fenômeno deve ser controlado já nas primeiras idades, visto que acarretam graves problemas progressivos na estrutura do pavimento, devido à facilidade de entrada da água.

No processo de repetição de carga (carregamento cíclico) são identificados diversos estágios classificados em região I, região II e região III conforme pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Estágios em um processo de fadiga



Fonte: Fontes (2009)

A Região I representa o início das primeiras mudanças microestruturais (microfissuras), a densidade do deslocamento cresce e as zonas de dano se iniciam. A Região II se caracteriza pelas microfissuras que surgem da união das microfissuras. Já a Região III é o crescimento das microfissuras conduzindo ao colapso total do revestimento e do pavimento.

Pinto (1991) conclui através de estudos laboratoriais sobre fadiga em misturas asfálticas que a evolução do processo de degradação é dividida por fases muito distintas. O autor denominou em “Fase de Condicionamento”, “Fase Estável” e “Fase de Ruptura”.

- I. Fase de Condicionamento: Há um crescimento das deformações permanentes com alguma intensidade. Esta fase corresponde a menos de 5% da vida útil do corpo de prova;
- II. Fase Estável: É caracterizada com o surgimento das primeiras trincas visíveis na parte externa do corpo de prova. Esta fase corresponde a 70% da vida útil do corpo de prova;
- III. Fase de Ruptura: Se caracteriza por um acréscimo acelerado das deformações elásticas e plásticas levando ao colapso do corpo de prova. Esta fase corresponde a 25% da vida útil do corpo de prova.

Preussler (1983) comenta que 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.

Pinto (1991) apresenta em sua tese os principais fatores que afetam este comportamento, de forma resumida na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais fatores que afetam o comportamento à fadiga de misturas asfálticas

Fatores de Carga	(a) Magnitude do carregamento
	(b) Tipo do carregamento; tensão ou deformação controlada
	(c) Frequência, duração e intervalo de tempo entre aplicações sucessivas do carregamento
	(d) Histórico de tensões: carregamento simples ou composto
	(e) Forma do carregamento: triangular, quadrado, etc.
Fatores de Mistura	(a) Tipo do agregado, forma e textura
	(b) Granulometria do agregado
	(c) Penetração do ligante asfáltico
	(d) Teor de ligante
Fatores Ambientais	(e) Temperatura
	(a) Temperatura
	(b) Umidade
Outras Variáveis	(a) Módulo de resiliência ou de rigidez
	(b) Volume de vazios

Fonte: Adaptado de Pinto (1991).

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 controlada, 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 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).

Outro ponto a considerar, é o efeito do envelhecimento do ligante asfáltico ao longo do tempo, que pode ser causado na usinagem, aplicação ou em serviço. Para o caso da usinagem e aplicação, são as temperaturas elevadas empregadas as causadoras do envelhecimento, já em serviço, os determinantes são a ação do clima, variações de temperatura, umidade e a radiação solar ultravioleta. O envelhecimento causa o enrijecimento do ligante e reduz a capacidade de *healing* e de relaxação de tensões, tornando mais suscetível ao dano. Com o superaquecimento do ligante durante a usinagem, as misturas asfálticas alcançam temperaturas de até 180°C, principalmente no Brasil, o que representa pelo menos 20°C acima do necessário para envolver o agregado, acarretando no enrijecimento precoce e, conseqüentemente, menor resistência à fadiga (PINTO, 1991; TONIAL, 2001; KIM, 2009).

Os principais fatores que afetam o envelhecimento são a temperatura e a exposição ao ar, ocasionando a oxidação do ligante e, conseqüentemente, aumento de consistência, reduzindo

o desempenho do material. Tonial *et al.* (2001) observam que o envelhecimento é mais rápido quando a mistura asfáltica está exposta à altas temperaturas, mas nas condições de campo, que apresentam temperaturas baixas e grande exposição ao ar, o envelhecimento é baixo.

As variações diárias e sazonais de temperatura 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 (MEDINA E MOTTA, 2015). Os fatores climáticos refletem diretamente no desempenho à fadiga das misturas asfálticas. Com o aumento da temperatura na mistura, há uma redução na rigidez, que por sua vez, aumenta as deformações geradas no interior da mistura, causando o dano à fadiga prematuramente. De mesma forma, com a exposição solar acontece o envelhecimento da mistura, causando aumento na rigidez, elevando a possibilidade do surgimento das trincas.

De modo a caracterizar o dano por fadiga de uma mistura asfáltica, é necessário avaliar esse comportamento sob o estado de tensão semelhante ao encontrado em campo. No entanto, esta é uma tarefa complexa, uma vez que a obtenção da resposta nos ensaios de fadiga em laboratório apresenta dificuldades, pois as amplitudes das deformações e das tensões obtidas pela passagem do eixo variam em função do tipo de tráfego e das condições climáticas (MOMM, 1998).

A caracterização do dano por fadiga e o processo de trincamento são abordados por duas teorias: a mecânica da fratura e mecânica do dano contínuo. A mecânica da fratura relaciona o fenômeno de formação das microtrincas para representar o comportamento do material. Já a mecânica do dano contínuo representa os fenômenos da microescala globalmente, utilizando propriedades fundamentais das misturas asfálticas para caracterizar o comportamento (UNDERWOOD, 2011).

O trincamento é a forma mais comum de ocorrência do dano por fadiga, sendo as principais ocorrências do tipo topo-base e base-topo. O trincamento topo-base se inicia na superfície dos pavimentos e se propaga para a camada subjacente, geralmente provocado pelas altas deformações cisalhantes. Já o trincamento base-topo se inicia na parte inferior da camada asfáltica e se propaga até a superfície, devido às elevadas deformações de tração associadas à flexão do pavimento (HINTZ, 2012; MARTINS, 2014).

O carregamento aplicado nos corpos de prova em laboratório, pode ser feito com tensão controlada ou deformação controlada. No caso da tensão controlada, a amplitude da carga é constante e a deformação do corpo de prova aumenta à medida que a rigidez diminui. Já para o caso de deformação controlada, a tensão no corpo de prova diminui à medida que a rigidez da mistura diminui, mantendo assim, a deformação constante (FONTES, 2009).

Tangella *et al.* (1990) comenta que em laboratório, o carregamento pode ser aplicado em deformação controlada, ou seja, quando a deformação ou a amplitude de deformação se mantêm constantes durante todo o ensaio e as tensões necessárias para manter os níveis de deformação vão diminuindo; ou pela tensão controlada, de modo que a tensão ou a amplitude de tensões permanecem constante ao longo do ensaio, levando ao aumento das deformações ao longo dos ciclos.

Conforme é comentado por Di Benedetto e Corté (2005), ensaios com tensão controlada, que conseqüentemente serão com tensões constantes, não centradas no valor nulo, tendem a induzir deformações permanentes nas amostras, sendo assim não podem ser considerados ensaios satisfatórios para caracterizar o comportamento perante a fadiga nas amostras. Uma vez, que este vem a ser o caso do ensaio de fadiga por compressão diametral, mais utilizado no Brasil.

Gontijo (1980) afirma que enquanto num ensaio à tensão controlada, esta fissura enfraquece o material e as cargas repetidas subseqüentes provocam uma ruptura extremamente rápida, num ensaio à deformação controlada, a presença de uma fissura não implica necessariamente um aumento de tensão nas partes do corpo de prova que permanecem 'intactas'. Neste último tipo de ensaio, a fissura se propaga mais lentamente.

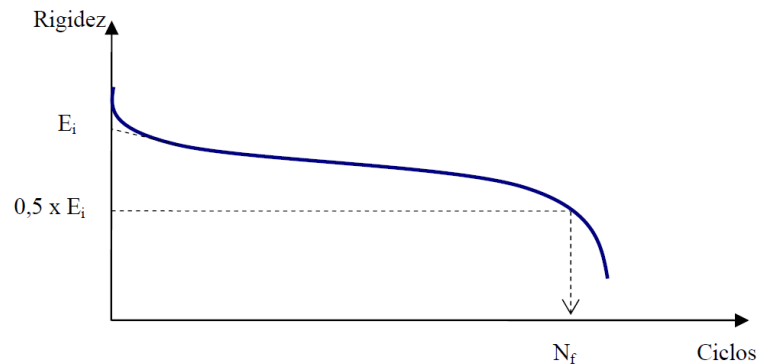
E apesar dos níveis iniciais de tensão e deformação serem praticamente os mesmos em ambos os ensaios, após um número qualquer de aplicações de carga, os níveis para o ensaio sob tensão controlada serão superiores. Isso implica que este ensaio representa uma condição mais severa para a fadiga.

Dependendo do modo de carregamento, o comportamento da amostra durante a ruptura pode variar. Na tensão controlada, a ruptura é bem definida, uma vez que apresenta as trincas bem definidas no corpo de prova, até que o mesmo entre em ruína. Ao contrário, nos ensaios de deformação controlada, o colapso não é visível, e acontece quando o corpo de prova atinge 50% de redução da rigidez, como demonstrado na Figura 19.

Conforme é comentado por Monismith e Deacon (1969) os ensaios de deformação controlada é aplicado melhor para pavimentos com camadas asfálticas fracas em relação ao seu suporte, pois desta forma o revestimento adiciona uma pequena rigidez a estrutura como um todo, e quando a carga é aplicada, a sua deformação é controlada pela deformação das camadas subjacentes. Caso contrario para os ensaios de tensão controlada, que se aplicam a pavimentos com camadas asfálticas rígidas, pois ao resistirem as cargas aplicadas, controlam magnitude das deformações que possam ocorrer. Sendo assim, o comportamento à tensão controlada ou

deformação controlada dependerá tanto da espessura e do módulo de rigidez, como do módulo de rigidez da estrutura subjacente.

Figura 19 - Definição de ruptura em ensaios com deformação controlada



Fonte: Adaptado de Di Benedetto *et al.* (1997).

Pais (1999) realiza uma ressalva nos ensaios para o estudo do comportamento a fadiga, de que não se deve haver acumulação de deformação permanente. Esse fenômeno ocorre simultaneamente com o dano por fadiga, e não deve existir durante os ensaios de resistência à fadiga por dificultar a análise dos resultados.

Os ensaios laboratoriais para determinação do desempenho à fadiga que podem ser feitos 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 Direta.

As avaliações podem ser feitas em escala real, em trechos experimentais de pavimentos submetidos ao tráfego controlado, ou pistas laboratoriais, lineares ou circulares. Os ensaios de tensão e deformação controladas representam situações particulares de carregamento nas rodovias. Geralmente, o que ocorre na prática é um carregamento intermediário entre estas solicitações. Assim, pode-se definir outro modo de solicitação denominado intermediário. A seguir, é apresentado um resumo de três tipos ensaios diferentes para determinação da vida de fadiga de misturas asfálticas em relação à configuração, tipos e modo de carregamento.

2.2.3.1 Fenômenos não correlatos ao fenômeno de fadiga

Como foram visualizados no item anterior, muitos são as variáveis que influenciam o desempenho das misturas asfálticas, uma vez que, para as duas teorias: a mecânica da fratura e mecânica do dano contínuo, todas as variáveis apresentadas são consideradas, ou procura-se considerar no estudo do desempenho das misturas asfálticas frente ao fenômeno de fadiga.

Porem existe alguns fenômenos que acabam incluídos a caracterização de fadiga, mas que não são relatados como fadiga durante os ensaios cíclicos, tais como: a não linearidade, o aquecimento e a tixotropia, em seguida é realizado um breve comentário sobre cada um destes fenômenos, pois entende-se que tais fenômenos apesar de serem considerados “embutidos” nos ensaios de fadiga, a sua compreensão é de extrema importância, pois de certa forma a queda dos valores de módulo dinâmico e do ângulo de fase durante um ensaio de fadiga pode ser explicado por estes fenômenos (Di Benedetto (2011)).

- I. Não linearidade: A não linearidade depende exclusivamente dos níveis de tensão e de deformação no qual o material está submetido, os ligantes asfálticos em baixos níveis de tensão tem um comportamento linear e, para altos níveis de tensão o comportamento é não linear. Mas em contrapartida os materiais asfálticos podem apresentar o comportamento linear quanto o não linear.

O maior desafio na caracterização por fadiga em misturas asfálticas vem a ser a separação da resposta viscoelástica da resposta ocasionada pelo desenvolvimento do dano. A complexidade reside no fato que a não linearidade e o dano têm efeitos semelhantes na resposta mecânica dos materiais, isto é, diminuição do módulo dinâmico e aumento do ângulo de fase (Castelo Branco, 2008), uma vez que os ensaios de fadiga são executados com a deformação acima dos domínios de viscoelasticidade linear.

Di Benedetto et al. (2011) demonstrou que a não linearidade é responsável por cerca de 7% na queda dos valores de módulo dinâmico e de 3% no aumento do ângulo de fase.

- II. Aquecimento: O aquecimento em amostras de concreto asfáltico durante ensaios cíclicos é herdado da característica do ligante asfáltico, por ser um material termo sensível tem-se a dependência da temperatura. Di Benedetto et al (2011) comenta que a variação da temperatura durante um ensaio cíclico é amplamente afetado pela geometria da amostra e pelas propriedades de dissipação na amostra. O que acontece é que durante um ensaio cíclico, a amostra de concreto asfáltico tende a

dissipar a energia mecânica em forma de calor, ocorrendo um aumento na temperatura da amostra pela consequência do auto-aquecimento, e que ocasionara uma variação na rigidez.

- III. Tixotropia: Trata-se da propriedade de um fluido não-newtoniano ou pseudoplástico que apresenta uma alteração dependente do tempo em sua viscosidade. Quanto mais se submete tal fluido a esforços de cisalhamento, mais diminui sua viscosidade. Em suma, um fluido tixotrópico é aquele que demora um tempo finito para alcançar uma viscosidade de equilíbrio quando ocorre uma mudança instantânea no ritmo do cisalhamento. Mas por ser um fenômeno muito complexo, não há total concordância da comunidade científica sobre qual deve ser sua definição exata (Barnes, 1997; Mewis, 2009).

As implicações deste fenômeno podem levar a alguma interpretação ambíguas dos resultados, pois o auto-aquecimento, se acontecer, tem de estar relacionado com a energia que o material dissipa durante o teste cíclico, que é uma consequência da resposta viscoelástica do material (um material elástico puro não dissiparia energia e, portanto, não poderia aumentar sua temperatura por si só). Di Benedetto et al. (2011) mostram que o aumento da temperatura no início do teste é proporcional à energia dissipada. Portanto, dependendo da definição adotada, a tixotropia e o autoaquecimento podem ser fenômenos independentes ou a segunda pode ser a causa do primeiro.

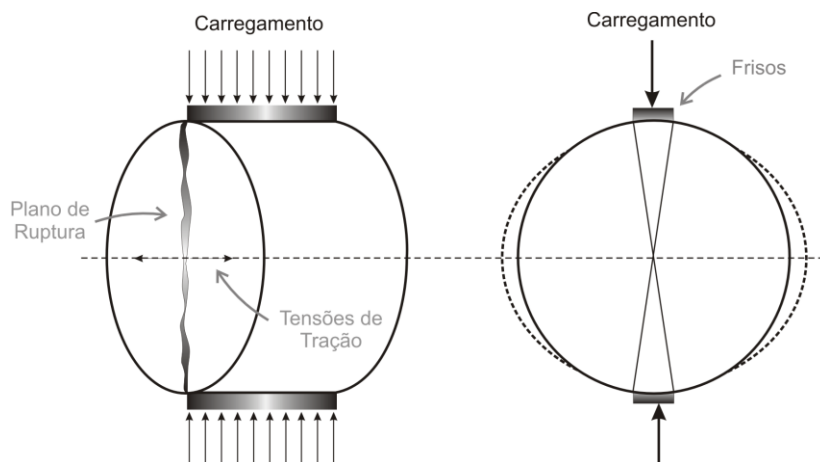
A medição da tixotropia durante o teste cíclico apresenta várias complicações técnicas. Entretanto, ao testar materiais cuja rigidez é altamente dependente da temperatura, o aquecimento e o resfriamento podem dar a mesma resposta que a esperada de um fluido tixotrópico. Nesse caso, a única maneira de distinguir um do outro é medir a temperatura dentro do material continuamente durante o teste.

2.2.3.2 Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral (Tração Indireta)

O ensaio de compressão diametral foi criado pelo brasileiro Fernando Lobo Carneiro, em 1943, para determinação da resistência à tração de concretos de cimento Portland, e é conhecido mundialmente. Posteriormente, foi adaptado para o uso de cargas repetidas e na aplicação em misturas asfálticas. Para o ensaio de fadiga por compressão diametral são utilizados corpos de prova cilíndricos carregados por compressão, atuando paralelamente ao

plano diametral vertical, resultando, em uma tensão de tração no corpo de prova, conforme é demonstrado na Figura 20.

Figura 20 - Esquema de carregamento



Fonte: Brito (2006).

O carregamento se dá pela frequência de 60 aplicações por minuto, com um pulso de carga de 0,1s para 0,9s de repouso, idêntico ao carregamento do MR, o corpo de prova é submetido a um estado biaxial de tensões (CERATTI, 1991; PINTO, 1991).

Embora o ensaio não seja normatizado no Brasil, é o mais utilizado para estimar a vida de fadiga. Pela facilidade de obtenção das amostras, geralmente 6,3cm de altura por 10,20cm diâmetro, e pela facilidade de utilização dos equipamentos, o ensaio pode ser executado com o mesmo equipamento utilizado para o ensaio de módulo de resiliência.

Tangella *et al.* (1990) e Read e Collop (1997) comentam que as principais vantagens no ensaio são a simplicidade de execução, a possibilidade de correlação dos resultados com desempenho em campo, e o equipamento pode ser utilizado para outros ensaios como MR e RT. O trincamento inicia em uma zona com estado uniforme de tensões, em estado biaxial de tensões, o ensaio pode ser realizado com amostras preparadas em laboratório ou extraídas em campo, é barato, comercialmente viável e experimentalmente sensível.

Por outro lado, deve-se ter cautela para conclusões diretas somente a partir das curvas de fadiga, pois o estado de tensões gerado em cada amostra depende da estrutura e do valor do MR das camadas constituintes, no caso da estrutura em campo. Misturas com maiores MRs tendem a absorver mais tensões e, portanto, os níveis de tensão de tração para comparação na vida de fadiga de amostras diferentes devem ser correspondentes a cada caso (MOTTA, 1991; PINTO, 1991; MEDINA, 1997).

O ensaio de fadiga por compressão diametral é realizado por tensão controlada, ou seja, a tensão é mantida de forma constante ao longo do ensaio e as deformações atingem um valor máximo até o estágio de colapso do corpo de prova. Portanto, a vida de fadiga é definida como o número total de aplicações de uma carga necessária à fratura completa da amostra. Tayebali *et al.* (1994) enfatizam que o ensaio não pode ser realizado à deformação controlada (envolve a aplicação de cargas repetidas que produzam uma deformação constante ao longo do ensaio, o que conduz à uma diminuição da carga aplicada para manter a deformação constante), pois a distribuição de deformações no centro do corpo de prova é razoavelmente não linear.

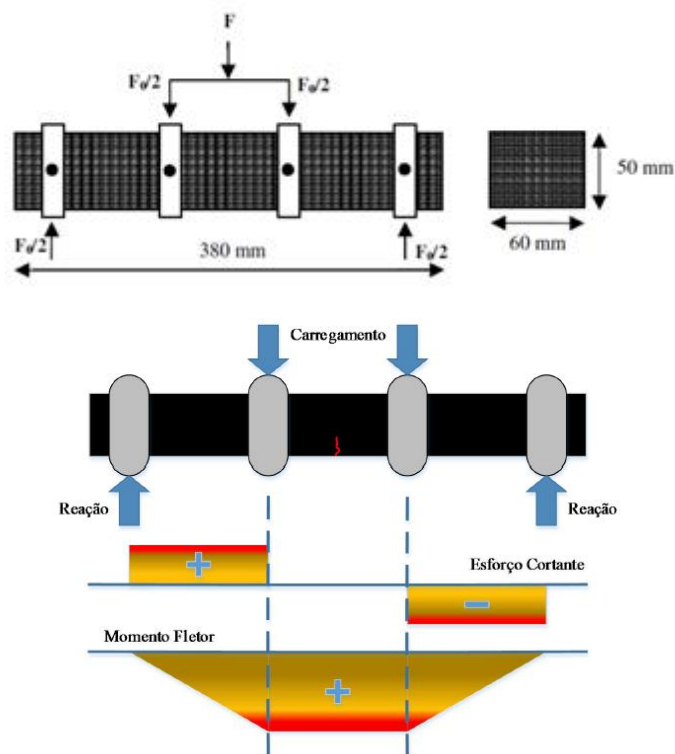
Colpo (2014) comenta que o ensaio apresenta algumas desvantagens como o surgimento de deformação permanente juntamente aos frisos de carregamento, e que isso se torna indesejável para a avaliação do potencial de fissuração de uma mistura asfáltica, o que faz com que a vida de fadiga seja subestimada. Acrescenta-se ainda, a dificuldade na execução do ensaio, pois despende de muito tempo de operação, o que se torna uma grande desvantagem.

2.2.3.3 Ensaio de Fadiga à Flexão em Viga Quatro Pontos

As normas AASHTO T 321-07 e ASTM D 7460-10 descrevem o ensaio de fadiga de quatro pontos em vigas de misturas asfálticas, no Brasil, ainda não se dispõe de uma norma para esse ensaio. As normas definem o parâmetro de rigidez à flexão da viga como sendo a relação entre a tensão máxima de tração e a deformação máxima da viga. A frequência estabelecida em normas para o ensaio é de 5Hz a 10Hz e temperatura de 20°C. As vigotas utilizadas como corpos de prova para ensaio de fadiga devem possuir comprimento de 380 ± 6 mm, largura de 63 ± 6 mm e altura de 50 ± 6 mm. A temperatura do ensaio segundo norma é de $20 \pm 0,5$ °C, portanto, deve-se ter o cuidado de condicionar os corpos de prova por no mínimo 2 horas para que não haja influência da temperatura.

Para a realização do ensaio, necessita-se de um aparato servo-pneumático capaz de aplicar cargas senoidais (tração/compressão) com frequência variável de 0,01Hz a 30Hz. O equipamento aplica um carregamento composto por duas cargas verticais afastadas entre si por um terço do vão da viga, promovendo flexão no corpo de prova no sentido descendente ou ascendente, demonstrado na Figura 21. Assim, a força máxima aplicada e o deslocamento máximo no meio da viga são medidos. Desta forma, as maiores deformações de tração também ocorrem no meio da viga, onde é mais suscetível à nucleação e propagação de microfissuras (MELO, 2014). Com o equipamento, também é possível a realização do módulo dinâmico e do ângulo de fase das misturas asfálticas.

Figura 21 - Representação do esquema de carregamento e formato das vigas



Fonte: Adaptado de Fontes (2009) e Melo (2014).

Assim como no ensaio de fadiga por compressão diametral, o ensaio de fadiga por flexão em viga quatro pontos pode ser realizado tanto com tensão ou deformação controlada, sendo usualmente utilizado o carregamento à tensão controlada.

Tangella *et al.* (1990) citam as principais vantagens para o ensaio de flexão em viga quatro pontos:

- I. Ensaio conhecido em diversos países e de fácil compreensão;
- II. Estabelece um adequado fator de correlação entre os resultados de laboratório com o comportamento em campo;
- III. Os resultados podem ser usados diretamente no dimensionamento estrutural. Os resultados obtidos por tensão controlada podem ser usados no dimensionamento de pavimentos com espessura espessa, já os resultados obtidos por deformação controlada devem ser usados no dimensionamento de pavimentos com espessura delgada;
- IV. A ruptura das amostras ocorre na zona de tensão uniforme e sem tensões de cisalhamento, o que ajuda a reduzir o coeficiente de variação dos resultados,

necessitando assim, de um menor número de amostras quando comparado com o ensaio de flexão em corpos de prova trapezoidais.

Por outro lado, Fontes (2009) apresenta algumas limitações: ao contrário do que se passa na estrutura do pavimento, o estado de tensão é essencialmente uniaxial, assim, para comparar resultados obtidos no laboratório com o desempenho em campo é necessário um fator campo-laboratório, conhecido como *shift factor*.

Momm (1998) comenta, que a vida de fadiga das misturas asfálticas determinadas pelo ensaio de flexão em viga pode ser 40 vezes maior que a obtida pelo ensaio de compressão diametral. Isto ocorre pelo fato de que as deformações permanentes que podem ser obtidas pelo ensaio de compressão diametral não são permitidas no ensaio de flexão em viga. Por outro lado, Colpo (2014) em sua dissertação de mestrado verificou um “fator de transporte” – equivalente a um shift fator entre ambos os ensaios – de 3000 quando analisado a tensão de tração e de 2000 quando analisada a deformação, o que se pode dizer que o fator laboratório campo dos ensaios de vida de fadiga são de fato próximo de 3 a 4 para os resultados.

2.2.3.4 *Dano por Fadiga pelo Ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico para utilização do Protocolo de Análise pelo Modelo S-VECD*

O trincamento por fadiga é um dos defeitos mais comuns encontrados em pavimentos flexíveis no Brasil. Esse fenômeno tem natureza complexa relacionada com o material e com as respostas estruturais dos pavimentos. Sendo assim, para a consideração no dimensionamento mecanístico-empírico dos pavimentos, é necessária a obtenção de modelos de previsão do dano por fadiga no comportamento das misturas asfálticas para serem utilizados como critério de ruptura (MARTINS, 2014).

Para ser utilizado efetivamente no projeto de pavimentos, um modelo de previsão do dano por fadiga deve ter dois componentes principais: (I) Uma relação de crescimento de dano que descreve como ele evolui em função do carregamento e da temperatura; (II) Um critério de ruptura que possa ser utilizado para definir a vida de fadiga do concreto asfáltico (NASCIMENTO, 2015).

Os modelos devem descrever as respostas dos materiais e dos pavimentos aos carregamentos repetitivos, principalmente quanto ao dano por fadiga. Além disso, tais modelos mecanísticos devem ser incorporados em *frameworks* computacionais para análise de pavimentos, os quais devem ser validados e calibrados para aplicação em problemas de engenharia, por meio da comparação extensiva entre o desempenho observado em campo e

previsto nas análises computacionais. A partir dessas comparações, então, desenvolvem-se funções de transferência dano-área trincada e define-se a capacidade preditiva do *framework* em questão (NASCIMENTO, 2015).

Nesse contexto, a mecânica do dano contínuo, conhecida internacionalmente como *Viscoelastic Continuum Damage* (VECD), tem sido utilizado com sucesso na caracterização de misturas asfálticas norte-americanas. Essa abordagem mecanística utiliza propriedades fundamentais dos materiais para caracterizar efetivamente o comportamento do concreto asfáltico submetido a diferentes carregamentos e temperaturas, a partir de um programa experimental eficiente e simplificado. A chave do modelo VECD é a curva característica de dano, que é uma propriedade das misturas asfálticas que independe das condições de ensaio. Tal propriedade, devidamente implementada num sistema de análise de pavimentos, pode ser utilizada para prever o dano por fadiga de camadas asfáltica sujeitas às várias condições de campo que enfrentam ao longo de sua vida de serviço (HOU *et al.*, 2010).

O *Viscoelastic Continuum Damage* (VECD) é baseado em três conceitos principais: (I) Teoria do trabalho potencial de Schapery (1990); (II) Princípio da correspondência elástico-viscoelástico; e, (III) Superposição tempo-temperatura com dano (MARTINS, 2014). Para entender o correto funcionamento do VECD, deve-se entender a evolução do trincamento por fadiga em misturas asfálticas.

Depois de construído o pavimento, existem muitas áreas potenciais que podem dar origem às trincas. Nestas áreas, existem bolsas de ar ou de microespaços vazios induzidos durante o processo de construção, como resultado da natureza granular do concreto asfáltico. Uma vez que a aplicação da carga é regular, e principalmente sob a forma de carregamento vertical aplicado por um meio de contato flexível (um pneu) para a superfície, ciclos regulares de tensões começam a se acumular. Sob a repetição de carga, microfissuras começam a ocorrer dentro do concreto de asfalto. Estas microfissuras podem ser tão pequenas que não são detectáveis por tecnologias de imagens atuais, mas sinais claros desses defeitos podem ser detectados através de medições de emissão acústica e de suas influências sobre as medições de macroescala de tensão e deformação durante os ensaios mecânicos. Ao longo do tempo, estas microfissuras crescem e, eventualmente, formam microfissuras (que são fissuras visíveis a olho nu). É entre esses pontos de microfissuras para microfissuras que a evolução do dano contínuo é mais aplicável, após este ponto acontece a mecânica da fratura (UNDERWOOD *et al.*, 2006).

Para utilização do modelo VECD, dois parâmetros principais devem ser quantificados: a pseudo-rigidez (C), também chamada de integridade do material, e o dano (S), conforme são demonstrados nas Equações 6 e 7. Estes parâmetros são únicos para um dado material, definidos

pela Curva Característica de Dano (C vs S), caracterizado como uma propriedade fundamental do material (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R} \quad (6)$$

$$dS_i = \left(-\frac{1}{2} (\varepsilon^R)_i^2 \Delta C_i \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta \xi)_i^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \quad (7)$$

Onde:

ξ = Tempo reduzido;

α = Taxa de evolução do dano ($1/m+1$), sendo m a inclinação máxima do módulo de relaxação em função do tempo reduzido no espaço log-log;

ε^R = Pseudo-deformação, que pode ser calculada utilizando a integral de convolução (Equação 8).

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^\xi E(\xi - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (8)$$

Sendo:

$E(\xi)$ = Módulo de relaxação viscoelástico linear do material;

E_R = Módulo de referência, normalmente unitário.

Nota-se que o ensaio de dano pode ser tanto cíclico ou monotônico, com controle de tensão ou de deformação, com diferentes amplitudes, em diferentes frequências ou até mesmo em diferentes temperaturas, as curvas obtidas serão as mesmas para uma dada temperatura reduzida como referência (NASCIMENTO, 2015).

Hou *et al.* (2010) comentam que aplicar este modelo rigoroso em ensaios cíclicos (longa duração) não é trivial, ao contrário dos ensaios monotônicos que são mais simples. Sendo assim, Underwood e Kim (2009) produziram uma versão simplificada do modelo de dano contínuo viscoelástico (S-VECD). Como o modelo de VECD veio antes, este modelo S-VECD refere-se à integridade do material, indicado também pela variável de C , com a quantidade de danos, S . Esta relação C vs S é independente de muitos dos fatores que afetam o desempenho de fadiga como temperatura e frequência e, portanto, pode descrever os comportamentos com poucos ensaios.

O modelo desenvolvido e simplificado na *North Carolina State University - NCSU* (Daniel e Kim, 2002; Kim e Chehab, 2004; Underwood *et al.*, 2012) para misturas asfálticas, usando dados de ensaios disponíveis na literatura, utiliza o princípio da equivalência elástica-viscoelástica (proposto por Schapery, 1981). Substituindo a deformação pela pseudo-deformação (tensão viscoelástica linear dividida por um módulo de referência) e transformando o comportamento viscoelástico do material em comportamento linear. Esta é uma manobra matemática para separar os efeitos viscoelásticos daqueles gerados pelo dano (FREIRE *et al.*, 2015).

O ensaio é obtido a partir da carga de tensão-compressão harmônica e é possível ligar o modelo a critérios de falha. Para a caracterização S-VECD, são realizados ensaios cíclicos senoidais com amplitude constante. Depois da evolução suficiente de danos, a amostra rompe devido à fadiga. A queda do ângulo de fase pode ser utilizada para determinar o momento da falha (BABADOPULOS, 2014).

O S-VECD foi concebido para utilização em laboratórios como um procedimento de caracterização danos com economia de tempo e, como os ensaios cíclicos são utilizados para calibrar o modelo, podem ser obtidos os critérios de fadiga. Esse tipo de modelo permite prever o comportamento da mistura asfáltica sob uma varredura de carga induzindo ao comportamento não linear do material (KIM, 2009).

Babadopulos *et al.* (2015) comentam que uma das considerações realizadas no S-VECD é que apenas a tensão induz ao dano. Assim, apesar de tudo, a amplitude de tensão é usada para calcular a integridade do material, e não pode ser usada para calcular o valor da acumulação de danos. De fato, apenas a tensão de amplitude de pseudo-deformação poderia ser utilizada, por conseguinte, precisa de ser calculada.

De acordo com Nascimento *et al.* (2014), uma das principais vantagens desse modelo é a obtenção da propriedade de dano das misturas, independentemente das condições de ensaio (temperatura, amplitude, forma de controle - tensão ou deformação). Assim, ensaios feitos em uma condição específica permitem a obtenção do comportamento do material em diversas outras condições, reduzindo trabalho. Ainda os autores comentam que esse modelo 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.

Para a caracterização das misturas asfálticas em laboratório, segundo o modelo S-VECD, requer-se a realização de dois ensaios mecânicos: (I) módulo complexo para determinação das propriedades viscoelásticas lineares e (II) ensaio de tração direta uniaxial

cíclico para capturar as características de dano por fadiga. Para ambos, a porcentagem de vazios nas amostras é de 5,5%, e as amostras com diâmetro de 100mm por 150mm de altura (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

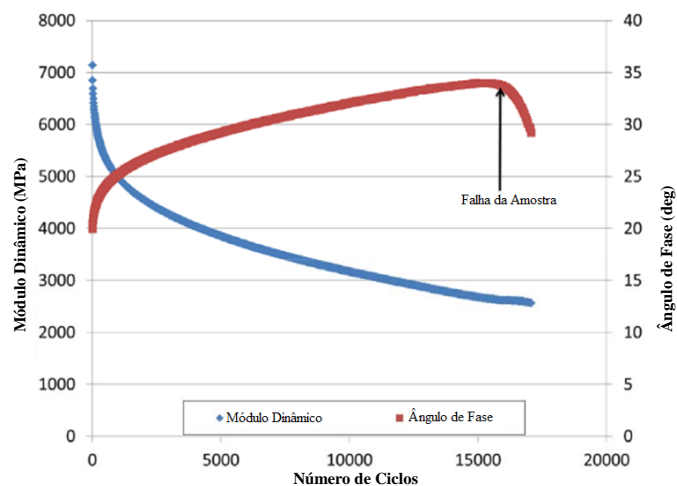
O ensaio de fadiga por tração direta uniaxial consiste em aplicar nos corpos de prova uma deformação cíclica senoidal, de amplitude constante, até que amostra entre em colapso. Durante o ensaio, é coletado além da deformação, a carga, o ângulo de fase e o módulo dinâmico, uma vez que, para cada corpo de prova é gerada uma Curva Característica de Dano.

A execução do ensaio consiste em duas fases. Primeiramente, é aplicada uma pequena tensão (50 a 75 $\mu\epsilon$ *on-specimen*) e o ensaio é realizado para determinar o *fingerprint* módulo complexo. Isto é feito para determinar a razão entre o módulo dinâmico ($|E^*|_{\text{fingerprint}}$) para o módulo complexo determinado ($|E^*|_{LVE}$). Este valor é conhecido como a proporção módulo de elasticidade dinâmico (DMR) (Equação 9) (HOU *et al.*, 2010). Esta relação é utilizada para controlar a qualidade do ensaio de fadiga e é incorporada no modelo de fadiga S-VECD (HOU *et al.*, 2010).

$$DMR = \frac{|E^*|_{\text{fingerprint}}}{|E^*|_{LVE}} \quad (9)$$

Em seguida, a amostra é submetida a um ensaio de fadiga em que o atuador é programado para chegar a um deslocamento de pico constante com cada ciclo de carga. Durante o ensaio, o ângulo de fase e módulo complexo das amostras são registrados. O colapso da amostra é definido como o ponto em que os picos de ângulo de fase são defasados, como é demonstrado pela Figura 22 (HOU *et al.*, 2010).

Figura 22 - Determinação de ciclos até a falha do ensaio de fadiga S-VECD



Fonte: Adaptado de Babadopolos (2014).

Os ensaios são conduzidos a uma frequência de 10Hz e temperatura de 19°C em condições diferentes, ou seja, variando a amplitude de deformação. A norma AASHTO TP 107-14 comenta que se deve utilizar quatro amostras para o ensaio em cada um dos três níveis diferentes de deformação. No entanto, pesquisas anteriores (Hou *et al.*, 2010) mostraram que, para as previsões, são suficientes apenas duas amostras, tanto para o módulo complexo como o ensaio de fadiga.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo será tratado do planejamento da pesquisa, características dos agregados e dos ligantes asfálticos, bem como das misturas asfálticas projetadas. Tratará ainda dos procedimentos laboratoriais que foram empregados na pesquisa.

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Para alcançar os objetivos dessa pesquisa, dividiu-se da seguinte forma:

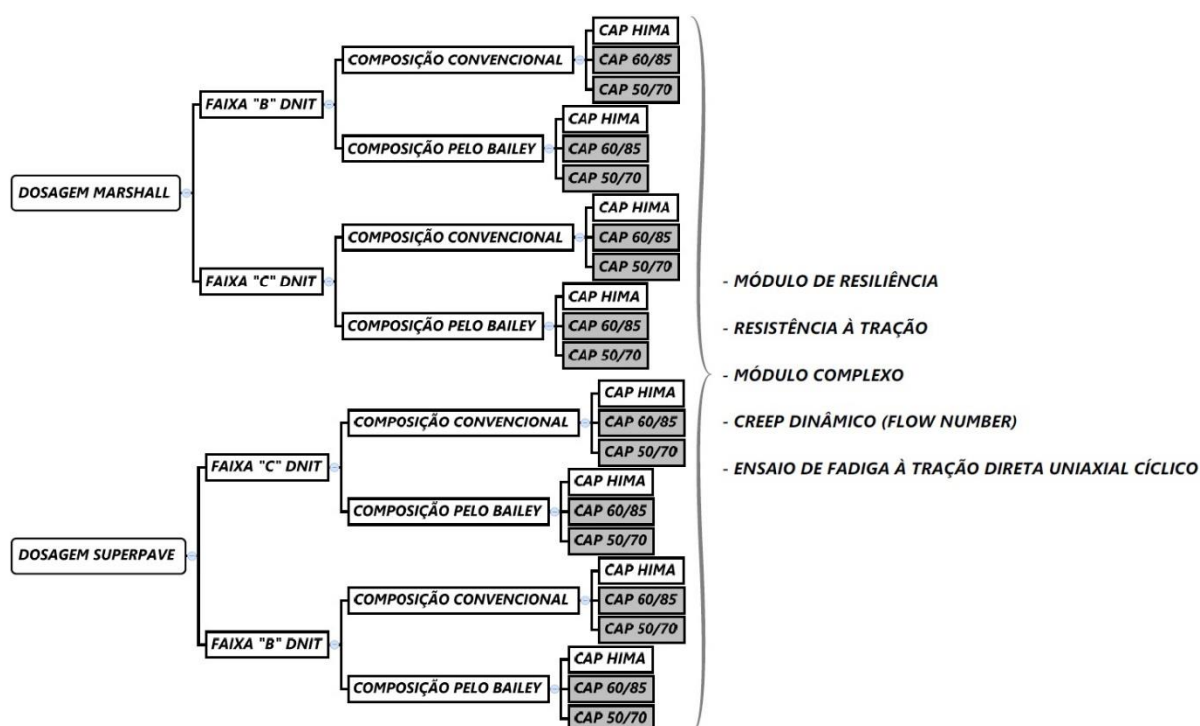
- I. Escolha e coleta dos agregados pétreos e dos ligantes asfálticos (convencional, modificado e altamente modificado) para a formulação das misturas;
- II. Caracterização em laboratório dos agregados pétreos e dos ligantes asfálticos, para a realização das dosagens;
- III. Definição dos traços das faixas B e C do DNIT para os Concretos Asfálticos pela Metodologia Bailey e pela metodologia de tentativa (simples enquadramento das faixas granulométricas);
- IV. Realização das dosagens Marshall e Superpave para obtenção do teor de ligante de projeto para cada traço de concreto asfáltico e para cada tipo de ligante asfáltico;
- V. Realização de ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT) e compressão diametral sob cargas repetidas para determinação de módulo de resiliência (MR) em distintas temperaturas e frequências; Realização do ensaio de Módulo Complexo para verificação da influência das variáveis estudadas no comportamento viscoelástico; Verificação do comportamento perante a deformação permanente utilizando o ensaio de *Creep* Dinâmico (*Flow Number*);
- VI. Projeto e execução das peças para a realização do ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial, e a verificação da influência das variáveis estudadas no comportamento à fadiga pelo novo método de ensaio.

Para a verificação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com diferentes ligantes asfálticos, composições e faixas granulométricas, utilizaram-se quatro granulometrias diferentes e três tipos de ligantes asfálticos. Além disso, os corpos de prova foram confeccionados através de dois diferentes métodos de dosagem.

A Figura 23 demonstra o fluxograma do programa experimental completo, que deu origem à dissertação de Almeida Júnior (2016). Naquele trabalho, foi analisada a influência do

esqueleto pétreo, do tipo de ligante asfáltico e do método de dosagem no comportamento mecânico, rigidez e deformação permanente, das misturas asfálticas. Utilizaram-se quatro granulometrias diferentes, porém com dois tipos de ligantes asfálticos, CAP 50/70 E COMPAFLEX AMP 60/85-E, através dos dois métodos de dosagem, totalizando dezesseis misturas asfálticas.

Figura 23 - Fluxograma da pesquisa¹



Em continuidade ao trabalho iniciado por Almeida Júnior (2016) foram adicionadas oito misturas, utilizando-se das mesmas quatro granulometrias, com os dois métodos de dosagem, e acrescentando o ligante asfáltico COMPAFLEX HIMA, nos mesmos ensaios para verificação do comportamento mecânico (Rigidez e Deformação Permanente). O presente trabalho se deu adicionando uma ferramenta para verificação do desempenho ao dano por fadiga das misturas, implementada no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSM, o ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico.

Tanto as dosagens (Marshall e Superpave), como os ensaios laboratoriais para estudo do comportamento mecânico das misturas asfálticas foram realizados no Laboratório de

¹ Fluxograma do programa experimental completo, ligantes asfáltico em cinza utilizados na dissertação de Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior (2016) e o ligante asfáltico em branco com o ensaio de Fadiga Tração Uniaxial Cíclico foram realizados nesta tese.

Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) dentro do GEPPASV (Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária). Primeiramente, foram obtidos os parâmetros das dosagens Marshall e SUPERPAVE com os agregados compostos pelas granulometrias, duas da faixa B e duas da faixa C da especificação DNIT 031/2006-ES. Sendo duas de referência, faixa B e faixa C, o qual foi composto por tentativa e erro de forma que atenda a especificação, e duas pelo método Bailey, também na faixa B e faixa C, para os três ligantes asfálticos.

Após a determinação dos parâmetros de dosagem, foram moldados corpos de prova para a realização dos ensaios, objetivando a verificação do comportamento mecânico (Tabela 3).

Tabela 3 - Número de amostras para execução da pesquisa

Ensaio	ALMEIDA JR (2016)		BOEIRA (2018)		Total de amostras
	1 Mistura	16 Misturas (CAP 50/70 e AMP 60/85)	1 Mistura	Adição de mais 8 Misturas (Compaflex HIMA)	
Dosagem Marshall	15	240	15	120	360
Dosagem Superpave	15	240	15	120	360
MR/RT	3	48	3	24	72
Módulo Complexo	3	48	3	24	72
Creep Dinâmico	3	48	3	24	72
Fadiga Tração Direta			4	96	96
Total de amostra	39	624	43	696	1032

Para a realização do estudo foram moldados no total das 24 misturas asfálticas 1032 corpos de prova, uma vez que Almeida Jr (2016) ensaiou 16 misturas (com CAP 50/70 e AMP 60/85) totalizando 624 corpos de prova. E com a adição do ligante asfáltico altamente modificado HIMA e mais o ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico, fechando então as 24 misturas estudadas.

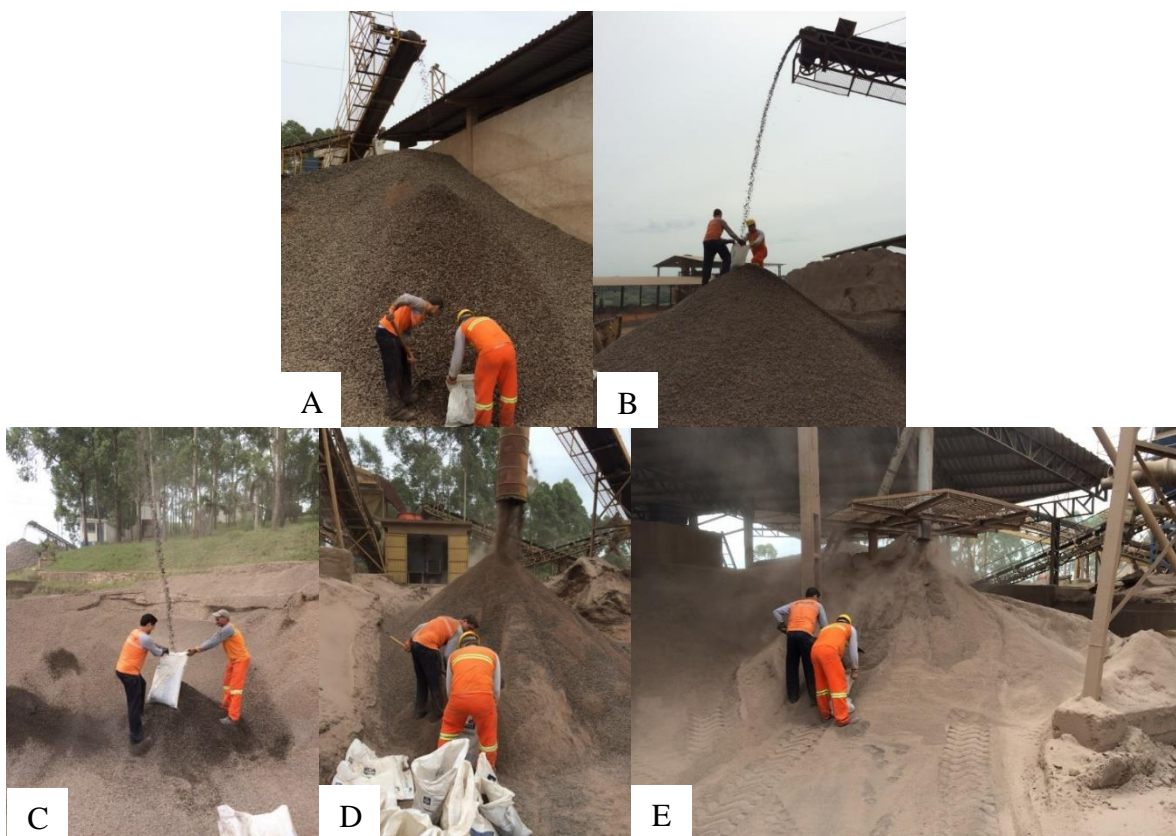
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados na pesquisa, tais como os agregados minerais, os ligantes asfálticos e as misturas asfálticas produzidas, foram avaliados de acordo com as técnicas laboratoriais seguidas de suas respectivas normas. Todos os ensaios são realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da Universidade Federal de Santa Maria.

3.2.1 Agregados Minerais

Os materiais granulares foram coletados diretamente da unidade de produção, de forma a ter sua representatividade adequada (Figura 24). Foram realizados os ensaios de caracterização de cada fração como granulometria, forma, sanidade, abrasão Los Angeles, massa específica, entre outros.

Figura 24 - Coleta do material direto da unidade de produção

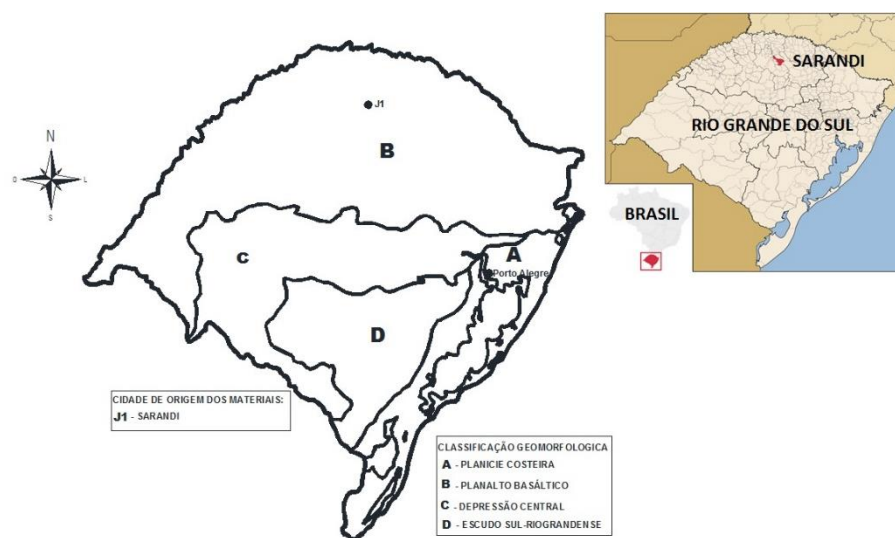


Coletou-se cinco frações do mesmo agregado na unidade de produção. Foram coletados agregados produzidos na fração 1" (Figura 24 - A), fração 3/4" (B), fração 3/8" (C) e duas

frações de pó de pedra (pó grosso (D) e pó fino (E)). O pó grosso é uma mistura do pó fino com a fração 3/8”.

Os agregados são provenientes do município de Sarandi-RS, às margens da rodovia estadual RS-500, com coordenadas geográficas: 27.810948 S / 53.035614 O. A localização da unidade de produção, bem como a formação geológica do agregado estão demonstrados na Figura 25. O agregado pertence à formação geológica do Planalto Basáltico, sendo uma rocha de origem Vulcânica (Diabásio).

Figura 25 - Localização da unidade de produção do agregado e sua formação geológica



A escolha pelo material se deu pelo fato que, no início do estudo a empresa proprietária da jazida havia um contrato de restauração da BR-158 de Boa Vista das Missões/RS até Santa Maria/RS, no qual haveria toda a restauração da camada asfáltica e, ainda, a adição de uma camada de CPA (Camada Porosa de Atrito). Por outro lado, no decorrer do estudo os trabalhos de restauração não conseguiram dar sequência por conta de fatores administrativos. Pretendia-se ter ainda aplicações das misturas asfálticas em campo.

As frações dos agregados coletados foram submetidas a ensaios laboratoriais para comprovar sua qualidade. Os resultados dos ensaios realizados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades das frações do agregado utilizado

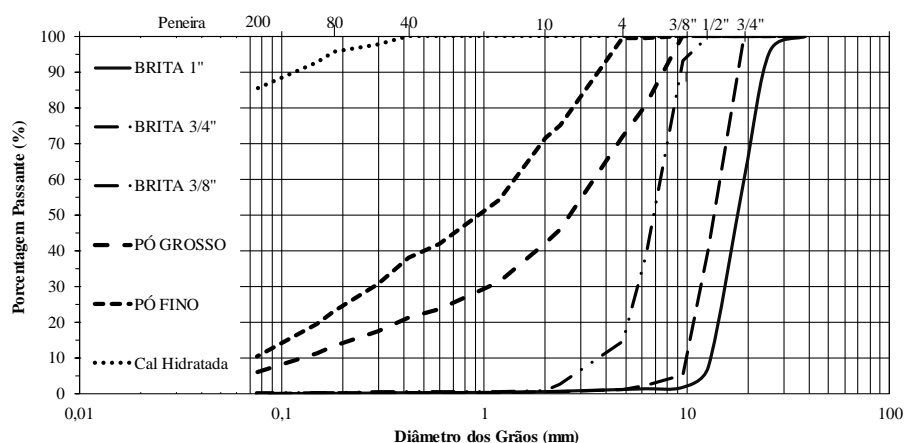
PROPRIEDADES	NORMA	SARANDI				
		BRITA 1"	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ GROSSO	PÓ FINO
Absorção (%)	DNER-ME 195/97	1,119	1,208	1,233	-	-
Massa Específica Real do Grão (g/cm³)	DNER-ME 195/97	2,973	2,984	2,972	3,008	3,01
Massa Específica Aparente do Grão (g/cm³)	DNER-ME 195/97	2,878	2,88	2,867	-	-
Índice de Lamelaridade	DAER/RS-EL 108/01		7,2		-	-
Desgaste ou Perda à Abrasão (%)	DNER-ME 035/98		21,3		-	-
Sanidade (%)	DNER-ME 089/94	1,22	-		-	-
Equivalente de areia	DNER-ME 054/97	-	-	-	60,8	
Índice de Forma	DNER-ME 086/94		2,01		-	-

Os resultados dos ensaios de análise granulométrica (média de duas determinações, realizadas com lavagens) estão apresentados na Tabela 5 e Figura 26.

Tabela 5 - Característica granulométrica dos materiais

Peneira	mm	Brita 1"	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó Grosso	Pó Fino	Cal Hidratada
1 1/2"	38,1	100	100	100	100	100	100
1"	25,4	95,5	100	100	100	100	100
3/4"	19,1	60,3	100	100	100	100	100
1/2"	12,7	7,5	40,1	100	100	100	100
3/8"	9,5	1,8	5,1	93,1	100	100	100
1/4"	6,25	1,4	2,3	38,7	80,6	99,7	100
n 4	4,8	1,2	1,1	14,5	72	99,5	100
n 8	2,36	0,7	0,5	2,6	45,9	75,1	100
n 10	2	0,6	0,4	0,8	42,1	71,5	100
n 16	1,18	0,4	0,3	0,6	31,3	54,2	100
n 30	0,6	0,3	0,3	0,5	23,6	41,9	100
n 40	0,42	0,3	0,3	0,5	21,2	38,1	100
n 50	0,3	0,2	0,3	0,4	17,3	30,6	97,9
n 80	0,18	0,1	0,2	0,3	13,3	23	95,8
n 100	0,15	0,1	0,1	0,2	11,2	19,4	92,9
n 200	0,075	0	0	0,1	6,00	10,4	85,5

Figura 26 - Distribuição granulométrica dos materiais



A cal hidratada foi adicionada às misturas asfálticas devido ao seu uso corrente nas obras de pavimentação do estado do Rio Grande do Sul. O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) indica, desde 2009, a incorporação de cal em misturas do tipo Concreto Asfáltico (CA) para utilização em rodovias federais brasileiras sob sua administração. Vários estudos (LITTLE *et al.*, 2006; NÚÑEZ *et al.*, 2007; BOCK *et al.*, 2009) relatam que a incorporação de cal em misturas asfálticas, além de melhorar a adesividade agregado-ligante, enrijecer o ligante asfáltico e a própria mistura (o que a torna mais resistente às deformações permanentes), retarda o trincamento (seja este ocasionado por fadiga ou por baixas temperaturas), alterando favoravelmente a cinética da oxidação e interagindo com produtos da oxidação, o que reduz seus efeitos deletérios.

Na Tabela 6 estão descritas as propriedades da cal utilizada, a análise foi efetuada segundo a norma NBR 6473:2003, sendo que, para as determinações de óxido de cálcio e magnésio, optou-se pelos métodos de referência contidos na própria norma (volumetria com oxalato/permanganato para CaO e gravimetria para MgO).

Tabela 6 – Propriedades da cal hidratada

DETERMINAÇÃO	UNIDADE DOLOMÍTICA	
Resíduo insolúvel (RI+SiO ₂)	%	18,6
Óxidos de ferro e alumínio (R ₂ O ₃)	%	0,7
Óxido de cálcio total (CaO)	%	30,9
Óxido de magnésio (MgO)	%	21,6
Perda ao fogo (1000 ± 50 °C)	%	27,9
Óxido de cálcio disponível (CaO)	%	3,6
Massa específica	g/cm ³	2,597

Pelos resultados de caracterização da cal utilizada, percebe-se uma quantidade superior de óxido de magnésio e uma porcentagem menor de óxido de cálcio, quando comparada com resultados encontrados na literatura para cales calcíticas. Como exemplo, Paniz (2018) realizou os mesmos ensaios para uma cal calcítica, e encontrou valores para óxido de cálcio total de 44,7% e de óxido de magnésio de 5,4%.

A bibliografia (Mohammad *et al.*, 2000; Little e Epps, 2001; Little e Petersen, 2005; Nuñez *et al.*, 2007; Bock, 2012), indica sempre o emprego de cales com elevados teores de hidróxido de cálcio para a obtenção de melhores resultados quanto a melhoria de adesividade e desempenho das misturas asfálticas.

A escolha pela cal dolomítica se deu pelo fato que no Rio Grande do Sul é produzida apenas este tipo de cal, uma vez que a adição da cal se deu por ser de uso corrente nas obras de pavimentação asfáltico no estado. A cal foi adicionada na mistura sobre o agregado graúdo seco, de acordo com o estudo de Bock *et al.* (2009), que constataram que a melhor forma de adição é realizada da seguinte forma: mistura-se a cal no agregado graúdo seco, e, posteriormente, coloca-se com o restante da mistura.

3.2.2 Cimento Asfáltico de Petróleo

Para execução desta pesquisa foram utilizados três ligantes asfálticos distintos, sendo eles:

- I. Cimento Asfáltico convencional (CAP 50/70), no qual não há adição de nenhum tipo de polímero;
- II. Cimento Asfáltico Modificado (Compaflex AMP 60/85-E), com adição de 4,5% de polímero SBS (Estireno-Butadieno-Estireno);
- III. Cimento Asfáltico altamente modificado (Compaflex HIMA - Highly Modified Asphalt). O CAP HIMA é um CAP 50/70 com incorporação de 7,5% de polímero SBS através de dispersão com alto cisalhamento mecânico.

O Cimento Asfáltico CAP 50/70 é produzido na Refinaria Alberto Pasqualini, em Canoas (RS), o qual foi disponibilizado para coleta pela empresa Della Pasqua em Santa Maria (RS). O ligante asfáltico foi coletado diretamente do caminhão para que não houvesse influência da presença de alguma modificação presente nos reservatórios da empresa. Esse é o tipo de ligante asfáltico convencionalmente empregado em obras de pavimentação no Rio Grande do Sul. Ambos os ligantes estão armazenados em latas de 18 litros e galões de 3,6 litros para aquecimento.

Os resultados dos ensaios realizados, pela especificação brasileira, estão apresentados na Tabela 7. Para o ligante HIMA, utilizou-se para fins de comparação os limites para o ligante AMP 65/90-E, devido não haver uma especificação própria para o Compaflex HIMA.

Tabela 7 - Propriedades dos ligantes pela especificação brasileira

Propriedade	Unidade	COMPAFLEX HIMA		COMPAFLEX AMP 60/85		CAP 50/70	
		Resultado	Limites (AMP 65/90-E)	Resultado	Limites (AMP 60/85 - E)	Resultado	Limites (CAP 50/70)
Penetração	0,1mm	55,5	40 a 70	61,2	40 a 70	70	40 a 70
Ponto de Amolecimento	°C	87	65	60	60	49	80 min
Viscosidade Brookfield 135 °C	cP	1865	3000 máx	1025	3000 máx	333	3000 máx
Viscosidade Brookfield 150 °C	cP	665	2000 máx	514	2000 máx	138	2000 máx
Viscosidade Brookfield 177 °C	cP	242,5	1000 máx	225	1000 máx	68	1000 máx
Ponto de Fulgor	°C	308	235	>400	235	334	235 min
Recuperação Elástica	%	84,32	90	75,80	85	8,83	20
Densidade Relativa		1,001		1,002		1,000	

A coleta do Cimento Asfáltico Compaflex AMP 60/85 – E foi disponibilizada pela empresa Triunfo Concepa. O material foi coletado diretamente do caminhão da transportadora, em Santo Antônio da Patrulha (RS). O Compaflex AMP 60/85 – E é produzido pela empresa Compasa do Brasil, em Curitiba (PR). Já o Cimento Asfáltico Compaflex HIMA foi disponibilizado diretamente pela empresa Compasa do Brasil (fabricante do produto), transportado de Curitiba (PR) por transportadora em latas de 18 litros até a cidade de Santa Maria (RS).

Através dos ensaios demonstrados na Tabela 7, percebe-se que os ligantes asfálticos modificados apresentam maior viscosidade, menor penetração, ponto de amolecimento maior e uma recuperação elástica maior quando comparados ao ligante convencional (CAP 50/70).

Realizaram-se também os ensaios da especificação SUPERPAVE (Tabela 8). A especificação é baseada nas propriedades reológicas, que classificam os ligantes de acordo com o tráfego e o clima, e, principalmente, são adotados critérios relacionados ao desempenho em serviço.

O desempenho do ligante é classificado em graus de temperatura máxima e mínima pelas letras PG (*Performance Grade*) juntamente com dois números (por exemplo, PG 58-28). O primeiro número é a temperatura mais alta durante os sete dias consecutivos mais quentes do ano, representando a temperatura mais alta em que o ligante asfáltico tem propriedades físicas para obter resistência perante à deformação permanente, determinado pelo parâmetro $|G^*|/\text{sen}\delta$ (obtido através do DSR). Já a segunda temperatura, incluindo o sinal negativo (-28) corresponde à temperatura mínima no dia mais frio do ano, representando a temperatura que o ligante tem propriedades físicas adequadas (determinado pelo *Bending Beam Rheometer* - BBR). Nas

temperaturas intermediárias é determinado o comportamento em relação à fadiga, também obtido pelo parâmetro $|G^*| \sin \delta$ no ensaio de cisalhamento dinâmico (DSR).

Tabela 8 - Propriedades dos ligantes pela especificação SUPERPAVE

Ligante	Ensaio	Medida			Limites	
		50/70	AMP 60/85	HiMA		
	<i>PG</i>	58 H -28	70 H -22	76 E -24	-	
Ligante Original		333 (135°C)	1025 (135°C)	872 (135°C)		
	Viscosidade					
	Norma T 316¹ (2013)	138 (150°C)	514 (150°C)	317 (150°C)	-	
		68 (177°C)	225 (177°C)	122 (177°C)		
	DSR² G* /sen(φ)	2,96 (58°C)	2,09 (64°C)	2,53 (70°C)		
Norma T 315 ¹ (2012)		1,32 (64°C)	1,14 (70°C)	1,67 (76°C)	≥ 1,00 kPa	
		0,62 (70°C)	0,65 (76°C)	1,21 (82°C)		
	Perda de Massa					
Ligante Envelhecido no <i>RTFOT</i> ⁵ (T=163°C)	Norma T 240¹ (2013)	-0,04	-0,08	-0,04	< ±1,00%	
		4,93 (58°C)	4,18 (64°C)	4,08 (70°C)		
	DSR² G* /sen(φ)	2,09 (64°C)	2,25 (70°C)	2,58 (76°C)	≥ 2,20 kPa	
		0,93 (70°C)	1,27 (76°C)	1,71 (82°C)		
	MSCR³				S [2,0<Jnr≤4,5]	
		Jnr @3,2	1,91 (58°C)	1,41 (70°C)	0,21 (76°C)	H [1,0<Jnr≤2,0] V [0,5<Jnr≤1,0] E [0,0<Jnr≤0,5]
		Jnrdiff	5,50%	62,70%	96,30% ⁷	≤ 75%
Ligante Envelhecido no <i>RTFOT</i> ⁵ + <i>PAV</i> ⁶ (T=163°C)		11198 (19°C)	7949 (19°C)	2482 (19°C)		
	DSR² G* .sen(φ)	7442 (22°C)	5382 (22°C)	1631 (22°C)	≤ 6000 kPa	
	Norma T 315¹ (2012)	4998 (25°C)	3449 (25°C)	1036 (25°C)		
		52 (-6°C)	42 (-6°C)	43 (-6°C)		
	BBR⁴ Módulo de rigidez – S	135 (-12°C)	86 (-12°C)	80 (-12°C)	≤ 300 MPa	
	Norma T 313¹ (2012)	278 (-18°C)	186 (-18°C)	119 (-18°C)		
		0,428 (-6°C)	0,439 (-6°C)	0,454 (-6°C)		
	Coefficiente angular – m	0,330 (-12°C)	0,391 (-12°C)	0,325 (-12°C)	≥ 0,300	
	0,316 (-18°C)	0,286 (-18°C)	0,333 (-18°C)			

¹AASHTO; ²Dynamic Shear Rheometer; ³Multiple Stress Creep and Recovery; ⁴Bending Beam Rheometer; ⁵Rolling Thin Film Oven Test; ⁶Pressure Aging Vessel; ⁷ Valor do Jnrdiff superior ao limite de 75%, entretanto, a literatura tem mostrado que ligantes com alto teor de modificação, principalmente por polímero SBS, apresentam alta sensibilidade à variação de tensão (Domingos e Faxina, 2015; Huang e Tang, 2015; Sumeraj, 2016), o que pode representar uma limitação deste parâmetro, ou seja, para ligantes altamente modificados o Jnrdiff não tem significado prático, sendo discutida a sua retirada da especificação.

Nota-se pela Tabela 8 que juntamente com o PG há uma letra, no qual, estão caracterizados os níveis de tráfego, que são definidos com as letras S (Tráfego Padrão), H (Tráfego Pesado), V (Tráfego Muito Pesado) e E (Tráfego Extra Pesado). Estes parâmetros são retirados através do ensaio de MSCR (*Multiple Stress Creep and Recovery*), pelo parâmetro do Jnr, define-se um valor para o Jnr @ 3,2 kPa e também um percentual máximo para a diferença entre os valores de Jnr @ 0,1 e @ 3,2 kPa. De acordo com esses valores, determina-se qual o nível de tráfego suportado pelo ligante. O parâmetro Jnr apresenta uma correlação com a resistência ao tráfego e com o desempenho do ligante muito maior do que outros parâmetros empíricos, como, por exemplo, a recuperação elástica.

A adoção de uma especificação baseada em desempenho representa uma segurança maior em relação à durabilidade dos pavimentos, muito discutida atualmente nos EUA. Já é usada na Europa, especialmente na França, há mais de 50 anos. Mas deve ser usada em conjunto com métodos mais modernos de dosagem de misturas e de dimensionamento de pavimentos.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia Prof. Jacques Medina (LABGEO) da COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

3.3 MISTURAS ASFÁLTICAS UTILIZADAS

Nesta pesquisa utilizaram-se quatro curvas granulométricas com três tipos de ligantes asfálticos e dois métodos de dosagem, sendo duas curvas consideradas como referência, onde a proporção dos agregados foi definida por tentativa e erro (Método Convencional), enquadrando uma na Faixa B e outra na Faixa C do DNIT. Ainda, duas outras curvas granulométricas atendendo os parâmetros do Método Bailey e enquadradas nas mesmas Faixas B e C do DNIT.

Na Tabela 9, está descrita a porcentagem de cada fração que irá compor as quatro curvas granulométricas.

Tabela 9 - Porcentagem de cada fração do agregado utilizado para compor as curvas granulométricas

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	FAIXAS GRANULOMÉTRICAS	BRITA 1"	BRITA 3/4"	BRITA 3/8"	PÓ GROSSO	PÓ FINO	CAL HIDRATADA
Método Convencional	B	14	11	27	23	23,5	1,5
Método Bailey	B	17	17	19	23	22,5	1,5
Método Convencional	C	0	20	27	26	25,5	1,5
Método Bailey	C	0	30	15	29,5	24	1,5

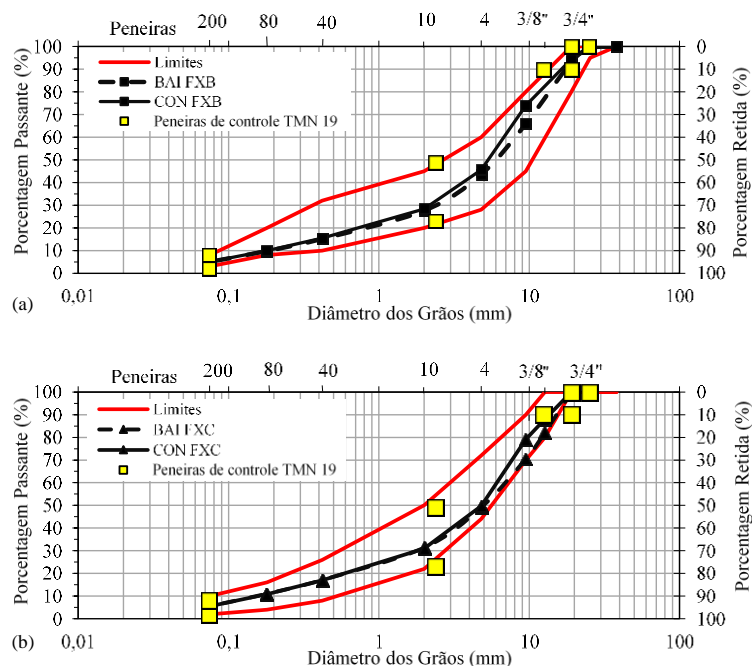
A Tabela 10 demonstra o percentual passante da composição de cada mistura.

Tabela 10 - Percentual passante de cada mistura com agregados

Peneira	mm	Mistura	Mistura	Mistura	Mistura
		Convencional Faixa B	Bailey Faixa B	Convencional Faixa C	Bailey Faixa C
1 1/2"	38,1	100	100	100	100
1"	25,4	99,4	99,2	100	100
3/4"	19,1	94,4	93,3	100	100
1/2"	12,7	80,8	75,0	88,0	81,0
3/8"	9,5	73,9	65,9	79,2	70,5
1/4"	6,25	54,4	50,5	58,8	55,7
n 4	4,8	45,6	43,6	49,7	49,1
n 8	2,36	30,5	29,6	33,4	33,6
n 10	2,0	28,3	27,6	31,0	31,3
n 16	1,18	21,7	21,1	23,7	23,9
n 30	0,6	17,0	16,6	18,5	18,7
n 40	0,42	15,5	15,1	16,9	17,1
n 50	0,3	12,8	12,5	13,9	14,0
n 80	0,18	10,0	9,8	10,9	11,0
n 100	0,15	8,6	8,4	9,3	9,4
n 200	0,075	5,1	5,0	5,5	5,5

Na Figura 27 estão demonstradas as curvas granulométricas das misturas enquadradas na Faixa B e Faixa C do DNIT, e as curvas granulométricas que atendem aos parâmetros Bailey e aos parâmetros da Faixa especificada pelo DNIT.

Figura 27 - Curva granulométrica das misturas (a) Faixa B e (b) Faixa C DNIT 031 (2006)



Na Tabela 11 está demonstrado o enquadramento das quatro curvas granulométricas nos parâmetros estabelecidos pelo método Bailey, que são definidos pelas proporções de agregados graúdos (proporção AG), proporção graúda dos agregados finos (GAF) e proporção fina dos agregados finos (FAF).

Tabela 11 - Análise das quatro granulometrias nos parâmetros estabelecidos pelo método Bailey

COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	FAIXAS GRANULOMÉTRICAS	DMN	Limites de acordo com DMN		
			0,60 a 0,75	0,35 - 0,50	0,35 - 0,50
			Proporção AG	Proporção GAF	Proporção FAF
Método Convencional	B	19	1,09	0,48	0,59
Método Bailey	B	19	0,65	0,48	0,59
Método Convencional	C	19	1,41	0,48	0,59
Método Bailey	C	19	0,72	0,48	0,59

Nota-se que as proporções FAF para as duas granulometrias Bailey ficaram acima do limite proposto pelo método, mesmo após várias tentativas de enquadramento, sendo esta a melhor obtida com os agregados disponíveis, fato este também identificado em estudos como Budny (2012), Mendes e Marques (2012) e Wargha Filho (2013). Já as composições granulométricas Convencionais não atendem a especificação na proporção AG. O comportamento graúdo das misturas inicialmente adotado devido a quantidade de material passante na Peneira de Controle Primário (PCP) ser menor que 49,9% em todas as misturas (ASPHALT INSTITUTE, 2011), foi confirmado após o processo de dosagem.

Além do método Bailey, verificou-se o comportamento das granulometrias das 24 misturas quanto ao método FAD (Faixa de Agregados Dominantes), calculando-se as porosidades após o processo de dosagem, conforme a Equação 10, que considera no cálculo a densidade aparente da mistura de agregados, densidade máxima medida, teor de ligante e volume de vazios da mistura.

Para porosidade inferior a 48% têm-se um esqueleto mineral potencialmente resistente à deformação permanente, pois quanto maior a quantidade de peneiras na composição da FAD, maior é a quantidade de diferentes tamanhos de agregados que estão interagindo entre si e formando o esqueleto mineral. Valores superiores a 52% são um indicativo de suscetibilidade à deformação permanente e valores intermediários a estes dois limites são chamados

porosidades marginais no qual não se tem uma garantia quanto a capacidade de intertravamento da estrutura de agregados.

$$FAD = \frac{Vv(FAD)}{VT(FAD)} = \frac{VIC,ag+VAM}{Vtm-Vag>FAD} \quad (10)$$

Onde:

FAD = porosidade da FAD (%);

Vv(FAD) = volume de vazios dentro da FAD;

VT(FAD) = Volume total de agregado disponível para a FAD;

VIC,ag = Volume de agregados intersticiais (menores do que a FAD);

VAM = volume de vazios no agregado mineral;

Vtm = volume total da mistura;

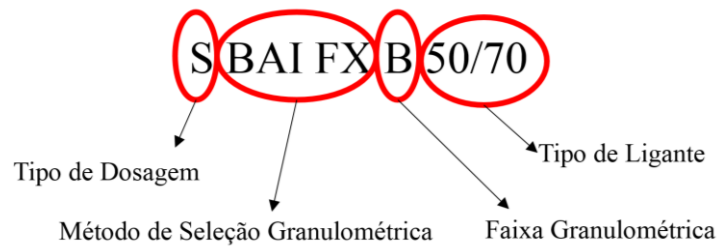
Vag>FAD = volume de agregados flutuantes (maiores do que a FAD).

O método FAD foi proposto por Kim (2006), e trata-se de uma ferramenta que avalia a estrutura granulométrica de misturas asfálticas, com objetivo de obter um esqueleto pétreo estável e resistente à deformação permanente a partir de um contato efetivo entre as partículas graúdas (maiores que 1,18 mm), chamadas de agregados dominantes e que compõem a FAD. Os agregados mantêm espaçamento constante e com contato efetivo, o que garante um esqueleto com boa resistência ao dano quando a proporção relativa entre a quantidade retida de duas peneiras consecutivas fique no intervalo entre 0,43 e 2,33. Esse contato granular é avaliado por meio da porosidade, medida adimensional e indica o comportamento da mistura à deformação permanente (Ferreira *et al.*, 2015; Bastos, 2015; Ferreira *et al.*, 2016; Barboza Jr, 2018).

3.3.1 Nomenclatura das Misturas Asfálticas

Devido ao grande número de misturas, e ao mesmo tempo com nomes semelhantes, fez-se uso de nomenclatura e simbologia padronizada para que houvesse facilidade e entendimento dos resultados. A Figura 28 representa como foram usados as nomenclaturas e os símbolos para apresentação nos resultados.

Figura 28 – Nomenclatura das misturas



Primeiramente tem-se os tipos de dosagem, Marshall (M) ou SUPERPAVE (S), em seguida o Método de seleção granulométrica em que as misturas foram submetidas para o enquadramento das Faixas Granulométrica (Bailey - BAI e Convencional - CON), o próximo é a Faixa Granulométrica (Faixa B – FX B ou Faixa C – FX C), e por último o Tipo de ligante utilizado (CAP 50/70, AMP 60/85 e HIMA), representado pela Figura 29.

Figura 29 – Simbologia das misturas

-■ - S BAI FX B 50/70	-■ - S CON FX B 50/70	-▲ - S BAI FX C 50/70	-▲ - S CON FX C 50/70
-□ - M BAI FX B 50/70	-□ - M CON FX B 50/70	-▲ - M BAI FX C 50/70	-▲ - M CON FX C 50/70
-■ - S BAI FX B 60/85	-■ - S CON FX B 60/85	-▲ - S BAI FX C 60/85	-▲ - S CON FX C 60/85
-□ - M BAI FX B 60/85	-□ - M CON FX B 60/85	-▲ - M BAI FX C 60/85	-▲ - M CON FX C 60/85
-■ - S BAI FX B HIMA	-■ - S CON FX B HIMA	-▲ - S BAI FX C HIMA	-▲ - S CON FX C HIMA
-□ - M BAI FX B HIMA	-□ - M CON FX B HIMA	-▲ - M BAI FX C HIMA	-▲ - M CON FX C HIMA

Os ligantes asfálticos foram separados por cores, a cor preta para o CAP 50/70, a cor azul para o AMP 60/85 e a cor vermelha o HIMA. As faixas granulométricas foram diferenciadas através dos formatos, o quadrado para as Faixas B e triângulo para Faixa C. As linhas contínuas estão representando o método de seleção granulométrica convencional, e as linhas pontilhadas o método Bailey. O método de dosagem está diferenciado pela simbologia, aberta ou fechada, aberta são as misturas dosadas pela metodologia Marshall, e a fechada para SUPERPAVE.

3.4 PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

O principal propósito dos procedimentos de ensaios e descrição dos equipamentos é demonstrar os ensaios mecânicos utilizados neste trabalho para caracterizar o comportamento das misturas asfálticas em termos da deformação permanente, comportamento viscoelástico e principalmente o comportamento perante o dano de fadiga. Tendo isso em vista, foram realizados os seguintes ensaios nas misturas asfálticas.

3.4.1 Dosagem das Misturas Asfálticas

Devido à utilização de dois métodos diferentes de dosagem das misturas asfálticas, procurou-se seguir, para ambas as dosagens, os mesmos processos de mistura e envelhecimento, diferenciando apenas o processo de compactação e de cálculos para obtenção do teor de ligante. Para confecção das amostras, inicialmente ocorreu a coleta do agregado, separou-se nas peneiras (Tabela 12), conforme a fração de agregado que utilizada, e em seguida lavou-se e pesou-se para posterior moldagem das amostras de acordo com a Metodologia Marshall e a Metodologia SUPERPAVE.

Tabela 12 - Peneiras utilizadas para composição das misturas

Material	Brita 3/4"	Brita 3/4"	Brita 3/8"	Pó Grosso	Pó Fino	
	Brita 1"	Faixa B				Faixa C
Peneira utilizada	3/4"	3/8"	1/2"	n 4	n 4	-
	3/8"		3/8"	n 10	n 10	n 10
					n 40	n 40
					n 80	n 80
					n 200	n 200
					passante 200	passante 200

Abaixo estão descritos resumidamente o processo de cada método de dosagem.

3.4.1.1 Dosagem Marshall

A dosagem das misturas asfálticas e a moldagem das amostras, juntamente com a obtenção dos parâmetros de dosagem Marshall (DNER – ME 043/95 e ASTM D 6926-04),

foram realizadas no LMCC. Para a realização de cada composição granulométrica das misturas, adequaram-se de forma a enquadrar o material na faixa “C” e faixa “B” do DNIT, com tamanho máximo de granulares de 19 mm; foi adotado o volume de vazios (VV) de 4% como critério de dosagem.

A moldagem dos corpos de prova ocorreu da seguinte forma: foram moldados por compactação mediante impacto (75 golpes por face) a quente (Figura 30), uma série de corpos de prova (3 CP's para cada teor) com a mistura de agregados, ligante asfáltico e cal hidratada.

Após a adição do ligante na mistura, deixou-se na estufa durante duas horas na temperatura de compactação, para simulação do envelhecimento do ligante na mistura, de acordo com o procedimento da AASHTO R 30-02 – *Mixture Conditioning of Hot-Mix-Asphalt*. Ao final do período de duas horas, a mistura foi colocada dentro de moldes cilíndricos metálicos que, depois de compactados, são armazenados ao ar livre (durante 24 horas), e então desmoldados, medidos e pesados. O passo seguinte consiste em calcular os parâmetros de dosagem.

Figura 30 - Exemplo de um compactador por impacto – Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM



Após medição e pesagem, determinaram-se parâmetros como o volume de vazios, a densidade, e outros; e então, os corpos de prova são levados para imersão em banho de 60°C durante período de 30 a 40 minutos, e imediatamente, submetidos à compressão diametral, aplicada por uma prensa, através de um molde de compressão cilíndrico, idealizado por

Marshall. Os valores obtidos são: estabilidade, que representa o valor da carga máxima suportada pelos corpos de prova; e fluência, que é a deformação de ruptura, onde juntamente com os parâmetros de densidade, volume de vazios e a relação entre vazios do agregado mineral preenchido por ligante, são calculados os parâmetros de dosagem Marshall.

Apesar da metodologia Marshall ser contestada por muitos autores em virtude da dispersão de seus resultados (principalmente nos valores de estabilidade e fluência), do confinamento do corpo de prova na determinação da estabilidade (que não representa modos de ruptura da mistura no campo), e da forma de compactação, é ainda o procedimento mais utilizado para dosagem e controle de qualidade das misturas asfálticas no Brasil, principalmente devido à simplicidade e o baixo custo dos equipamentos.

3.4.1.2 *Dosagem SUPERPAVE*

Desde 1993, as universidades e departamentos de transporte americanos utilizam a metodologia SUPERPAVE, para a dosagem de misturas. O método foi desenvolvido pela *Strategic Highway Research Program (SHRP)*, o qual foi criado para substituir os métodos de Hveem e Marshall. A análise volumétrica comum a estes dois métodos serviu de base para o método SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavement System*).

O SUPERPAVE se trata de um método que abrange a dosagem de misturas asfálticas adaptadas aos requisitos de desempenho ditadas pelo tráfego e ambiente (clima). Ele facilita a escolha e a combinação do ligante asfáltico, agregado, e algum modificante necessário para alcançar o nível requerido do desempenho do pavimento. A metodologia inclui equipamentos de ensaios, métodos e critérios.

O método foi desenvolvido em três níveis de projeto de misturas, porém no Brasil se utiliza apenas o nível 1 – para tráfego com carga de eixo equivalente (*ESAL - Equivalent Single Axle Load*) abaixo de 10^6 . É requerido apenas projeto volumétrico.

O nível 1 engloba moldagem de corpos de prova com utilização do Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) e a seleção do teor de ligante é baseada na porcentagem de vazios (VV), nos vazios do agregado mineral (VAM), na porcentagem de vazios preenchido com asfalto e razão fíler/asfalto. O método descreve fases de compactação para determinação do teor de ligante para a tentativa inicial e da escolha da granulometria, porém essas fases foram suprimidas devido às composições granulométricas já serem existentes.

Para a realização das dosagens SUPERPAVE, utilizou-se da mesma técnica que a dosagem Marshall; quatro teores de ligante e, para cada teor, três corpos de prova, compactados

por amassamento no CGS do Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM (Figura 31), com pressão aplicada de 600kPa, ângulo de rotação externo de 1,25°, ângulo de rotação interno de 1,16° e velocidade constante de 30rpm. A dosagem é realizada para um N de projeto de 100 giros, indicado para tráfego médio alto. Devido ao TMN (Tamanho Máximo Nominal) das misturas serem de 19mm, optou-se pela utilização do molde de 100mm de diâmetro e com tamanho de amostra idêntico ao do método Marshall.

Diferentemente do método de dosagem Marshall, no CGS os corpos de prova são compactados e logo desmoldados, porém se deve esperar 24 horas para que os corpos de prova estejam devidamente à temperatura ambiente. Após isso, os parâmetros de dosagem devem ser calculados por meio dos pesos secos, submerso e superfície seca, de onde são obtidos os parâmetros volumétricos dos corpos de prova: porcentagem de vazios com ar (V_a), vazios no agregado mineral (VAM), relação betume-vazios (RBV) e relação pó-betume efetivo (RPB). Juntamente com a massa asfáltica de cada teor de cada amostra utilizada para a dosagem, retira-se uma porção para a determinação da densidade máxima medida (DMM) realizada de acordo com a AASHTO T 209-05 (Método Rice) e ABNT NBR 15619/2012.

Figura 31 - Exemplo de um Compactador giratório – Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM



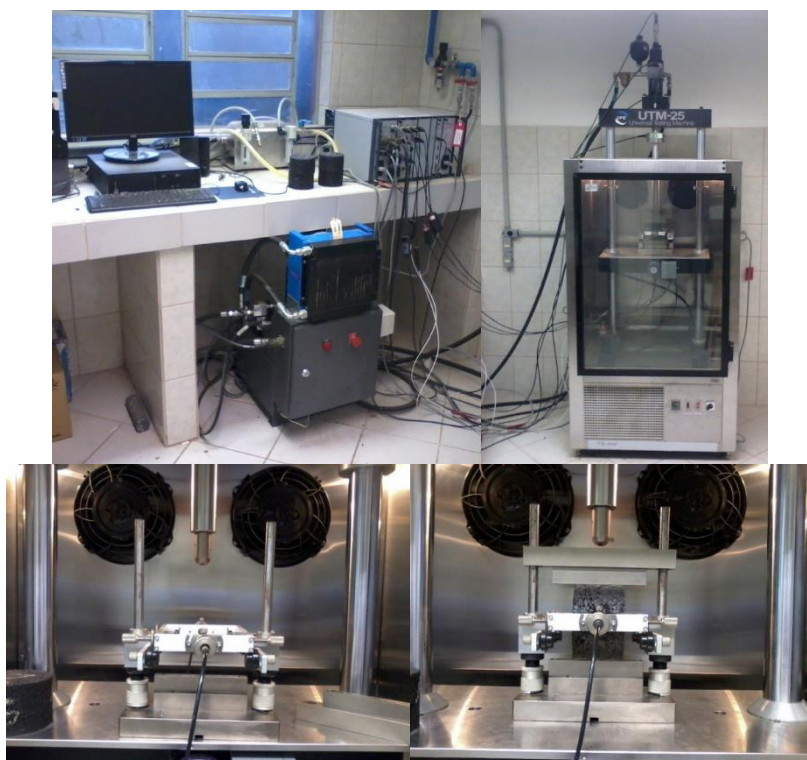
3.4.2 Propriedades de Deformabilidade

A deformabilidade de misturas asfálticas é influenciada pelo tempo de duração do carregamento e a temperatura. As características reológicas dos cimentos asfálticos devem ser, juntamente com outros fatores, avaliadas com cuidado, pois influenciam diretamente no comportamento de deformabilidade de uma mistura asfáltica e, vão influenciar no desempenho. Nesse sentido, está descrito neste item os ensaios realizados para avaliar este fenômeno, através dos ensaios: Módulo de Resiliência e Módulo Complexo.

3.4.2.1 Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de módulo de resiliência é determinado através das prescrições da norma do DNIT-ME 135/2010. O equipamento utilizado (Figura 32) é uma UTM – 25 (*Universal Test Machine*) da IPC Global, composta por um pistão que proporciona um carregamento repetido pulsante com auxílio de um dispositivo pneumático, acoplado a um regulador de tempo, com tempo de 0,1s e 0,9s de repouso, e leitura de deformação é feita através de LVDTs (*linear variable differential transformers*) nas duas faces do corpo de prova.

Figura 32 - Imagem da UTM – 25 utilizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil



O Módulo de Resiliência é preconizado pela norma à temperatura de 25°C e à frequência de aplicação da carga “F” de 60 ciclos por minuto, com o tempo de carregamento de 0,1s e, portanto, 0,9s de repouso ou descarregamento. Para este trabalho, as misturas asfálticas foram submetidas a três temperaturas (10°C, 25°C e 35°C) e a três tempos de carregamento (0,2s, 0,1s e 0,04s, equivalentes a uma frequência de carregamento de 25Hz, 10Hz e 5Hz), ficando o tempo de aplicação da carga com 60 ciclos por minuto, independente do tempo de carregamento, utilizando-se dos mesmos corpos de prova para todas as temperaturas e frequências. O ensaio sempre ocorre da menor temperatura para a maior, e da maior frequência para menor. A temperatura de 35°C foi definida como a maior, de modo que as tensões aplicadas não causassem deformações permanentes excessivas nos corpos de prova, pois os mesmos serão submetidos ao ensaio de resistência à tração.

Para execução do ensaio, o coeficiente de Poisson adotado para o cálculo do MR medido variou em função da temperatura, como pode ser observado na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores do Coeficiente de Poisson para as temperaturas utilizadas

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

O princípio de aplicação de carga é o mesmo do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, porém para o MR, o carregamento é pulsante (o que não leva à ruptura do CP). O carregamento utilizado é equivalente a 10% da resistência à tração da mistura. A Equação 11 foi utilizada para o cálculo do MR.

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

Onde:

MR= módulo de resiliência total, MPa;

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

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

h = altura do corpo de prova;

μ = coeficiente de Poisson.

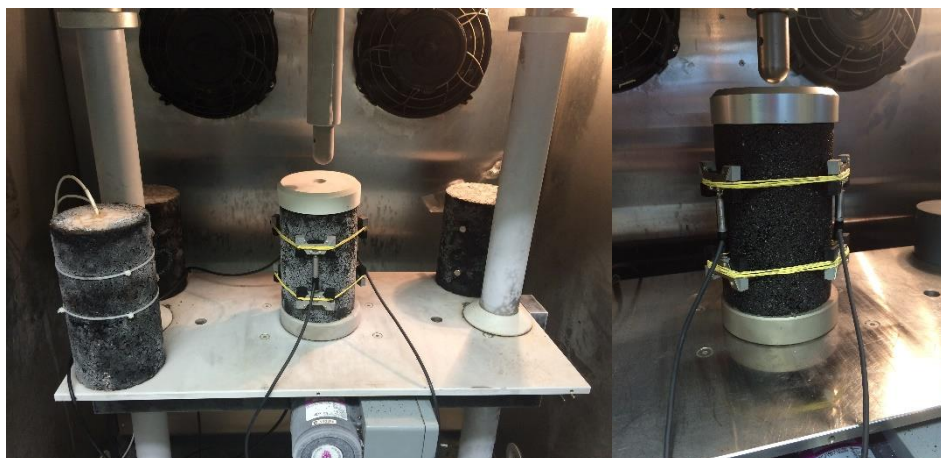
O módulo de resiliência a uma dada temperatura e frequência em misturas asfálticas é influenciado por diversas variáveis, como o tipo de mistura, faixa granulométrica, tipo de ligante asfáltico, as propriedades volumétricas, a energia e a temperatura de compactação. Outros fatores podem influenciar no módulo de resiliência, tais como variáveis ambientais: temperatura, umidade e qualquer outro fator que altere as propriedades do material durante a vida de serviço.

3.4.2.2 *Ensaio de Módulo Complexo*

O Módulo Complexo E^* é definido como um número complexo que relaciona deformações e tensões para materiais viscoelásticos sujeitos a um carregamento senoidal, sendo que a parte real representa a componente elástica e a imaginária representa a componente viscosa (MEDINA E MOTTA, 2015).

O ensaio de módulo complexo foi realizado no equipamento UTM - 25 (*Universal Testing Machine*), e seguiu a norma AASHTO T 342-11 – *Determining Dynamic Modulus of Hot-mix Asphalt Concrete Mixtures*, com utilização de duas amostras para cada mistura. A determinação do módulo complexo se deu após a aplicação de carga da temperatura mais baixa para a mais alta (-10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C) e da frequência mais alta até a mais baixa (25Hz, 20Hz, 10Hz, 5Hz, 2Hz, 1Hz, 0,5Hz, 0,2Hz, 0,1Hz, 0,01Hz).

Para a realização do ensaio as amostras foram moldadas no compactador giratório do SUPERPAVE (CGS) nos teores de projeto determinados pela dosagem Marshall e SUPERPAVE, com dimensões de 10x16cm e um volume de vazios de 5,5% \pm 0,5%. As mesmas tiveram sua superfície retificada, ficando com dimensões finais de 10x15cm. Então, foram levadas para o condicionamento e realização do ensaio, conforme demonstra a Figura 33.

Figura 33 - Realização do Módulo Complexo a temperatura de -10°C 

O condicionamento das amostras se deu pelo tempo mínimo como mostrado na Tabela 14 para que as amostras atinjam cada temperatura.

Tabela 14 - Tempo mínimo recomendado para equilíbrio da temperatura para amostras para o ensaio de $|E^*|$

<i>Temperatura de ensaio ($^{\circ}\text{C}$)</i>	<i>Tempo para equilíbrio da temperatura a partir da temperatura da sala de ensaio de 25°C</i>	<i>Tempo para equilíbrio da temperatura a partir da temperatura de teste anterior</i>
-10	Uma noite	Uma noite
4	Uma noite	4 horas ou uma noite
21	1 hora	3 horas
37	2 horas	2 horas
54	3 horas	1 horas

Fonte: Adaptado de AASHTO T 311-11.

Para cada temperatura, foi realizada uma varredura de tensões em cada uma das frequências, para a obtenção da tensão aplicada para fornecer uma deformação do material de 50 a 75 microstrains (no intuito de buscar um regime de viscoelasticidade linear). Após a determinação da tensão aplicada para cada frequência, em determinada temperatura, o ensaio foi realizado com as tensões pré-determinadas. O Módulo Dinâmico é calculado automaticamente pelo software da UTM (Equação 12), assim como o ângulo de fase para todas as temperaturas e as frequências consideradas. Como foram ensaiados dois CPs, os valores de Módulo Complexo considerados são relativos à média de dois resultados. Com a obtenção dos módulos, é possível construir as curvas mestras.

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

Onde:

$|E^*|$ = Módulo dinâmico uniaxial;

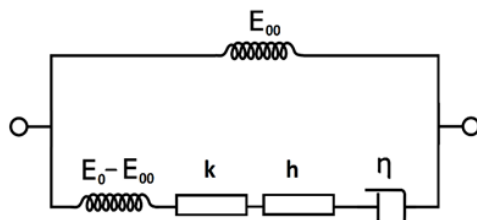
σ_0 = Amplitude (pico-a-pico) de tensão;

ε_0 = Amplitude (pico-a-pico) de deformação.

O módulo complexo, assim como o módulo de resiliência, varia de acordo com a temperatura e a frequência, e também é influenciado por outras variáveis, como o tipo de mistura, faixa granulométrica, tipo de ligante asfáltico, as propriedades volumétricas e outras. Para o módulo complexo, os resultados são expressos pelas curvas isotermas, curvas isócronas, curvas no plano cole-cole, espaço black e pelas curvas mestras.

Para uma melhor representatividade foi utilizado uma modelagem físico-matemática, na qual podem ser obtidas outras propriedades sem necessidade de realização de novos ensaios. Para isso, se utilizou de um modelo desenvolvido por Olard & Di Benedetto (2003), onde em uma campanha experimental sobre caracterização do comportamento viscoelástico linear de diferentes materiais asfálticos, conseguiu-se obter as ligações entre as propriedades viscoelásticas linear desses materiais, por meio do ensaio de módulo complexo utilizando um modelo criado pelos próprios autores em 2003 chamado de 2S2P1D (2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot). O modelo 2S2P1D (Figura 34) é baseado em uma simples combinação de elementos físicos: 2 molas, 2 elementos parabólicos e 1 amortecedor. O modelo tem um espectro contínuo, ou seja, pode ser representado por uma infinidade de elementos em série ou em paralelo.

Figura 34 - Representação do modelo 2S2P1D



Fonte: Di Benedetto *et. al.* (2004).

A uma dada temperatura, o modelo 2S2P1D tem 7 constantes e seu módulo complexo é dado pelas seguintes expressões (Equações 13 e 14):

$$E^*(\omega) = E_{00} \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(j\omega\tau)^{-k} + (j\omega\tau)^{-h} + (j\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (13)$$

$$v^*(\omega) = v_{00} + (v_0 - v_{00}) \frac{E^*(\omega) - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad (14)$$

Onde:

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

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

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

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

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

τ = 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;

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

v_0 = coeficiente de Poisson estático em transição vítrea, $\omega \rightarrow \infty$.

3.4.3 Propriedades de Resistência

A resistência é um importante parâmetro para o dimensionamento dos pavimentos. Assim como a deformabilidade, o estudo da resistência nas misturas asfálticas é baseado na dependência da temperatura e da frequência do carregamento.

Neste item estão descritos os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral, de *Flow Number* e de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico.

3.4.3.1 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Indicadores do Desempenho de Misturas Asfálticas

O ensaio para a determinação da resistência à tração por compressão diametral nas amostras com diâmetro 10,20 cm e altura variável, seguiu as prescrições da norma DNIT 136/2010 - ME e consiste na aplicação de uma carga estática de compressão, com velocidade de 0,8mm/s, distribuída ao longo de duas geratrizes opostas, a fim de se obter as tensões de

tração através do diâmetro horizontal, perpendicularmente à carga (Figura 35). A medida resultante é a resistência à tração (RT), dada pela Equação 15:

$$RT = \frac{2F}{\pi.d.h} \quad (15)$$

Onde:

RT= Resistência à Tração, em kgf/cm²;

F= força aplicada, em kgf;

h= altura do corpo de prova, em cm;

d= diâmetro do corpo de prova, em cm.

As amostras utilizadas para o ensaio são as mesmas utilizadas no ensaio de Módulo de Resiliência, e passam por condicionamento de cerca de 2 horas a temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$. O equipamento utilizado para o ensaio de Resistência à Tração é uma prensa mecânica apresentada na Figura 35.

Figura 35 - Equipamento para ensaio de Resistência à Tração



Além disso, usou-se a UTM-25 para realizar o ensaio de Resistência à Tração, sistema este implantado por Faccin (2018) no GEPPASV, porém para outras amostras, onde, fez-se uso das medidas de deslocamento vertical e força a cada 0,01 segundo, calculando, então, outros parâmetros além da Resistência à Tração por Compressão Diametral, tais como:

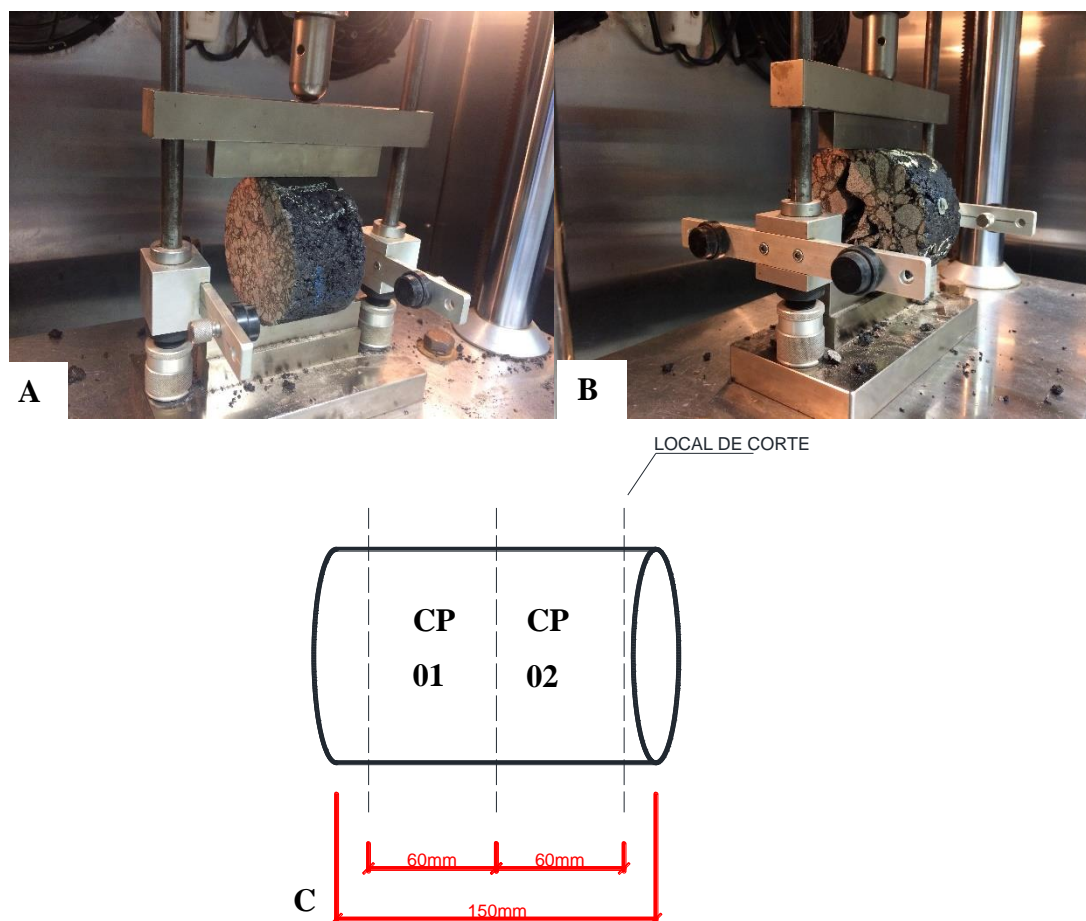
- I. Resistência à Tração Indireta: é o parâmetro utilizado pelas especificações brasileiras, e é obtido através da carga máxima aplicada em uma amostra até o momento de ruptura;
- II. Tenacidade: é uma medida de quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar. É calculada a partir da área sob a curva de RTI (Resistência à Tração Indireta) *versus* deformação horizontal. A tenacidade do material se dá nessa área até uma deformação do dobro da máxima tensão (Putman e Amirkhanian, 2004);
- III. Índice de Tenacidade: este índice compara o desempenho de uma amostra com a de um material de referência elástico perfeitamente plástico, para o qual o IT permanece uma constante de 1. Para um material frágil ideal sem capacidade de carga pós-pico, o valor de IT é igual a zero. É um parâmetro que descreve a tenacidade na região pós-pico, também é calculado a partir dos resultados de RTI (HUANG; SHU; LI, 2005);
- IV. Energia de Fratura: A energia de fratura é a combinação da energia dissipada, que trinca a amostra e a energia de tração, que a deforma. O parâmetro é calculado sob a área da curva até a deformação de tração no momento da ruptura (máxima tensão);
- V. Índice de Flexibilidade: É um parâmetro inicialmente calculado para amostras semicirculares, e é calculado conforme a *Illinois Test Procedure - 405* (2015), que determina os parâmetros de resistência à fratura de misturas asfálticas. O índice é calculado pela curva carga *versus* deslocamento e nos fornece um critério para identificar misturas frágeis (propícias a um trincamento prematuro). Para o estudo foi analisada a viabilidade de adaptação com as amostras do ensaio de Resistência à Tração.

O ensaio foi realizado também conforme a norma DNIT 136/2010 – ME. As amostras utilizadas foram as mesmas utilizadas para o Módulo Complexo. Escolheu-se estas devido ao volume de vazios (5,5%), isto é, o mesmo volume de vazios das amostras do ensaio de Fadiga. Essa escolha foi realizada para verificar se há alguma correlação entre os parâmetros calculados no ensaio de RT e os resultados do ensaio de Fadiga.

Devido ao tamanho das amostras do ensaio de Módulo Complexo (100x150mm), fez-se necessário cortar os CPs para que se atingisse amostras entre 3,50cm e 6,50cm (DNIT 136/2010). A Figura 36 demonstra como foi realizado o corte das amostras, primeiramente foram retiradas e descartadas as extremidades dos CPs de Módulo Complexo (cerca de 1,5 a

2cm), e então retiradas duas amostras de cada CP utilizado. Cada amostra para a Resistência à Tração ficou com altura entre 5 a 6 cm.

Figura 36 – (a) Equipamento para ensaio de Resistência à Tração na UTM-25, (b) Corpo de Prova durante a realização do ensaio, (c) Esquema para obtenção dos corpos de prova.



3.4.3.2 Ensaio de Creep Dinâmico (*Flow Number*)

Este procedimento é empregado para avaliar o comportamento de uma mistura asfáltica em relação a sua resistência à deformações permanentes. O *Flow Number* (resultado do ensaio) é definido como o número de repetições de carga em que a deformação de cisalhamento, sob um volume constante, inicia-se. Pode-se dizer que o *Flow Number* é o ponto onde a deformação permanente acumulada em uma mistura asfáltica passa a aumentar rapidamente, indicando que a amostra entrou em colapso.

O ensaio de *Creep Dinâmico (Flow Number)* é normatizado no Brasil pela norma ABNT NBR 16505:2016, porém quando se executou o ensaio a referida norma estava sendo criada,

assim, para execução do ensaio foram seguidos os parâmetros recomendados pelo *Report 465* do *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) (Witczak *et al.*, 2002). Para cada mistura, foram ensaiados dois corpos de prova com geometria de 10cm de diâmetro por 15cm de altura e 7% ($\pm 1\%$) de volume de vazios (sendo o Grau de Compactação de $97\% \pm 0,5\%$, da NBR 16505). As amostras foram moldadas no CGS, tanto as misturas determinadas pela dosagem Marshall como pelo SUPERPAVE.

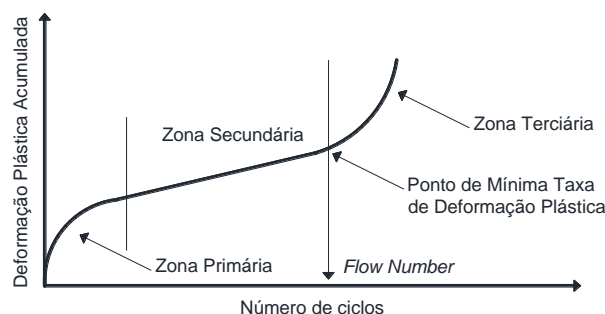
O ensaio foi executado na temperatura de 60°C , e com uma tensão de 204kPa, com tempo de aplicação da carga de 0,1s e o tempo de repouso 0,9s. Foi realizado na *Universal Test Machine* (UTM) da IPC Global (Figura 37).

Figura 37 - Imagem da UTM – 25 utilizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil e dos corpos de prova antes e depois do ensaio



Devido à alta temperatura na qual o ensaio procede, as amostras foram condicionadas por um tempo mínimo de 8 horas. Todos os ensaios foram conduzidos até a obtenção da taxa de deformação de 5%, ou até o número máximo de ciclos (10.000). A resposta é obtida pelo ensaio é a curva de ciclo da carga *versus* deformação permanente acumulada (Figura 38). Para o caso das misturas que não atingiram o *Flow Number* antes do final do ensaio, foi considerado o valor da deformação correspondente ao ciclo de número 10.000 na análise dos resultados.

Figura 38 - Gráfico típico da curva de ciclo da carga *versus* deformação permanente acumulada



Fonte: Adaptado de Budny (2012)

Em complementação à curva da deformação plástica acumulada, utilizou-se o modelo de Francken, o qual é uma combinação dos modelos de potência e exponencial. O modelo está expresso na Equação 16, onde, N é o número de ciclos e as constantes A , B , C e D são determinadas para cada amostra ensaiada. A determinação destas constantes se dá por meio de uma otimização numérica através do método dos mínimos quadrados.

$$\varepsilon_p = AN^B + C(e^{DN} - 1) \quad (16)$$

Realizando a otimização numérica através das constantes (A , B , C e D), obtém-se uma curva do ciclo da carga *versus* deformação plástica acumulada semelhante com a obtida através da realização do ensaio.

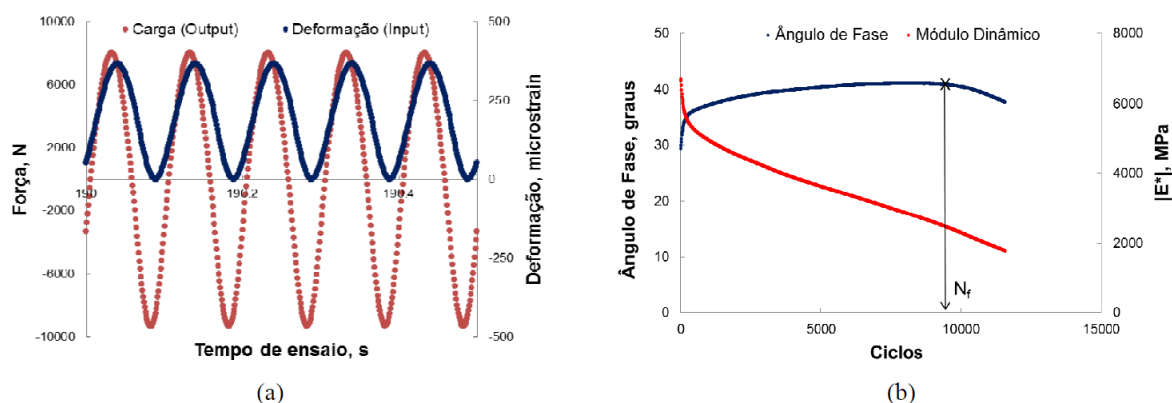
3.4.3.3 Ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico

No Brasil desde a década de 1980, é uma prática muito comum utilizar o ensaio de compressão diametral de carga repetida com tensão controlada para definir as curvas de fadiga em misturas asfálticas com a mesma temperatura e frequência. Por outro lado, em estudos desenvolvidos ao longo de duas décadas por pesquisadores liderados pelo professor Youngsoo Richard Kim, da *North Carolina State University*, nos Estados Unidos, propôs-se uma nova técnica para a determinação da vida de fadiga, onde é possível obter curvas experimentais por tração direta e com interpretação teórica mais consistente (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

O ensaio proposto de fadiga consiste em aplicar no corpo de prova uma amplitude de movimento do atuador (crosshead) constante, até que ocorra a ruptura ou a mudança de

tendência de evolução do ângulo de fase (Figura 39). Na realização do ensaio são coletados e monitorados a deformação, a carga, o ângulo de fase e o módulo dinâmico.

Figura 39 - (a) Exemplo de carregamento do ensaio de fadiga por tração direta: ensaio típico a 20°C com deformação variando de 0 (zero) a 370 microstrains, 10 Hz, ciclos 1900 a 1905; (b) Evolução do ângulo de fase e do módulo dinâmico de um ensaio típico de fadiga por tração direta, ilustrando o ponto onde ocorre a ruptura



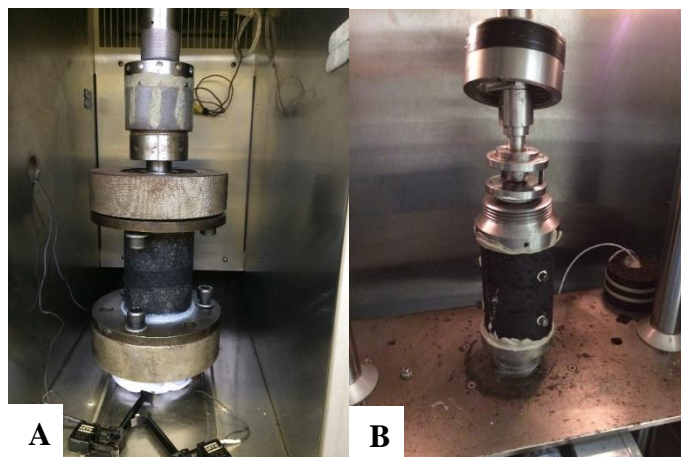
Fonte: Nascimento (2013) *apud* Nascimento *et al* (2014).

O ensaio foi realizado na *Universal Test Machine* (UTM - 25) da IPC Global, na qual tiveram que ser adaptadas peças para que seja realizado o carregamento de tração-compressão. O ensaio segue a norma AASHTO TP 107-14 (*Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*).

Para a confecção das peças, primeiramente foi realizado uma revisão dos principais centros que realizam o ensaio no Brasil. Atualmente, o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (Cenpes), localizado na Cidade Universitária, campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), o Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará (UFC) e o Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) estão realizando o ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico. O Cenpes e a UFRGS utilizam uma prensa hidráulica universal MTS e a UFC utiliza uma UTM (*Universal Test Machine* da IPC Global), as prensas e as peças utilizadas em cada centro estão demonstradas na Figura 40. Mais alguns outros centros estão em processo de implantação, sendo eles, a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ-COPPE), a Universidade de São Paulo (USP).

Em ambos os centros foi realizada uma visita acadêmica para que pudesse haver melhor aprendizado sobre o ensaio, para que fossem realizados os projetos das peças para adaptação e execução do ensaio no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM.

Figura 40 - Aparato para realização do ensaio de fadiga tração direta uniaxial cíclico (a) Sistema CENPES (b) Sistema da UFC



Foram realizados cerca de oito projetos, que contemplam toda a adaptação do ensaio na prensa UTM-25. Os projetos estão disponíveis na íntegra nos apêndices desta tese de doutorado. Os projetos foram realizados utilizando uma junção entre as adaptações dos centros (Cenpes e UFC), ou seja, foi realizada uma adaptação na parte de colagem das peças nos corpos de prova e fixação na prensa das peças utilizadas pelo Cenpes. E para a rotulagem do pistão com a amostra, foi realizada através da adaptação das peças da Universidade Federal do Ceará. A Figura 41 apresenta as peças executadas.

Figura 41 - Sistema de peças para execução do ensaio no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM



(a) Placa cilíndrica de suporte (*top e down*) com a ligação a prensa



(b) Placa cilíndrica de suporte (*top e down*) com a ligação ao sistema de rotulagem

(c) Placa cilindra de colagem (*top e down*) do CP

(d) Copo de ligação da rótula com a base de suporte para rótula



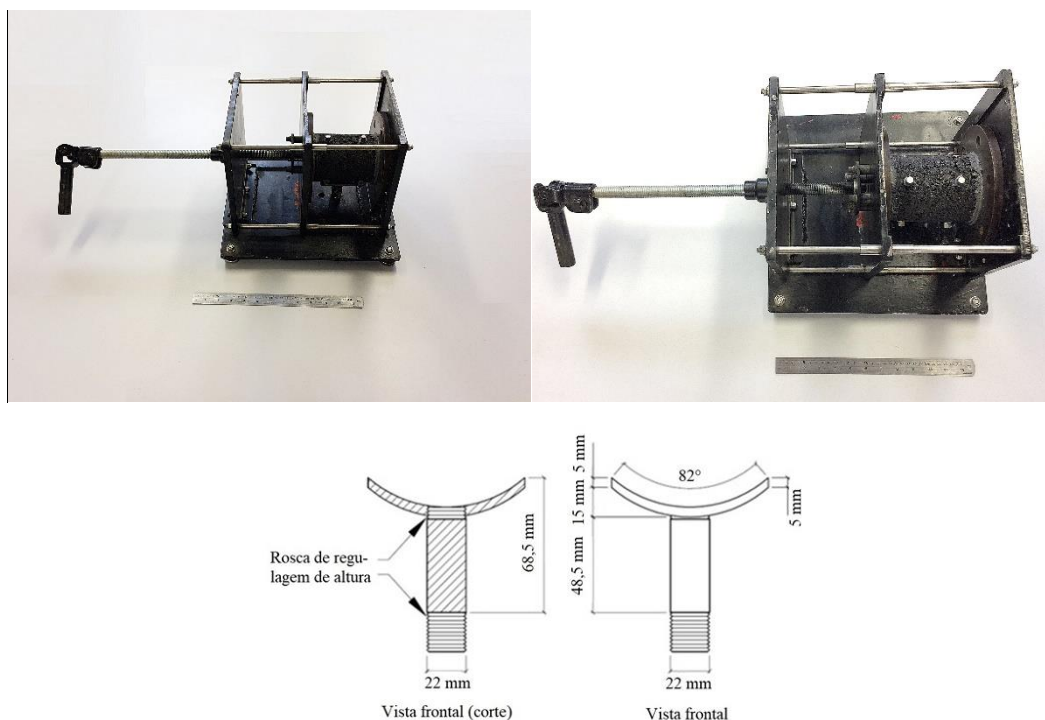
(e) Sistema de rotulagem

As placas de suportes *top-down* são espessas chapas metálicas, dimensionadas com 4cm de espessura e 19cm de diâmetro, e projetadas para resistir aos esforços de tração-compressão aplicados durante o ensaio mecânico. A placa de suporte inferior, na Figura 41a, conecta-se diretamente à mesa da prensa UTM-25, enquanto a placa de suporte superior, na Figura 41b, faz parte da ligação entre o sistema de rotulagem e a amostra a ser ensaiada. Já a Figura 41c expõe as placas de colagem *top-down*, de dimensões 1,2x19cm, que são coladas nas faces superior e inferior dos corpos de prova.

Para que haja vinculação entre o sistema de rotulagem e a amostra já colada às chapas, confeccionou-se o copo de acoplamento da rótula, mostrado na Figura 41d, pois ele engloba todo o sistema de rotulagem e é rosqueado à chapa de suporte superior.

O processo de colagem das placas com o corpo de prova leva cerca de 24 horas (dependendo do tempo de cura da cola utilizada) e, se utilizou de uma cola epóxi com baixa plasticidade e alta resistência. Para a colagem, utilizou-se de um gabarito (Figura 42), para que haja um alinhamento com o eixo das placas (*top e down*) e as amostras. O correto alinhamento do corpo de prova no centro dos pratos é bastante importante para que não se desenvolvam tensões que não de tração.

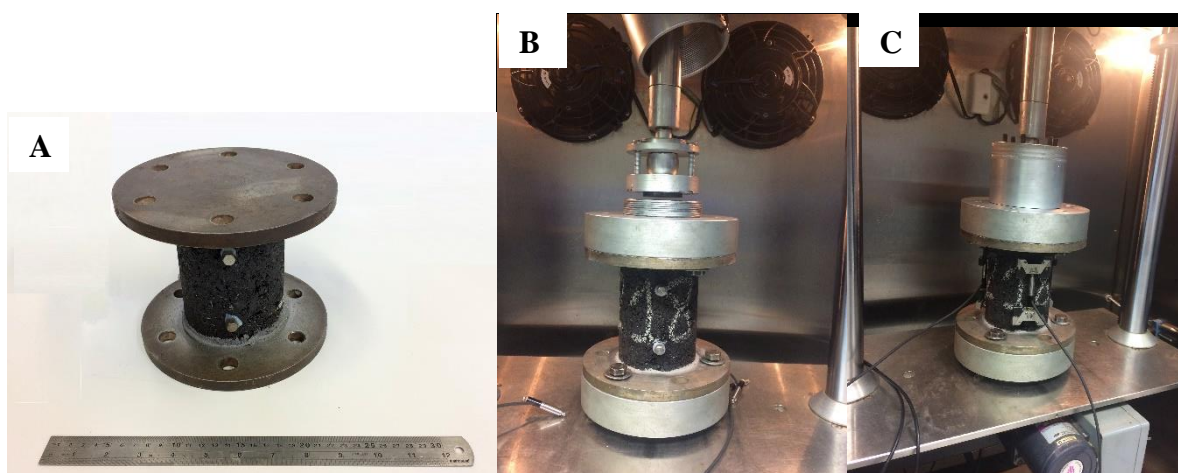
Figura 42 – Sistema de colagem de um corpo de prova típico para ensaio



O sistema para suporte de colagem dos corpos de prova, representado na Figura 42, consiste em uma base metálica retangular que sustenta duas placas fixadas em suas extremidades e uma placa móvel entre elas. Posicionadas perpendicularmente à base, as placas são ligadas por quatro hastes que garantirão o alinhamento das peças no momento da colagem. Para possibilitar a mobilidade do sistema, uma manivela foi fixada à placa móvel. Além disso, criou-se um suporte para os corpos de prova. Esse suporte, também fixado à base do sistema de colagem, sustenta as amostras durante o processo de fixação e, por possuir roscas em suas extremidades, detalhadas na Figura 42, permite que a estrutura seja movida verticalmente no momento da colagem e propicie um melhor alinhamento entre o centro das chapas cilíndricas e a amostra.

Após as amostras serem coladas com as placas *top e down*, são conduzidas e conectadas à UTM-25 utilizando conexões com parafusos (Figura 43).

Figura 43 – Sistema de ensaio de Fadiga por Tração-Compressão Direta (Uniaxial) da UFSM (a) e (b) durante montagem do aparato e (c) apto para realização do teste.



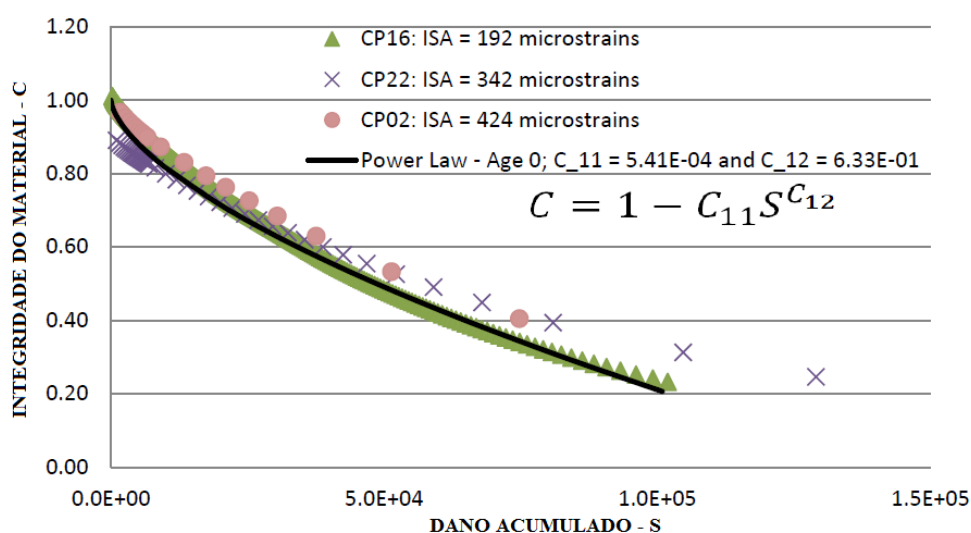
Os ensaios foram conduzidos a uma frequência de 10Hz e temperatura de 19°C em diferentes amplitudes de deformação. A variação da amplitude de deformação foi realizada em quatro níveis, sendo um nível por amostra, buscando que os níveis de deformação fiquem dentro da faixa de ruptura de 1000 ciclos a 100000 ciclos, conforme descreve a norma AASHTO TP 107-14. As amostras foram moldadas no compactador giratório do SUPERPAVE (CGS), nos teores de projeto determinados pela dosagem Marshall e SUPERPAVE, com dimensões de 10x17cm e volume de vazios de $5,5\% \pm 0,5\%$, com a retificação nas superfícies, ficando com dimensões finais de 10x13cm. Retificam-se as superfícies para retirar as pequenas irregularidades na superfície que podem gerar excentricidade, com isso, pode haver diminuição na resistência final do ensaio.

A execução do ensaio consiste em duas fases: primeiramente, aplica-se, utilizando a mesma frequência do ensaio de fadiga, um pequeno carregamento na amostra (provocando deformação de cerca de 50 a 75 μm *on-specimen*, medido a partir dos LVDTs acoplados à amostra) para determinar o módulo complexo (esse ensaio de módulo precedendo o ensaio de fadiga é conhecido como *fingerprint*). É importante frisar que, diferentemente do ensaio de Módulo Complexo completo, este *fingerprint* realizado na tração-compressão, assim como o ensaio de fadiga.

Em seguida, a amostra é submetida a um ensaio de fadiga em que o atuador é programado para chegar a um deslocamento de pico constante em cada ciclo de carga até que se atinja a ruptura. O ensaio consiste em aplicar nos corpos de prova uma deformação cíclica senoidal, de amplitude constante, até que a amostra entre em colapso, ou seja, depois da evolução suficiente de dano por fadiga.

Para cada corpo de prova ensaiado é gerada uma Curva Característica de Dano e, a partir das curvas obtidas com os corpos de prova, são feitos ajustes para representar a Curva Característica de Dano (C versus S) média do material (Figura 44).

Figura 44 - Gráfico típico da Curva Característica de Dano (C versus S)



Fonte: Babadopulos (2014).

Devido ao fato de a relação entre os parâmetros ser única para um dado material, podendo ser considerada como uma propriedade fundamental, esse modelo pode ser utilizado de várias formas, porém duas valem destaque: a possibilidade de obtenção de curvas de fadiga em diferentes condições daquela ensaiada; e, propiciar informações necessárias à análise mecânica do pavimento a partir do dano contínuo viscoelástico.

Utilizaram-se duas formas para analisar e ranquear as misturas após a geração das curvas C versus S , sendo elas: o método clássico e mais utilizado no Brasil, as equações geradas pelas curvas de Wöhler na forma clássica e pelas equações geradas pelas curvas de Wöhler através da equação proposta por Nascimento (2016), demonstrada na Equação 17. A diferença entre as curvas de Wöhler é que a primeira (abordagem clássica) é obtida diretamente dos resultados experimentais, e a segunda leva em consideração todos os parâmetros obtidos através da metodologia S-VECD.

$$Nf = \left(\frac{\delta}{\gamma \left(\frac{C_{12}}{p} \right) + 1} \right)^{\frac{1}{\Delta + 1 - \left(\frac{C_{12}}{p} \right)}} \quad (17)$$

Sendo:

$$\delta = \frac{1}{2} (\varepsilon^R_{TA})^2 C_{11} \left(\frac{(p(C_{11}C_{12})^\alpha (\varepsilon^R_{TA})^{2\alpha})}{f_R^{2\alpha}} \right)^{\left(\frac{C_{12}}{p}\right)} \quad (18)$$

$$\varepsilon^R_{TA} = \frac{1}{E_R} \frac{\beta+1}{2} \left((\varepsilon_{0,pp})_i |E^*|_{LVE} \right) \quad (19)$$

$$p = \alpha - \alpha C_{12} + 1 \quad (20)$$

Onde:

ε^R_{TA} = amplitude da pseudo-deformação;

α = taxa de evolução do dano;

C_{11} e C_{12} = coeficientes da curva CxS média das amostras;

f_R = frequência reduzida;

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

N_f = número de ciclos até a falha;

Y = coeficientes do critério de ruptura Gr versus N_f ;

Δ = expoente da equação Y ;

$C(S)$ = integridade do material ou a pseudo-rigidez;

S = parâmetro de dano;

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

β = parcela do ciclo em que ocorre tensão de tração (o valor usual é -0,08 e significa que ocorre compressão em 8% do ciclo);

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

A equação é um procedimento para estimar a vida de fadiga (N_f) de misturas asfálticas, pois em sua formulação leva em conta muito parâmetros gerados por essa nova metodologia (S-VECD), dessa forma, gera um N_f mais condizente com o comportamento da mistura durante o ensaio. Além disso, o N_f calculado corresponde a um histórico de deformação controladas com amplitude contante.

Para que fosse possível ranquear as misturas pelos dois métodos, fez-se uso primeiramente de uma análise mecanicista, no qual todas as misturas foram simuladas com auxílio do *software* AEMC-Sispav na versão 2.0.1.1 (aplicativo de análise elástica para estruturas de múltiplas camadas), para a obtenção de valores de deformação específica de tração (ε_t) na fibra inferior do revestimento, sendo este localizado a 1mm acima da próxima camada.

Utilizaram-se de três estruturas típicas, variando a espessura da camada de revestimento e o módulo dinâmico de cada uma das misturas utilizadas neste trabalho, conforme demonstra a Figura 45. Considerou-se que as camadas da estrutura não são aderidas entre si, e um eixo duplo de carga igual a 8.200Kgf, com distância entre as rodas de 0,324m, pressão de inflação dos pneus igual 0,56MPa e carregamento distribuído sobre uma área circular.

Figura 45 – Estruturas típicas dos dados de entrada no AEMC-Sispav

	ESPESSURAS (cm)	MÓDULOS (MPa)	μ
REVESTIMENTO	5, 10 e 15	E* de cada mistura	0,35
BASE	15	202	0,30
SUB-BASE	20	197	0,40
SUBLEITO	0	84	0,45

Os valores de Módulo de Resiliência (MR) das camadas de base e sub-base foram adotados a partir dos resultados encontrados por Ribas (2014) e o valor de MR do subleito adotado foi encontrado por Santos (2016) para solos da região central do Rio Grande do Sul. Os coeficientes de Poisson foram adotados de acordo com os valores sugeridos por Balbo (2007).

Utilizou-se o Módulo Dinâmico para a camada de revestimento, pois entende-se que um ensaio que leve em consideração os efeitos viscoelásticos em sua formulação se torna imprescindível na correta caracterização de misturas asfálticas e na consequente obtenção das tensões e deformações, necessárias ao dimensionamento de estruturas de pavimentos por métodos mecanísticos. Estes foram obtidos a 19°C e 10Hz através do modelo 2S2P1D realizado no ensaio de Módulo Complexo descrito anteriormente. Escolharam-se estes valores a essa temperatura e frequência, pois são as mesmas executadas no ensaio de Fadiga a Tração Direta Uniaxial Cíclico, e são as mesmas que a equação do Nascimento (2016) utiliza. Os valores de Módulo Dinâmico utilizado estão apresentados na Tabela 15.

Com as deformações específicas de tração (ϵ_t) calcularam-se os NF's (vida de fadiga), tanto pelas equações geradas pelas curvas de Wölher quanto pela equação de Nascimento (2016).

Tabela 15 – Valores de Módulo Dinâmico das misturas

MISTURAS	E* @19°C 10Hz (MPa)	MISTURAS	E* @19°C 10Hz (MPa)
S CON FX B 50/70	17364	M CON FX B 50/70	13833
S BAI FX B 50/70	17369	M BAI FX B 50/70	16222
S CON FX C 50/70	14298	M CON FX C 50/70	14966
S BAI FX C 50/70	16375	M BAI FX C 50/70	17149
S CON FX B 60/85	16373	M CON FX B 60/85	15210
S BAI FX B 60/85	16016	M BAI FX B 60/85	17125
S CON FX C 60/85	15243	M CON FX C 60/85	16435
S BAI FX C 60/85	18229	M BAI FX C 60/85	18275
S CON FX B HIMA	13505	M CON FX B HIMA	11224
S BAI FX B HIMA	13839	M BAI FX B HIMA	12101
S CON FX C HIMA	13160	M CON FX C HIMA	13885
S BAI FX C HIMA	12418	M BAI FX C HIMA	11037

3.4.3.3.1 Problemas de execução do ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico

Neste item são apresentados alguns problemas enfrentados nas primeiras execuções do ensaio. Julga-se necessário apresentá-las para que possíveis projetos novos não enfrentem tais problemas, que foram superados com a evolução da experiência na execução do ensaio.

No item 3.4.3.3, que apresenta como foi planejado e executado o ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico, observa-se que as placas cilíndricas de colagem (*top e down*) do CP, apresentadas na Figura 41, não apresentam ranhuras. Projetou-se sem ranhuras para facilitar a limpeza das chapas após a colagem, pensou-se assim devido à elevada aderência/resistência da cola, e que não haveriam problemas de aderência entre o CP e as placas. Porém conforme pode ser visto na Figura 46, aconteceram problemas de aderência da cola epóxi com a superfície lisa das placas.

Como as peças já estavam usinadas, e para que não precisasse voltar ao torno para a realização de ranhuras nas placas, utilizou-se uma lixa para metais número 36 (Lixa grossa que tem grande capacidade de ranhuras no material) para criação das ranhuras necessárias para aumento da aderência entre a placa e o CP. Este método consistiu em lixar toda a área de colagem da placa, estando ela totalmente limpa e seca, e, após o processo de lixamento, com ajuda de uma flanela fez-se novamente a limpeza do material, então realizou-se o processo de colagem.

Figura 46 - Problemas de aderência entre as placas de colagem e os corpos de prova



A metodologia de simplesmente lixar as placas para a criação de ranhuras se mostrou muito eficiente, pois além de aumentar a aderência, a mesma permaneceu de fácil limpeza após o uso, pelo fato de as ranhuras não serem profundas a ponto de armazenar restos de cola epóxi após o uso.

Como a execução do ensaio é realizada até o colapso da amostra, espera-se que a formação das trincas e por consequência a sua falha aconteça na região central da amostra, entre as distâncias de leitura dos LVDT's. Este fato se torna importante para que a falha representada pelo ângulo de fase (Figura 39) seja clara e, assim, de fácil determinação do número de ciclos até o colapso.

De certa forma, se o material ensaiado é perfeitamente homogêneo e as placas de colagem e a amostra estão perfeitamente alinhadas, a tensão em uma seção transversal perpendicular ao eixo da amostra é de pura compressão ou tração. Porém, como as misturas asfálticas não são homogêneas, e isto se dá, principalmente, pelo processo de compactação, os vazios de ar não se distribuem uniformemente ao longo da amostra, sendo ainda, mais agravante com a utilização de misturas com maior quantidade de agregados graúdos e baixos teores de ligante asfáltico (BABADOPULOS, 2014).

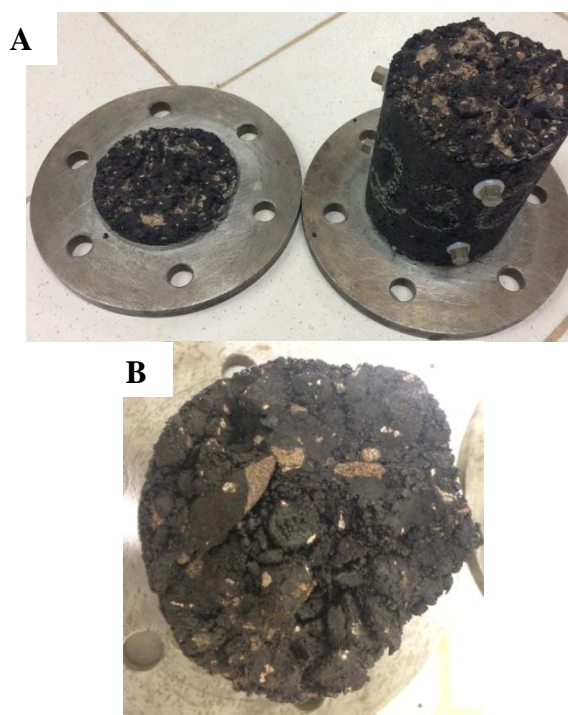
Este problema de rompimento da amostra fora da área de leitura dos LVDT's aconteceu para algumas misturas executadas nesta pesquisa. Conforme pode ser visualizado na Tabela 16, que demonstra de forma numérica a quantidade de amostras executadas para o ensaio de cada mistura utilizada e a quantidade de amostras que romperam fora da área de leitura.

Tabela 16 – Quantidade de amostras ensaiadas versus quantidade de amostras com o rompimento fora da leitura dos LVDT's

Misturas	Quantidade	Amostras que	Misturas	Quantidade	Amostras que
	de Amostra	romperam		de Amostra	romperam
	Ensaaiadas	fora		Ensaaiadas	fora
S CON FX B 50/70	4	0	M CON FX B 50/70	4	0
S BAI FX B 50/70	6	2	M BAI FX B 50/70	4	0
S CON FX C 50/70	4	0	M CON FX C 50/70	4	0
S BAI FX C 50/70	5	1	M BAI FX C 50/70	4	0
S CON FX B 60/85	5	2	M CON FX B 60/85	5	2
S BAI FX B 60/85	6	3	M BAI FX B 60/85	6	3
S CON FX C 60/85	6	3	M CON FX C 60/85	4	0
S BAI FX C 60/85	6	2	M BAI FX C 60/85	4	0
S CON FX B HIMA	6	3	M CON FX B HIMA	4	0
S BAI FX B HIMA	5	1	M BAI FX B HIMA	4	0
S CON FX C HIMA	6	3	M CON FX C HIMA	4	0
S BAI FX C HIMA	4	1	M BAI FX C HIMA	4	0

Nota-se que os maiores problemas foram com as misturas asfálticas dosadas através da metodologia SUPERPAVE, que por consequência do método de amassamento para a compactação das amostras, gera misturas com menor teor de ligante quando comparadas com as misturas dosadas pela metodologia Marshall, e tornando-se misturas mais rígidas. Na Figura 47 está demonstrado um exemplo das misturas asfálticas dosadas pelo SUPERPAVE que obtiveram o seu rompimento fora da área de leitura dos LVDT's.

Figura 47 – Exemplo de amostras com rompimento fora das leituras dos LVDT's



As seções em que as amostras romperam foi aleatória, ou seja, algumas vezes na parte superior e outras na parte inferior das amostras, não havendo uma tendência. Para a colagem das placas nas amostras procurou-se sempre deixar a amostra na mesma posição em que foi compactada.

Conforme pode ser visto na Figura 47, a seção de ruptura das amostras apresenta uma elevada quantidade de agregados graúdos, que, por consequência, apresenta um maior de volume de vazios que o restante da amostra, tornando assim a seção mais frágil que o restante da amostra. Percebe-se ainda, que as amostras se apresentam, visualmente, com quantidade de ligante asfáltico pequena (nas seções onde houve a ruptura da amostra), o que pode acarretar, em campo, um trincamento precoce destas misturas. A avaliação do fenômeno de fadiga é melhor descrito, apresentado no capítulo a seguir.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados e discutidos os resultados obtidos na parte experimental da pesquisa. No primeiro momento, apresentam-se os parâmetros obtidos através dos processos de dosagens (SUPERPAVE e Marshall), entre eles: o volume de vazios, o volume de vazios dos agregados minerais (VAM), a relação betume/vazios (RBV) e todos os teores de projeto obtidos. Em seguida estão as análises dos ensaios realizados, tais como: os ensaios para avaliar a deformabilidade (Módulo de Resiliência e Módulo Complexo), e, os ensaios para avaliar a resistência (Resistência à Tração por Compressão Diametral, Creep Dinâmico (*Flow Number*) e a Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclicos.

Para análise, foram incluídos os resultados apresentados por Almeida Jr (2016), com ligante convencional e AMP 60/85, com exceção do ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclicos, que foram realizadas todas nesta pesquisa. Procuro-se utilizar os dados apresentados pelo autor para fins de comparação do comportamento das misturas com os resultados obtidos com as misturas com ligante altamente modificado (HIMA), avançando e aprofundando as discussões, além de incluir diferentes dados de caracterização dos componentes e da abordagem FAD.

4.1 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS UTILIZADAS

A dosagem de misturas asfálticas se baseia em certos limites para: volume de vazios, de modo a garantir que não ocorra oxidação da massa asfáltica pela ação da água e/ou ar, e que não ocorra exsudação; relação betume vazios, garantindo que exista betume suficiente para unir os agregados e que não exsude. O objetivo dos métodos consiste em determinar-se o teor de ligante de projeto que deverá ser adicionado à mistura de agregados (que respeitem a faixa granulométrica pré-fixada), a fim de que sejam satisfeitas as condições, conforme prescrito na Especificação de Serviço.

Elaboraram-se curvas de resultados de cálculos e medidas feitas durante as dosagens (Marshall e SUPERPAVE) para obtenção dos principais parâmetros de dosagem, conforme Tabela 17. O teor de ligante de projeto apresentado é correspondente a um volume de vazios de 4% nas amostras.

Primeiramente verifica-se que todas as misturas Marshall apresentaram teor de ligante superior às misturas SUPERPAVE, no qual o menor aumento no teor foi de 0,4% e o maior de

1,2%. Destaca-se que os teores de ligante obtidos na dosagem SUPERPAVE não atendem ao teor mínimo requerido de 4,5% para camada de rolamento da norma DNIT 031 (2006).

Esta diferença no teor, entre as dosagens é justificada pois o Compactador Giratório SUPERPAVE (CGS) utiliza energia de compactação por amassamento, e que é superior que a por impacto da Metodologia Marshall. Assim, misturas com mesma granulometria necessitam de menor teor de ligante para atingir o mesmo volume de vazios. Os parâmetros volumétricos (VAM e RBV) foram atendidos para misturas dosadas pelo SUPERPAVE, mesmo com teores de ligante baixos. Encontraram-se valores mais baixos de VAM para misturas Bailey, quando comparadas com misturas Convencionais, mesma tendência encontrada por Mendes (2011).

Tabela 17 – Parâmetros volumétricos obtidos nas dosagens

Mistura	Teor de Projeto (%)	VAM (%)	RBV (%)	CDI	TDI
S CON FX B 50/70	3,70	14,00	71,00	32	470
S BAI FX B 50/70	3,65	13,50	70,00	50	480
S CON FX C 50/70	4,00	14,80	72,50	70	570
S BAI FX C 50/70	4,00	14,80	74,00	60	575
S CON FX B 60/85	3,90	14,20	73,00	100	550
S BAI FX B 60/85	3,75	13,80	71,00	75	575
S CON FX C 60/85	4,12	15,20	74,00	95	550
S BAI FX C 60/85	3,92	14,30	73,00	50	575
S CON FX B HIMA	3,90	14,91	71,55	110	473
S BAI FX B HIMA	3,80	14,33	71,08	92	510
S CON FX C HIMA	4,10	15,26	74,19	72	535
S BAI FX C HIMA	4,20	14,68	74,09	67	533
M CON FX B 50/70	4,25	15,50	74,00	-	-
M BAI FX B 50/70	4,25	15,10	73,00	-	-
M CON FX C 50/70	4,50	16,10	75,00	-	-
M BAI FX C 50/70	4,40	15,60	75,00	-	-
M CON FX B 60/85	4,60	16,00	74,50	-	-
M BAI FX B 60/85	4,50	15,40	74,00	-	-
M CON FX C 60/85	4,70	16,30	75,00	-	-
M BAI FX C 60/85	4,50	15,80	75,00	-	-
M CON FX B HIMA	5,00	16,73	75,21	-	-
M BAI FX B HIMA	5,00	16,17	75,66	-	-
M CON FX C HIMA	4,80	16,67	76,40	-	-
M BAI FX C HIMA	4,60	16,84	76,98	-	-

Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

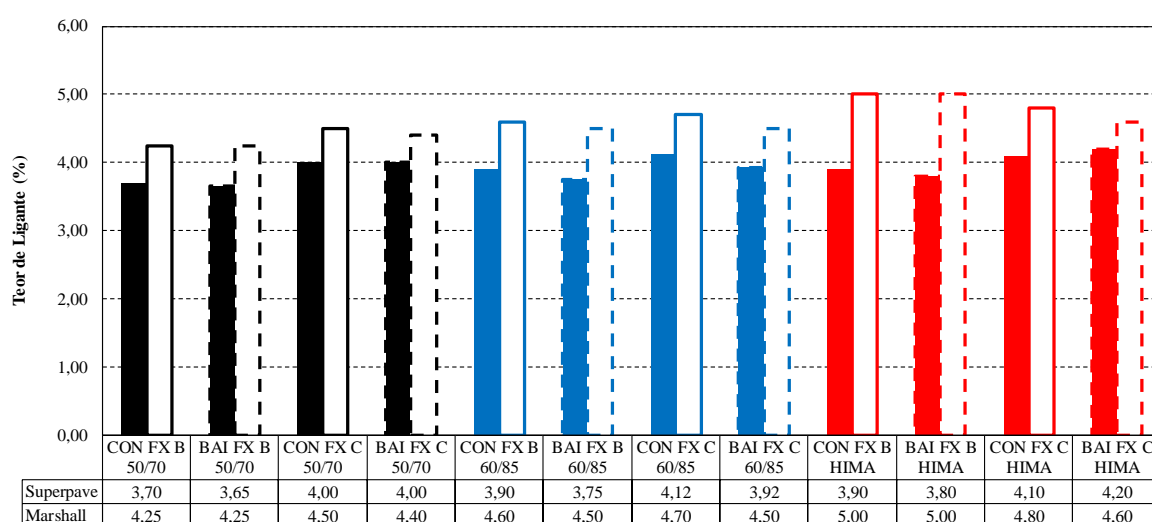
Conforme a Figura 48, percebe-se um aumento do teor de ligante nas misturas com Faixa C, quando comparadas com as misturas de Faixa B, considerando o mesmo ligante

asfáltico utilizado e método de dosagem. Este comportamento não foi observado para as misturas M CON FX C HIMA e M BAI FX C HIMA, nas quais houve uma redução do teor de ligante em média de 6%.

Ainda em relação às faixas granulométricas, as misturas dosadas com o método SUPERPAVE, o aumento do teor de ligante ficou em média de 8,84% para as misturas com ligante 50/70, média de 5,10% para misturas com ligante 60/85 e uma média de 7,79% para as misturas com ligante HIMA. Já para as misturas dosadas com a metodologia Marshall, o aumento ficou em média 4,71% para as misturas com ligante 50/70 e 1,10% para as misturas com ligante 60/85.

A diferença de teor de ligante entre as faixas granulométricas pode ser justificada pelo fato que as granulometrias enquadradas na Faixa C apresentam superfície específica dos agregados maior que granulometrias enquadradas na Faixa B. Assim, a quantidade de ligante asfáltico necessária para envolver os agregados é maior.

Figura 48 – Teor de Ligante de projeto encontrado com as dosagens



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

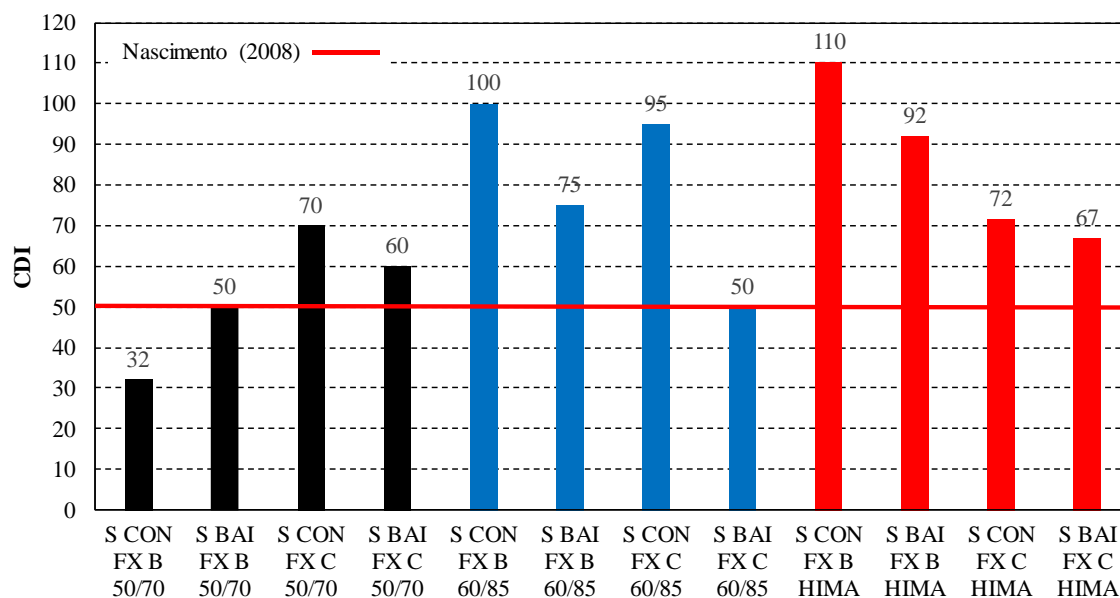
Em relação ao tipo de ligante utilizado, verifica-se que houve aumento no teor de ligante conforme a modificação do ligante. Para a metodologia Marshall, que teve os maiores valores, em relação ao ligante convencional (50/70), os aumentos de teor de ligante foram de 5,17% (AMP 60/85) e 11,49% (HIMA). Para a metodologia SUPERPAVE, os ligantes AMP 60/85 e HIMA tiveram um aumento de 2,21% e 4,23%, respectivamente, em comparação ao ligante convencional.

Através da dosagem SUPERPAVE é possível a retirada de alguns parâmetros ou requisitos relacionados com a trabalhabilidade das misturas e ligados ao desempenho, são eles: o *Compaction Densification Index* (CDI) e o *Traffic Densification Index* (TDI), ambos gerados através da curva do compactador giratório (número de giros *versus* %Gmm).

O CDI é definido como a área sob a curva de densificação obtida com CGS, e o índice se refere ao trabalho aplicado pela vibro acabadora ou pelos rolos para compactar a mistura na densidade requerida. Por outro lado, o TDI representa a quantidade de esforços requerida para densificar a mistura entre 92% e 98% do Gmm, este índice se justifica pelo fato da mistura continuar a se densificar sob a ação do tráfego (MARQUES *et. al*, 2009; NASCIMENTO, 2008). Estes parâmetros têm o objetivo de auxiliar na escolha das misturas que sejam suficientemente trabalháveis durante a construção do revestimento, e suficientemente resistentes à densificação sob ação do tráfego.

Os parâmetros demonstrados nas Figuras 49 e 50 representam a média dos valores de cada corpo de prova moldado para cada mistura.

Figura 49 – Valores de CDI encontrados com a dosagem SUPERPAVE



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

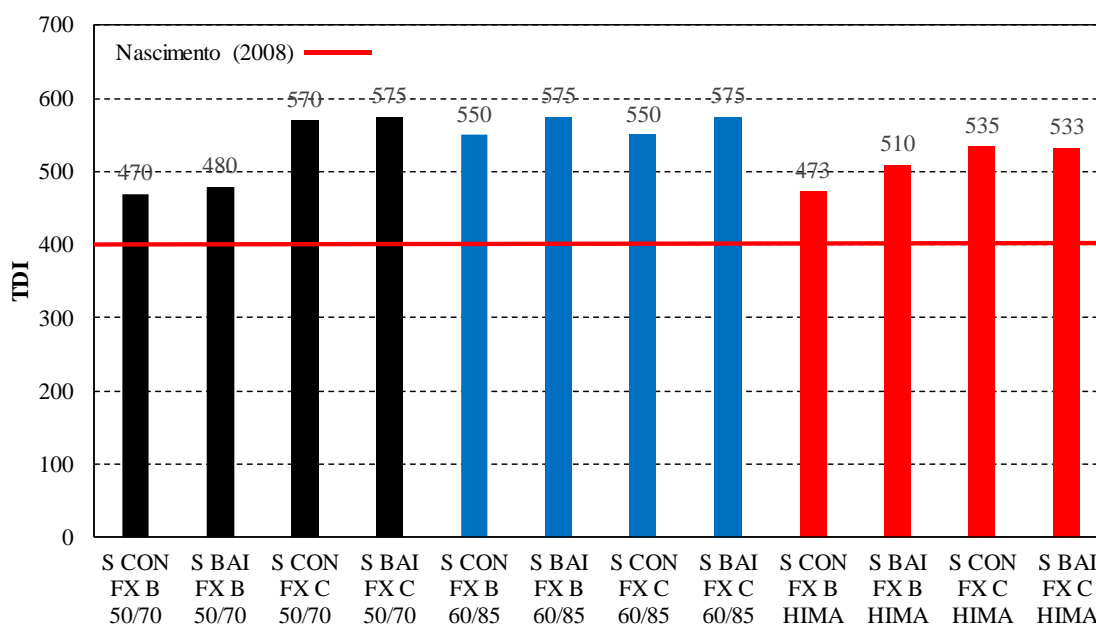
Misturas com valor mínimo de CDI igual a 50 são consideradas ideais, tanto para tráfego médio como pesado, e tem melhor compactabilidade, enquanto misturas abaixo desse valor tem problemas de estabilidade e devem ser evitadas (NASCIMENTO, 2008). Em contrapartida, Bahia e Faheem (2007) estabeleceram para tráfego médio a pesado o valor de CDI igual a 300.

Porém vale ressaltar que os critérios estabelecidos por esses autores não foram validados em campo, logo podem não representar a realidade para o cenário brasileiro.

Conforme a Figura 49, verifica-se que apenas a mistura S CON FX B 50/70, obteve valor de CDI abaixo do limite proposto por Nascimento (2008). Já as misturas S BAI FX B 50/70 e S BAI FX C 60/85 ficaram com o valor no limite proposto pelo autor. Percebe-se que a substituição do ligante convencional (CAP 50/70) para ligantes modificados provoca um aumento no valor CDI. Ainda, as misturas com ligantes modificados obtiveram melhores valores para Flow Number (será demonstrado adiante neste capítulo), evidenciando que são misturas sem problemas de estabilidade, com comportamento adequado quanto à deformação permanente.

Em relação ao TDI, Nascimento (2008) ressalta que valores para tráfego médio e pesado devem ser maiores que 250 e 400, respectivamente. Já Bahia e Faheem (2007), estipulam para tráfego leve, médio e pesado, valores de TDI maiores que 400, 800 e 1220, respectivamente. A Figura 50 mostra os valores de TDI encontrados para as misturas estudadas.

Figura 50 – Valores de TDI encontrados com a dosagem SUPERPAVE



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Percebe-se que todas as misturas ficaram acima do limite proposto por Nascimento (2008) para tráfego pesado. Em contrapartida, para os limites propostos por Bahia e Faheem (2007), as misturas estão acima apenas do limite proposto para tráfego leve. Nota-se ainda, que

houve uma pequena melhora no TDI para as misturas com Bailey, com exceção da mistura S BAI FX C HIMA, que quando comparada com a mistura convencional apresentou diminuição do TDI.

4.1.1 Metodologia Faixa de Agregados Dominantes (FAD)

O método FAD é focado apenas na granulometria das misturas asfálticas, mas, sabe-se que outras propriedades dos agregados também são importantes para um bom desempenho em campo. O FAD, acaba por ser uma característica da curva granulométrica, e consiste em tamanhos de agregados diferentes, interagindo entre si para formar um esqueleto pétreo resistente. Esta metodologia está diretamente relacionada à deformação permanente (FERREIRA, 2015).

A Tabela 18 apresenta resultados relacionados ao FAD e à porosidade das misturas. Para todas as misturas, o valor de porosidade é menor que 48, indicando que os tamanhos de agregados que compõem a FAD das misturas formam um esqueleto mineral resistente à deformação permanente.

Tabela 18 – Porosidade FAD e Faixa de Agregado Dominante das misturas

Misturas	Porosidade FAD (%)	FAD	Misturas	Porosidade FAD (%)	FAD
S CON FX B 50/70	42,2	4,75-1,18	M CON FX B 50/70	43,3	4,75-1,18
S BAI FX B 50/70	45,1	4,75-1,18	M BAI FX B 50/70	45,1	4,75-1,18
S CON FX C 50/70	42,4	4,75-1,18	M CON FX C 50/70	43,4	4,75-1,18
S BAI FX C 50/70	35,3	12,5-1,18	M BAI FX C 50/70	35,8	12,5-1,18
S CON FX B 60/85	42,3	4,75-1,18	M CON FX B 60/85	43,6	4,75-1,18
S BAI FX B 60/85	45,3	4,75-1,18	M BAI FX B 60/85	46,8	4,75-1,18
S CON FX C 60/85	42,9	4,75-1,18	M CON FX C 60/85	43,8	4,75-1,18
S BAI FX C 60/85	34,9	12,5-1,18	M BAI FX C 60/85	36	12,5-1,18
S CON FX B HIMA	42,7	4,75-1,18	M CON FX B HIMA	44,4	4,75-1,18
S BAI FX B HIMA	45,8	4,75-1,18	M BAI FX B HIMA	47,6	4,75-1,18
S CON FX C HIMA	43	4,75-1,18	M CON FX C HIMA	44,1	4,75-1,18
S BAI FX C HIMA	35,2	12,5-1,18	M BAI FX C HIMA	36,9	12,5-1,18

Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Kim (2006) considera que somente as partículas maiores que 1,18mm são responsáveis por proporcionar resistência à deformação permanente e que porosidades inferiores a 50%

apresentam maior resistência ao mesmo mecanismo. 0 Em contrapartida, Greene *et al.* (2014) demonstram que para haver um bom intertravamento na granulometria e boa resistência à deformação permanente, a porosidade FAD deve apresentar valores entre 38% e 48%.

Além disso, todas as misturas com granulometria Faixa B apresentam uma FAD de 4,75mm a 1,18mm (interação de 3 peneiras), e por apresentarem porosidade menor que 48, o método indica que esses tamanhos de agregados interagindo entre si formam um esqueleto mineral resistente à deformação permanente. Nas granulometrias Faixas C, as misturas convencionais (CON) apresentam a mesma FAD das misturas com granulometria Faixa B, entretanto as misturas Bailey (BAI) apresentam uma FAD maior, de 12,5mm a 1,18mm (interação de 5 peneiras), indicando que esta granulometria tem agregados maiores formando o esqueleto mineral, reforçando que o método Bailey ajusta o esqueleto mineral para apresentar intertravamento adequado. Maiores detalhes, como correlações para comprovação do método estão disponíveis no item sobre o ensaio de Creep Dinâmico (*Flow Number*).

4.2 PROPRIEDADES DE DEFORMABILIDADE

Dentre os principais defeitos que os pavimentos apresentam, o trincamento por fadiga e o afundamento de trilha de roda estão geralmente relacionados à deformabilidade do concreto asfáltico. Existem muitas maneiras de determinar a deformabilidade do concreto asfáltico, tanto em campo (retroanálises e medições indiretas *in situ*), como em laboratório, com amostras.

No Brasil, a metodologia mais utilizada é o ensaio de Módulo de Resiliência (MR), sendo o objetivo do ensaio, determinar a capacidade que um corpo elástico tem de armazenar energia, quando solicitado por um carregamento e, após interrupção, retornar ao seu estado inicial. O ensaio é realizado, geralmente, em apenas uma temperatura e uma frequência, porém, devido ao comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos, a resposta do concreto asfáltico (CA) não é a mesma para diferentes frequências de carregamento e, principalmente, resulta em diferenças de rigidez quando variada a amplitude de temperatura.

Dessa forma, é fundamental considerar a viscoelasticidade dos concretos asfálticos, bem como o efeito de diferentes temperaturas e frequências de carregamento. Para isso, um ensaio que vem sendo utilizado é o Módulo Complexo (E^*), pode ser utilizado para determinação tanto de características elásticas quanto viscoelásticas dos materiais.

Nesta pesquisa foram utilizados, o ensaio Módulo de Resiliência, com variação de temperatura e frequência, e o ensaio de Módulo Complexo.

4.2.1 Ensaio de Módulo de Resiliência

Para realização do ensaio, utilizou-se a norma DNIT-ME 135/2010 para seguir as prescrições, porém mudou-se os tempos de carregamento e as temperaturas de execução do ensaio. A ordem de execução deu-se das menores para as maiores temperaturas e das maiores para as menores frequências. O resultado médio de três corpos de prova por mistura, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação estão apresentados na Tabela 19.

O MR em misturas asfálticas é influenciado por diversas variáveis, entre elas faixa granulométrica e o tipo de ligante asfáltico. Ainda, é influenciado pelas variáveis ambientais, como temperatura, umidade e qualquer outro fator que altere as propriedades do material durante a vida de serviço. A temperatura é um dos fatores mais importantes, pois sua variação pode afetar estrutural e funcionalmente um pavimento, de modo que temperaturas baixas podem acelerar processos de trincamento e temperaturas altas podem acelerar os problemas de deformação plástica.

O efeito da temperatura na rigidez das misturas asfálticas pode ser comprovado nos resultados da Tabela 19, todas as misturas apresentam grande redução nos valores de MR quando comparadas as temperaturas de 10°C e 35°C. Considerando o tempo de carregamento de 0,2s e temperatura de 10°C, a mistura de maior MR (M BAI FX C 60-85) teve redução de 381,20%, já o menor valor de MR nas mesmas condições (M BAI FX B HIMA) apresentou redução da rigidez de 227,29%. Outros estudos (Specht (2004), Brito *et al* (2008), Bruxel (2015) e Rossato (2015)) encontraram comportamentos semelhantes para valores de MR a diferentes temperaturas com outros tipos de misturas asfálticas, demonstrando assim, o comportamento termo suscetível das misturas asfálticas.

Tabela 19 - Resultados de Módulo de Resiliência para todas as misturas

MISTURAS	10 °C									25 °C									35 °C								
	25 Hz			10 Hz			5 Hz			25 Hz			10 Hz			5 Hz			25 Hz			10 Hz			5 Hz		
	MR (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	MR (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	MR (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	MR (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	MR (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	MR (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	MR (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	MR (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	MR (MPa)	SD (MPa)	CV (%)
S CON FX B 50/70	15932	771,16	4,85	15083	725,26	4,67	14216	814,57	5,69	10913	360,35	3,30	9366	224,74	2,40	7976	203,40	2,51	4970	516,47	9,12	3394	173,79	5,12	2570	108,87	4,31
S BAI FX B 50/70	17881	1357,96	7,80	16462	1153,78	7,06	15454	702,29	4,56	11005	433,19	3,92	9496	315,30	3,31	8056	278,05	3,47	4888	484,00	9,80	3128	219,82	7,01	2307	124,46	4,98
S CON FX C 50/70	16479	1102,11	6,78	15528	665,34	6,13	14452	992,97	6,48	9884	338,45	3,41	8658	332,47	3,86	7284	242,04	3,32	3478	226,70	6,44	2348	86,63	3,71	1780	73,62	4,21
S BAI FX C 50/70	17540	1311,88	7,51	15961	1141,80	6,48	14656	895,06	6,12	10014	445,29	4,26	9001	337,37	3,74	7825	278,56	3,60	4702	377,85	8,72	2794	294,49	4,72	2098	91,61	4,27
S CON FX B 60/85	17784	1178,93	6,65	16288	869,85	5,36	15251	751,02	4,96	12225	436,20	3,58	10700	411,48	3,87	9266	264,64	2,85	5046	310,84	6,26	3603	156,73	5,01	2945	95,85	3,25
S BAI FX B 60/85	18261	1336,11	7,34	16636	1206,81	7,30	15587	922,52	5,91	12824	584,70	4,59	10946	382,60	3,47	9762	258,54	2,45	5124	286,69	5,89	3711	183,11	4,94	3066	134,45	4,38
S CON FX C 60/85	16255	1247,77	7,68	15328	994,30	6,45	14316	922,04	6,43	11400	429,14	3,71	9968	252,47	2,52	8707	278,33	3,15	5132	253,99	4,90	3759	174,75	4,89	3110	87,75	2,85
S BAI FX C 60/85	17628	1211,60	6,78	16112	908,21	5,68	14904	586,24	4,11	12124	528,34	4,30	10618	388,55	3,71	9139	211,13	2,39	5811	321,31	5,46	4222	234,20	5,56	3317	164,89	4,89
S CON FX B HIMA	18229	807,49	4,46	17219	674,68	3,88	15988	613,02	3,71	11680	565,09	4,69	10868	405,80	3,64	9218	597,06	6,27	6083	477,02	7,96	4777	280,67	5,76	4028	156,78	4,25
S BAI FX B HIMA	16763	743,62	4,49	15945	592,48	3,69	14133	556,06	3,86	11547	804,89	7,18	10526	490,17	4,52	9187	403,31	4,53	5320	322,06	6,14	4171	140,47	3,42	3354	178,68	5,26
S CON FX C HIMA	15117	500,72	3,27	14631	773,21	5,25	13223	580,46	4,43	9932	658,31	6,66	8511	445,17	5,37	7148	324,85	4,66	4279	325,50	7,45	3275	178,49	5,38	2718	88,13	3,16
S BAI FX C HIMA	14842	1063,84	7,17	14148	758,23	5,47	13005	792,32	6,16	12166	670,98	5,63	10849	566,08	5,28	9735	608,33	6,28	5168	348,00	6,88	4465	210,05	4,44	3823	121,25	3,15
M CON FX B 50/70	18068	1074,23	5,94	17048	1002,36	5,91	15842	1005,18	6,46	8957	328,00	3,67	7722	320,58	4,17	6850	271,67	3,96	3312	195,81	5,88	2269	79,66	3,56	1694	72,90	3,86
M BAI FX B 50/70	18503	1265,40	6,94	17491	1035,22	5,90	16056	1081,76	6,73	9146	418,99	4,65	8214	400,92	4,71	7111	304,32	4,29	2734	147,21	5,14	1859	69,69	3,79	1437	54,23	3,75
M CON FX C 50/70	17686	1151,60	6,59	16865	1119,09	6,66	15564	1035,16	6,60	8794	341,20	3,89	7570	300,11	4,00	6418	284,51	4,43	3040	171,63	5,69	2198	96,80	4,42	1638	64,49	3,84
M BAI FX C 50/70	18368	1031,89	5,66	17231	1012,12	5,99	16057	858,89	6,49	8782	355,91	4,05	7541	287,83	3,80	6455	238,80	3,76	3454	248,42	7,11	2311	94,11	4,00	1743	76,95	4,36
M CON FX B 60/85	17231	1399,53	8,16	15855	875,66	6,79	14683	1025,30	7,17	9212	454,62	4,88	8242	326,88	3,93	7210	217,77	2,97	3564	143,60	4,06	2562	70,27	2,68	2056	60,54	2,91
M BAI FX B 60/85	18570	1029,24	5,52	17535	1185,72	6,77	16146	941,67	5,82	9430	410,82	4,32	8278	310,05	3,70	7326	247,95	3,34	3521	123,53	3,83	2372	52,13	2,66	1858	57,48	3,08
M CON FX C 60/85	18009	1222,36	6,79	16905	1107,31	6,54	15812	1018,81	6,40	9037	461,28	4,78	7863	302,65	4,08	6960	275,24	4,10	3761	147,56	3,84	2784	758,63	3,08	2232	70,08	3,14
M BAI FX C 60/85	18969	1444,12	7,61	17592	1442,27	8,23	16334	863,35	5,31	9872	461,28	4,78	8912	352,07	3,96	7962	301,72	3,76	3942	171,48	4,35	2938	82,30	2,82	2385	70,22	2,96
M CON FX B HIMA	14777	718,78	4,83	14202	671,02	4,73	12765	488,88	3,82	10169	662,52	6,38	8886	517,29	5,79	7693	377,49	4,74	4109	258,87	6,35	3296	162,56	4,97	2855	123,66	4,44
M BAI FX B HIMA	12555	408,34	3,27	12325	491,34	3,99	11511	462,69	4,03	8871	427,94	4,81	7892	332,86	4,14	6753	268,43	3,96	3836	244,94	6,26	3052	139,21	4,49	2515	101,04	4,01
M CON FX C HIMA	12686	783,00	6,51	13165	623,03	4,55	12288	518,19	4,24	10864	571,22	5,21	9526	451,45	4,70	7932	219,04	2,78	4442	338,52	7,49	3615	183,68	5,11	2959	120,85	4,07
M BAI FX C HIMA	13695	653,87	4,77	13240	632,47	4,79	11510	478,79	4,19	9632	445,60	4,51	8570	311,80	3,57	7466	263,02	3,49	5266	258,18	4,92	4226	184,62	4,35	3520	114,58	3,28

Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Para compreender as variáveis significativas nos resultados de MR, realizou-se uma regressão linear múltipla com os resultados. A metodologia de Regressão Linear Múltipla realizada para todos os ensaios também foi aplicada aos resultados encontrados através das simulações das deformações de tração nas estruturas. Entrou-se com os dados no software IBM SPSS Statistics para a seleção das variáveis independentes, pois a quantidade é elevada de variáveis independentes e dependente (48 observações). O programa já pré-seleciona as variáveis, ou seja, exclui as variáveis que não tem nenhuma relação/pouca significância, fazendo com que o modelo gerado fique melhor ajustado.

O objetivo desta análise foi apenas o de identificar quais variáveis eram significativas para o resultado do ensaio de MR.

Como o ensaio de MR foi executado variando temperatura e frequência, fez-se necessário realizar a regressão linear múltipla para cada temperatura e frequência. Primeiramente utilizou-se do programa IBM SPSS Statistics para verificar quais variáveis influenciam efetivamente, foram utilizados os dados de todos os ensaios, não as médias, e realizou-se o método de variância ANOVA (*Analysis of Variance*) para verificar a influência das variáveis independentes nas variáveis dependentes e mais a regressão linear múltipla.

No programa, entrou-se com as variáveis independentes da fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/4, passante na peneira 3/8, passante na peneira #4 e o passante na peneira #200), e da fração do ligante asfáltico (PG de alta temperatura, teores de ligante de projeto, $|G^*|_{sen(\delta)}$ na temperatura de 19°C, $|G^*|_{sen(\delta)}$ do ligante virgem, $|G^*|_{sen(\delta)}$ após RTFOT, penetração e ponto de amolecimento). Após o programa, constatou-se que as variáveis independentes que podem ter alguma uma influencia na variável MR, foram da fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/8 e o passante na peneira #200) e da fração do ligante asfáltico (PG de alta temperatura, teores de ligante de projeto e o $|G^*|_{sen(\delta)}$ do ligante virgem).

O R^2 é uma medida de ajuste de um modelo estatístico em relação aos valores observados e varia entre 0 e 1, indicando, em percentagem, o quanto o modelo consegue explicar da variação dos valores observados. Assim, quanto maior o R^2 , mais explicativo é o modelo, com melhor ajuste à amostra. Devido à quantidade amostral (84 observações) e de variáveis independentes (7 variáveis) os valores de R^2 foram baixos como esperado. No entanto, as regressões foram mantidas, pois o objetivo do modelo é verificar quais variáveis são significativas no resultado, e deste modo, obtém-se uma melhor explicação do comportamento das misturas. Foram consideradas as variáveis ao nível de 5% de significância (o mesmo que

95% de confiança). As regressões foram realizadas para cada temperatura e frequência, os resultados estão demonstrados na Tabela 20.

Nota-se a predominância das variáveis independentes da fração do ligante asfáltico, e à medida que houve o aumento da temperatura, algumas variáveis independentes da fração dos agregados ganharam significância nos resultados. Esse fato se explica devido a suscetibilidade do ligante asfáltico à temperatura, isto é, à medida que há aumento na temperatura, há aumento na viscosidade do ligante, sendo assim, requerida a resposta da fração dos agregados.

Tabela 20 - Resultado das Regressões para o ensaio de MR

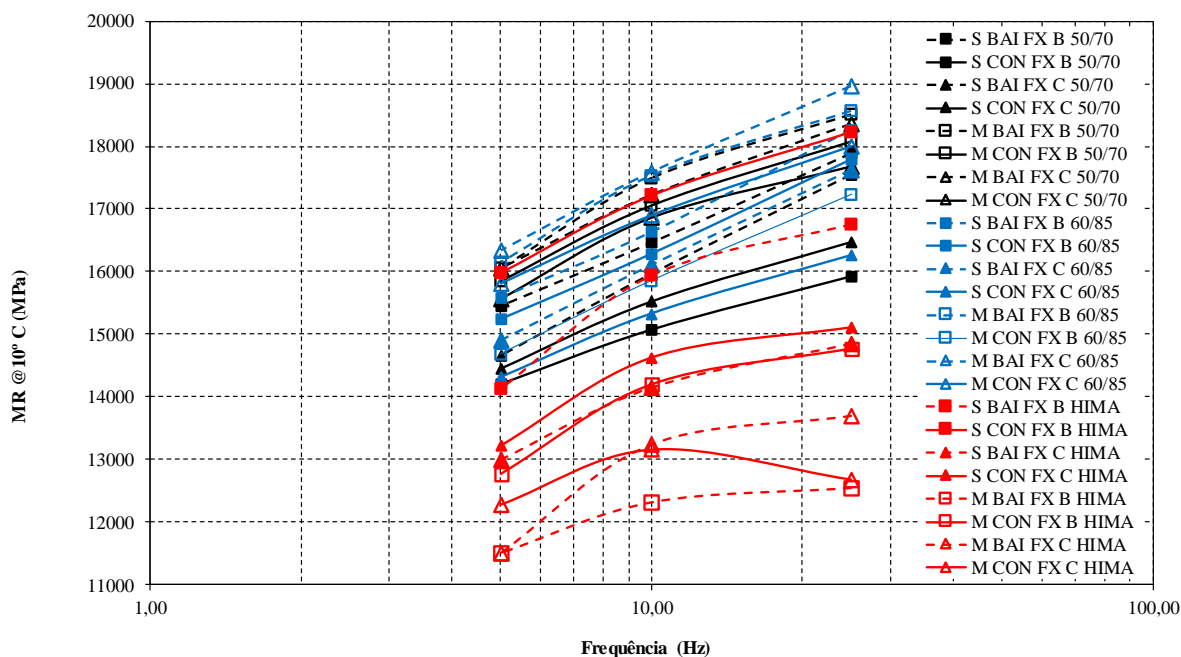
		R² Ajustado	Variáveis significantes (valor-P < 5%)			
MR@ 10 °C	25 Hz	0,44	-	PG de alta Temperatura	G* /sen (δ) do ligante virgem	-
	10 Hz	0,34	-	PG de alta Temperatura	G* /sen (δ) do ligante virgem	-
	5 Hz	0,44	-	PG de alta Temperatura	G* /sen (δ) do ligante virgem	-
MR@ 25 °C	25 Hz	0,55	-	PG de alta Temperatura	Teor de Ligante	-
	10 Hz	0,57	Porosidade FAD	PG de alta Temperatura	Teor de Ligante	-
	5 Hz	0,52	-	PG de alta Temperatura	-	-
MR@ 35 °C	25 Hz	0,64	Proporção AG	Porosidade FAD	PG de alta Temperatura	Teor de Ligante
	10 Hz	0,68	-	PG de alta Temperatura	Teor de Ligante	G* /sen (δ) do ligante virgem
	5 Hz	0,69	-	PG de alta Temperatura	Teor de Ligante	G* /sen (δ) do ligante virgem

Analisando os resultados de MR a 10°C, através da Figura 51 que está demonstrada em função das frequências de carregamento, nota-se primeiramente os valores inferiores das misturas com ligante HIMA, com exceção das misturas S CON FX B HIMA e S BAI FX B HIMA, que se equivalem aos valores encontrados com os ligantes CAP 50/70 e AMP 60/85.

Este fato pode ser justificado pela adição de polímero SBS, que oferece melhorias às propriedades do ligante. Os polímeros SBS podem absorver até dez vezes seu peso quando incorporados ao asfalto, no entanto, se o teor de polímero aumenta, as fases se invertem, de modo que a parte de “asfalto” apresente resposta similar à borracha. Este comportamento é

justificado pelo resultado da recuperação elástica do ligante HIMA, cerca de 10 vezes maior que o ligante convencional.

Figura 51 - Resultados de MR a 10°C em função das frequências de carregamento



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

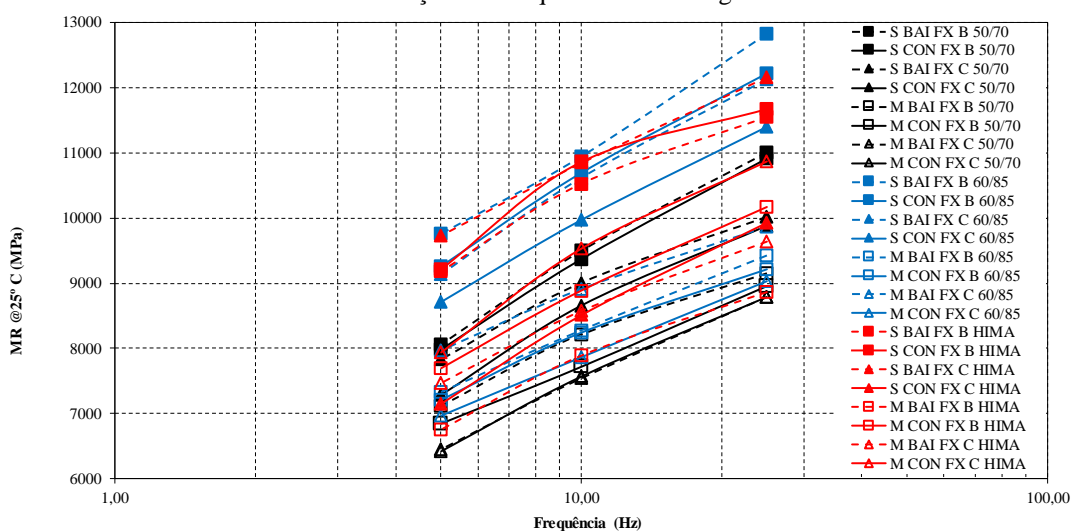
Para a temperatura de 10°C, as misturas com maior rigidez foram M BAI FX C 60/85, M BAI FX B 60/85, seguidas das misturas M BAI FX B 50/70, M BAI FX C 50/70. Porém, percebe-se que o grupo de misturas dosadas com ligante Compaflex AMP 60/85, tanto pelo método SUPERPAVE como pelo método Marshall, apresenta superioridade na rigidez quando comparado com os grupos de misturas dosadas com outros ligantes asfálticos.

Nas misturas dosadas com o CAP 50/70 e com o Compaflex AMP 60/85, percebe-se a influência dos dois métodos de dosagem. As misturas dosadas pelo método Marshall apresentaram maior rigidez em relação as misturas dosadas pelo método SUPERPAVE. Já para as misturas confeccionadas com o ligante HIMA, o comportamento contrário foi constatado. O fato de misturas com maiores teores de ligante (Marshall) serem mais rígidas que as misturas com menor teor de ligante (SUPERPAVE), é justificado pela regressão, na qual a fração do ligante é preponderante para essa temperatura. Assim com o maior teor de ligante asfáltico, aliado a uma baixa temperatura, o ligante se torna mais rígido e por consequência domina a resposta da mistura.

Os valores encontrados nesta pesquisa para MR a temperatura de 10°C apresentam valores superiores aos encontrados em pesquisas realizadas na região. Rossato (2015) em estudo com agregados de Itaara/RS (Rocha Riodacito) com alta absorção e com ligantes 50/70 e Compaflex AMP 60/85, encontrou valores na ordem de 7134 MPa e 7633 MPa, respectivamente, para frequência de 10Hz e temperatura de 10°C. Centofante (2016) com o mesmo agregado de Itaara/RS, porém com adição de 10%, 20% e 30% de material fresado, nas mesmas frequências de carregamento, encontrou valores na ordem de 11000 para frequência de 5Hz, de 12000 para 10Hz e de 14000 para 25Hz, com a utilização do mesmo lote de ligante 50/70 desta pesquisa, e com enquadramento das granulometrias nos parâmetros Bailey. Ressalta-se que os teores de ligante de projeto dos autores citados são mais altos dos que os encontrados nesta pesquisa.

Bruxel (2015) em sua dissertação utilizou agregados de Santo Antônio da Patrulha/RS (Rocha Dacito) e ligantes asfálticos diferentes (CAP 50/70, AMP 60/85, TLA e TLA Flex), utilizando mesmas temperaturas e frequência deste estudo no ensaio de MR. Encontrou uma rigidez superior para as misturas com ligantes modificados, realizados a temperatura de 10°C e mesmas frequências de carregamento. As misturas que apresentaram rigidez maior foram dosadas com TLA (5Hz; 15600; 10Hz; 17500; e para 25Hz; 18000), e TLA Flex (5Hz; 15000; 10Hz; 15500; e para 25Hz; 17400), respectivamente; já para as misturas confeccionadas com ligante convencional (CAP 50/70) a autora encontrou a mesma ordem de grandeza deste estudo. Ao se elevar a temperatura de execução do ensaio para 25°C percebe-se, através da Figura 52, que o comportamento das misturas é alterado em comparação com as misturas executadas a temperatura de 10°C.

Figura 52 - Resultados de MR a 25°C em função das frequências de carregamento



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

As misturas com menor teor de ligante, dosadas através do método SUPERPAVE, apresentaram nas três frequências de carregamento executadas maior rigidez do que as misturas dosadas através da metodologia Marshall.

As misturas que apresentaram os maiores valores de rigidez foram: S BAI FX B 60/85, S BAI FX C HIMA, S CON FX B 60/85, S BAI FX C 60/85, S BAI FX B HIMA, S CON FX B HIMA e S CON FX C 60/85. Inicialmente, nota-se que as misturas com ligante modificado, apresentaram rigidez superior às misturas com ligante convencional, tanto as dosadas pelo método SUPERPAVE quanto as dosadas com a metodologia Marshall, com exceção das misturas S BAI FX B 50/70, S CON FX B 50/70 e S BAI FX C 50/70 que estão localizadas na região intermediária, porém abaixo das misturas de maior rigidez.

Nota-se que com o aumento da temperatura, as misturas com menor teor de ligante asfáltico, especialmente as enquadradas nos parâmetros Bailey, passaram a apresentar comportamento mais rígido. Isto pode ser justificado, pois um esqueleto pétreo com maior quantidade de agregados graúdos, gera maior atrito entre as partículas de agregado, melhorando sua rigidez. Em contrapartida, as misturas com maior teor de ligante, dosadas através da metodologia Marshall, pode ter seu menor MR justificado pelo excesso de ligante que envolvem as partículas de agregado, de modo diminuir o atrito entre as partículas, e, e conseqüentemente, a rigidez das misturas.

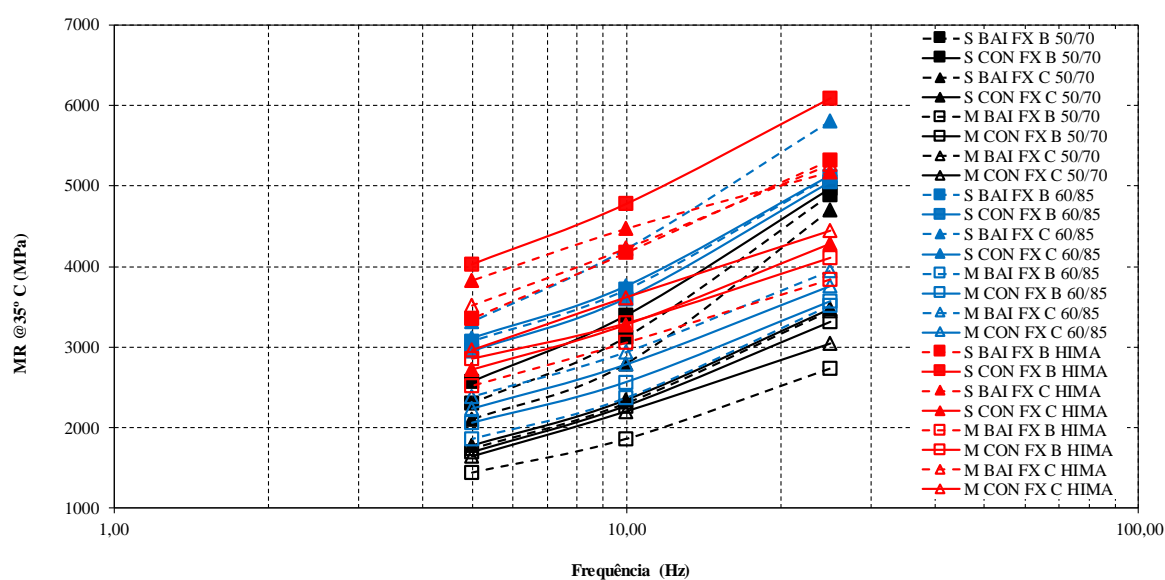
Quanto às faixas granulométricas, para cada método de dosagem e ligante asfáltico, as misturas asfálticas enquadradas dentro da Faixa B do DNIT, apresentaram rigidez superior em relação à Faixa C do DNIT, com exceção das misturas: S CON FX C 60/85, S BAI FX C HIMA e M CON FX C HIMA que apresentaram rigidez superior.

Bernucci *et al.* (2008), especificam valores típicos para MR a 25°C para concreto asfáltico na faixa de 2000MPa a 8000MPa, portanto, nota-se a superioridade dos valores encontrados nesta pesquisa. Para a frequência de carregamento de 25Hz, todas as misturas apresentaram valores acima de 8000MPa; já para a frequência de carregamento próxima de uso frequente no ensaio de MR (10Hz), apenas as misturas M CON FX B 50/70, M BAI FX C 50/70, M CON FX C 50/70, M CON FX C 60/85 e M BAI FX B HIMA foram que obtiveram valores inferiores a 8000MPa; e para a frequência de carregamento de 5Hz, todas as misturas confeccionadas com o ligante asfáltico 50/70 obtiveram valores inferiores a 8000MPa, assim como, as misturas com ligante modificado AMP 60/85 e HIMA dosadas com a metodologia Marshall, com exceção da mistura S CON FX C HIMA, que juntamente com as misturas dosadas pelo método Marshall, ficou abaixo de 8000MPa.

Em comparação com valores encontrados pelos autores Rossato (2015), Bruxel (2015) e Centofante (2016), que tiveram variação de 3800MPa (5Hz) a 8300MPa (25Hz), com variação de tipos de ligante e agregados, observa-se que os resultados desta pesquisa são superiores. Para as misturas dosadas através do método Marshall. Boeira (2014), na frequência de carregamento de 10Hz, em misturas asfálticas com ligante convencional (50/70) utilizando agregados de Caçapava do Sul, Bagé e Eldorado do Sul, chegou a valores parecidos a desta pesquisa, de aproximadamente 8000MPa, com e sem adição de cal hidratada. Paniz (2018) utilizando diferentes ligantes convencionais em uso no Brasil, na temperatura de 25°C e frequência de carregamento de 10Hz, com agregado de Itaara/RS e dosagem pela metodologia SUPERPAVE, também chegou a valores de aproximadamente 8000MPa.

Para as misturas asfálticas ensaiadas na temperatura de 35 °C (Figura 53), observou-se o mesmo comportamento da temperatura de 25°C, ou seja, misturas com menor teor de ligante asfáltico, dosadas através do método SUPERPAVE, apresentaram rigidez superior que as misturas dosadas pelo método Marshall. Ainda, os ligantes modificados apresentaram rigidez superior quando comparados com o ligante convencional.

Figura 53 - Resultados de MR a 35°C em função das frequências de carregamento



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Primeiramente, nota-se que para a temperatura de 35°C, as misturas dosadas com ligante asfáltico HIMA apresentam rigidez maior que as misturas dosadas com o ligante asfáltico AMP 60/85, com exceção da mistura S BAI FX C 60/85, que na frequência de 25Hz apresentou rigidez superior. Nas três frequências de carregamento, as misturas S CON FX B HIMA, S BAI

FX C HIMA, M BAI FX C HIMA, S BAI FX B HIMA e S BAI FX C 60/85 apresentaram os maiores valores de MR.

Já na comparação entre as faixas granulométricas, quanto as misturas com ligante asfáltico convencional, percebe-se que as misturas enquadradas na Faixa B apresentaram rigidez superior às de misturas enquadradas na Faixa C, com exceção da mistura M BAI FX B 50/70, que apresentou a menor rigidez de todas as misturas. Fato contrário é apresentado nas misturas com o ligante modificado AMP 60/85, de modo que as misturas enquadradas na Faixa C apresentaram rigidez maior que as misturas enquadradas na Faixa B, caso ocorrido também com as misturas com ligante modificado HIMA (exceto S CON FX B HIMA, que teve o valor mais alto de MR entre todas as misturas).

É perceptível ainda, a superioridade das misturas enquadradas nos parâmetros Bailey, quando comparadas ao simples enquadramento na faixa granulométrica, com exceção de duas misturas: S CON FX B 50/70 e S CON FX B HIMA que dentro do método de dosagem SUPERPAVE apresentaram rigidez superior. Pode-se justificar o melhor desempenho destas duas misturas, pois possuem maior porcentagem de agregados graúdos, o que, mesmo fora dos parâmetros Bailey, pode resultarem melhor intertravamento entre as partículas.

Comparando os resultados de MR a 35 °C com os autores Rossato (2015), Bruxel (2015) e Centofante (2016), observa-se que os valores desta pesquisa são superiores. Bruxel (2015) encontrou valores semelhantes às misturas dosadas pela metodologia Marshall, com uso de misturas com ligantes modificados (TLA Flex, TLA e AMP 60/85) e dosagens metodologia SUPERPAVE. Centofante (2016) também encontrou o mesmo patamar de valores que as misturas dosadas pela metodologia Marshall, com uso de misturas asfálticas com ligante convencional com 20% e 30% de material fresado, nas frequências de 5Hz e 10Hz, e utilização da metodologia SUPERPAVE para a dosagem. Ressalta-se que o ligante convencional utilizado pela autora é do mesmo lote utilizado nessa pesquisa.

Ao analisar-se o conjunto todo do ensaio de MR, nas três temperaturas e nas três frequências de carregamento, percebe-se que os fatores que mais influenciaram nos resultados foram o tipo e o teor de ligante asfáltico nas misturas, diretamente ligados ao método de dosagem. Percebe-se que com o aumento da temperatura, o esqueleto mineral ganha importância, uma vez que em temperaturas mais altas, o ligante asfáltico é menos viscoso. Porém, o tipo de ligante asfáltico é preponderante como fator de influência na rigidez das misturas.

Verifica-se que uma análise puramente dos valores de MR é de maneira apenas comparativa insuficiente, visto que, valores de alta rigidez foram encontrados, e que,

dependendo da estrutura em que estas misturas asfálticas estiverem inseridas, valores de rigidez mais altos ou mais baixos poderão ser tolerados. Dessa forma, torna-se imprescindível uma compatibilização entre rigidez das misturas asfálticas e as camadas que constituírem o sistema.

4.2.2 Ensaio de Módulo Complexo

O ensaio de Módulo Complexo foi executado conforme demonstrado no capítulo anterior e foram utilizadas duas amostras de cada mistura para obtenção do Módulo Dinâmico ($|E^*|$) e Ângulo de Fase (φ), sendo que os dados experimentais estão dispostos no Apêndice B. Em algumas misturas, para determinadas temperaturas e frequências, optou-se por utilizar apenas um resultado dos corpos de prova, devido à queda sucessiva dos pinos colados nos corpos de prova, o que acabou impossibilitando a leitura dos LVDT's.

O ângulo de fase está relacionado às propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos, e ainda, é um parâmetro utilizado para avaliar o efeito dos ligantes nas misturas. Já o módulo dinâmico é o valor absoluto do módulo complexo $|E^*|$, e é definido por uma porção real e outra imaginária (E_1 e E_2). Por definição, o módulo complexo, E^* , é um número complexo que relaciona tensão e deformação para materiais viscoelásticos sujeitos a carregamento senoidal aplicado num certo domínio de frequência.

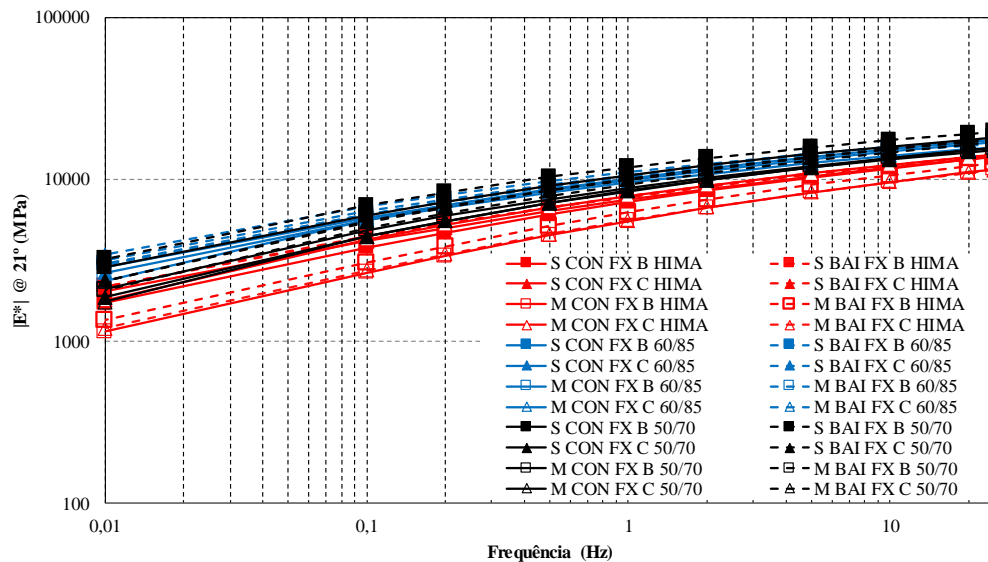
Para a apresentação dos resultados do ensaio de Módulo Complexo, seguiu-se o protocolo de análise orientado por Di Benedetto & Corté (2005), apresentando primeiro as isotermas, seguida das isócronas, espaços Cole-Cole, diagramas Black e as curvas mestras de $|E^*|$ e φ , e por fim, de forma complementar, as inferências à deformação permanente e à fadiga. Vale ressaltar que as inferências à deformação permanente e à fadiga apenas auxiliam em uma tentativa de compreender uma tendência das misturas asfálticas nestes ensaios, visto que, o ensaio de módulo complexo trabalha com o comportamento viscoelástico linear das misturas, ou seja, o ensaio não entra no comportamento de dano das mesmas.

Devido à quantidade de amostras executadas no ensaio, optou-se por apresentar uma Isoterma e uma Isócrona de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase, com todas as misturas. Em cada Isoterma é apresentado o módulo dinâmico, $|E^*|$, em função da frequência e para cada temperatura de ensaio, e de mesma forma, para o Ângulo de Fase. Analogamente, as Isócronas representam o módulo dinâmico de cada frequência de carregamento em função das temperaturas de execução do ensaio, e de mesmo modo, para o ângulo de fase.

As Isotermas e Isócronas demonstram todos os aspectos de análise que a metodologia 2S2P1D estabelece como necessária, o comportamento dos seus dados será analisado nos

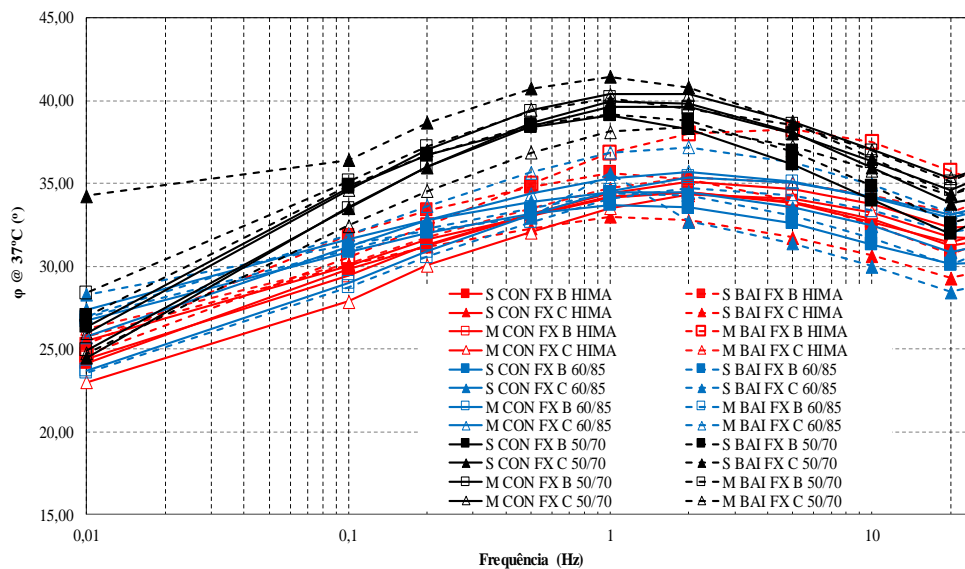
gráficos das curvas mestras. Nas Figuras 54 e 55 estão demonstradas as Isotermas de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase, respectivamente.

Figura 54 - Isoterma de $|E^*|$ a 21°C



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Figura 55 - Isoterma de ϕ a 37°C



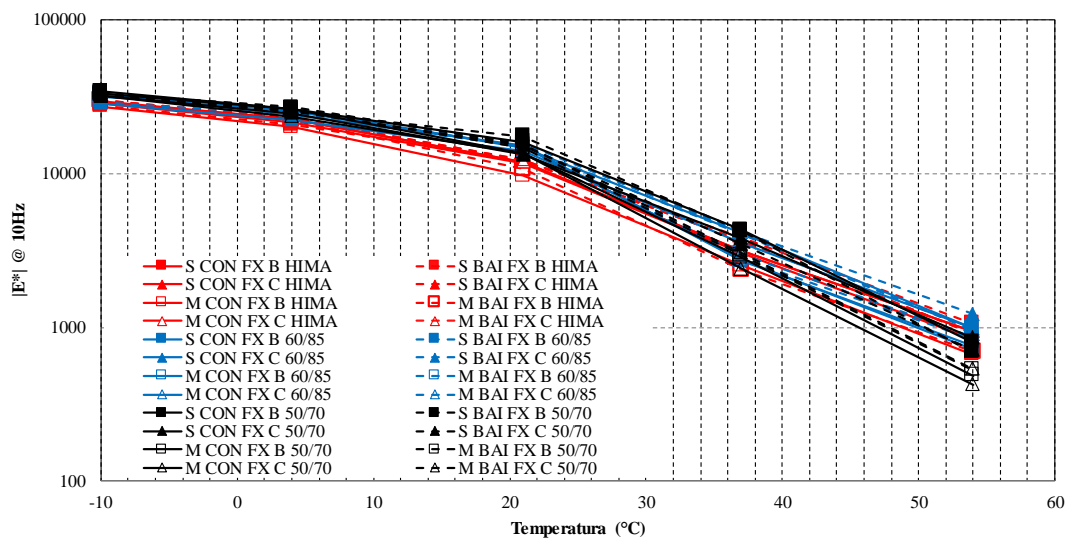
Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

A escolha de apresentação da Isoterma de $|E^*|$ a 21°C deu-se pelo fato de ser a temperatura intermediária das temperaturas estudadas, e, por ficar mais próxima de 25°C

(temperatura padrão dos ensaios brasileiros). Por outro lado, a Isoterma de φ a temperatura de 37°C foi escolhida por mostrar a curva que o Ângulo de Fase realiza nessa temperatura.

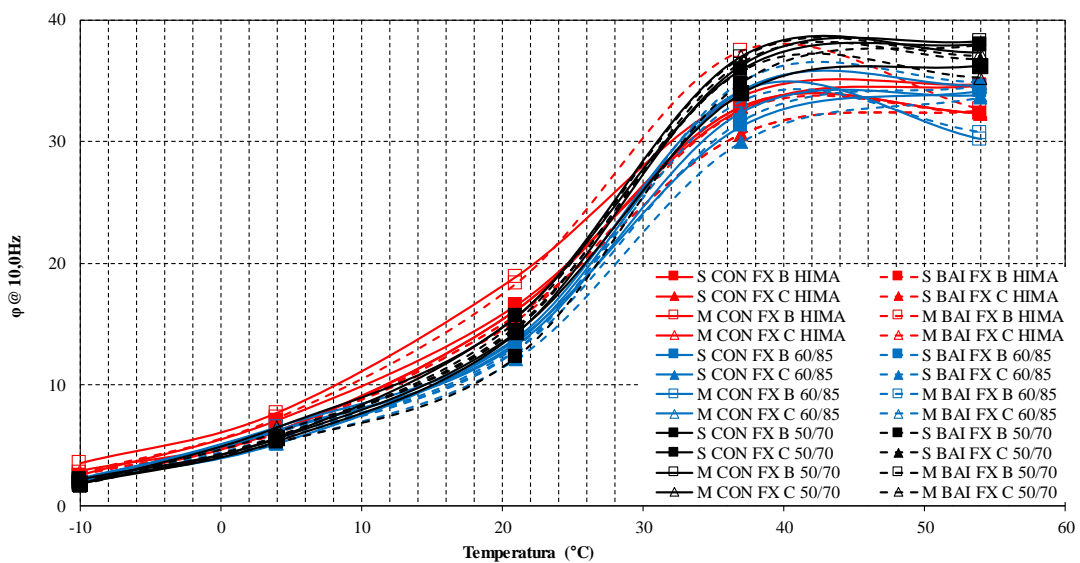
As Figuras 56 e 57 apresentam as Isócronas do Módulo Dinâmico e do Ângulo de Fase, respectivamente. As Isócronas estão demonstradas em função da frequência de 10Hz, escolhida por ser a mesma frequência executada no ensaio de Módulo de Resiliência.

Figura 56 - Isócrona de $|E^*|$ a 10Hz



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Figura 57 - Isócrona de φ a 10Hz



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Para se obter o espaço Cole-Cole, Diagrama Black e as curvas mestras do Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase, utilizaram-se as médias dos dados experimentais para processamento no modelo reológico 2S2P1D. Os parâmetros de calibração do modelo para representar o comportamento viscoelástico do material estão apresentados na Tabela 21, juntamente com as constantes C1 e C2, do WLF (William, Landel e Ferry, 1955).

Tabela 21 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2

Mistura	E*						WLF		
	E ₀₀ (MPa)	E ₀ (MPa)	k	h	δ	τ _E	β	C1	C2
S CON FX B 50/70	110	37000	0,21	0,55	2,00	0,20	600	26,009	189,743
S BAI FX B 50/70	130	35800	0,21	0,55	2,10	0,30	200	54,442	384,709
S CON FX C 50/70	110	36000	0,20	0,57	2,22	0,10	400	17,342	135,419
S BAI FX C 50/70	140	36000	0,22	0,59	2,40	0,25	200	31,507	230,204
S CON FX B 60/85	130	35500	0,20	0,52	2,10	0,25	4000	34,454	244,525
S BAI FX B 60/85	130	32500	0,22	0,53	2,40	0,50	4000	55,639	398,839
S CON FX C 60/85	130	32500	0,20	0,52	2,12	0,30	4000	45,020	334,261
S BAI FX C 60/85	130	40500	0,18	0,50	2,30	0,40	6000	25,023	168,219
S CON FX B HIMA	115	31800	0,23	0,55	2,60	0,20	1000	21,997	165,743
S BAI FX B HIMA	110	31300	0,21	0,50	2,80	0,50	1000	21,997	165,743
S CON FX C HIMA	170	31000	0,23	0,62	2,80	0,23	1000	22,364	168,625
S BAI FX C HIMA	110	33800	0,21	0,48	2,60	0,11	1000	25,832	189,970
M CON FX B 50/70	100	36000	0,22	0,60	3,10	0,20	800	29,977	212,713
M BAI FX B 50/70	110	36000	0,22	0,58	2,29	0,20	400	30,826	221,313
M CON FX C 50/70	90	35000	0,21	0,57	2,25	0,15	400	31,939	230,469
M BAI FX C 50/70	110	37000	0,22	0,55	2,10	0,20	600	36,785	259,163
M CON FX B 60/85	140	37200	0,20	0,52	2,10	0,20	2000	33,582	237,499
M BAI FX B 60/85	180	36000	0,20	0,53	2,10	0,30	2000	43,371	299,902
M CON FX C 60/85	160	37200	0,20	0,54	2,45	0,30	500	48,181	330,279
M BAI FX C 60/85	160	35500	0,20	0,52	2,00	0,50	300	36,162	250,209
M CON FX B HIMA	200	32600	0,22	0,60	2,80	0,07	1000	22,542	165,633
M BAI FX B HIMA	150	34500	0,22	0,60	2,80	0,08	1000	22,221	165,243
M CON FX C HIMA	220	33850	0,21	0,53	2,60	0,20	1000	21,705	160,635
M BAI FX C HIMA	180	30000	0,24	0,60	2,90	0,10	1000	19,858	150,989

Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

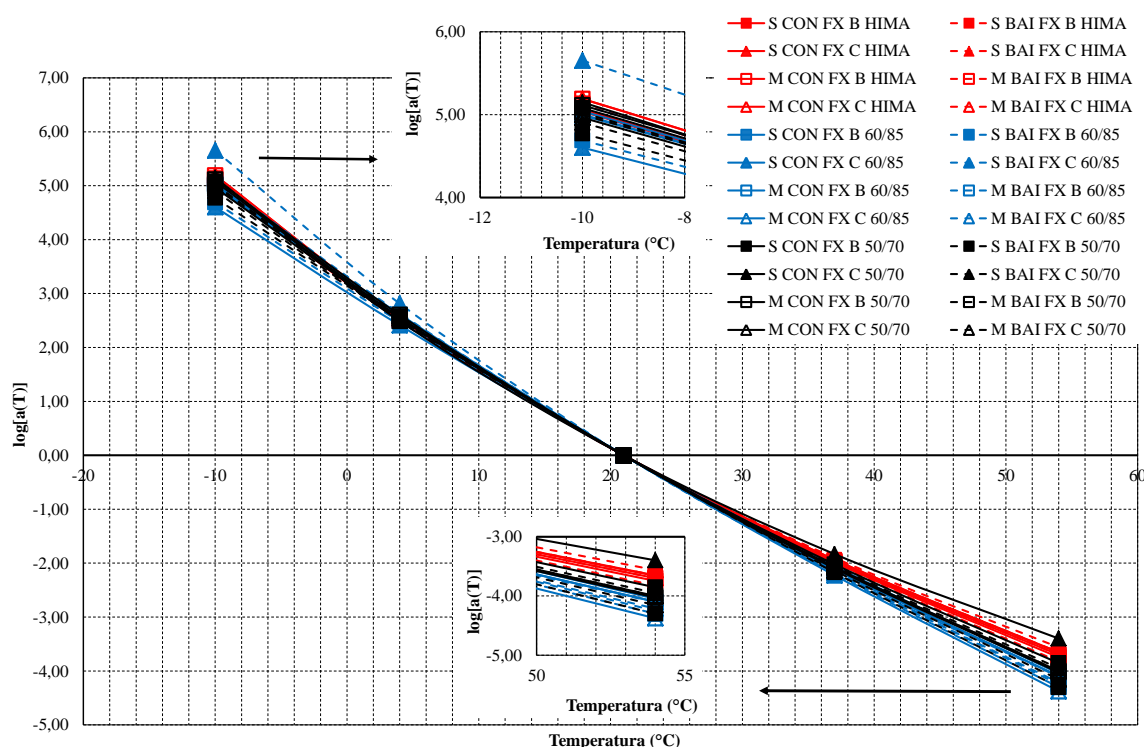
Para a construção das Curvas Mestras, é realizada a translação das curvas isotermas e isócronas com base no princípio de superposição tempo-temperatura, fazendo com que um mesmo par de valores de módulo dinâmico e ângulo de fase possa ser obtido para diferentes pares frequência e temperatura. A translação é representada num espaço logarítmico, indicado pelo fator de deslocamento e expresso por $a(T)$. Duas leis são utilizadas para descrever as

funções de translação, a lei WLF (C1 e C2) e a lei de Arrhenius, ambas são baseadas no princípio de superposição tempo-temperatura.

Os dados coletados em diferentes temperaturas podem ser deslocados relativamente ao tempo de carregamento ou frequência, para isso as várias curvas devem ser alinhadas para formar uma única curva mestra. O fator de deslocamento $aT(T)$ define o deslocamento necessário para uma dada temperatura, que é constante no tempo, mas deve ser dividida para chegar a um tempo reduzido para a curva mestra (KIM, 2009).

A Figura 58 está demonstrando graficamente estes fatores e suas correspondentes curvas de ajuste do WLF. A inclinação das curvas permite fazer uma inferência a respeito da suscetibilidade térmica das misturas, isto é, quanto menor a inclinação da curva, melhor é o comportamento da mistura quanto à suscetibilidade térmica, que por sua vez, tende a ter maior estabilidade. A temperatura de referência é de 21°C, sendo então $aT(21)=1$.

Figura 58 - Comparação das linhas de tendência lineares das curvas $\log [a(T)]$ para todas as misturas (@21°C)



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Pelo gráfico das linhas de tendência lineares das curvas $\log [aT(T)]$, que demonstram a suscetibilidade térmica das misturas asfálticas estudadas, percebe-se que não há uma tendência

clara em comparação com os ligantes asfálticos utilizados, visto que misturas asfálticas compostas com o ligante asfáltico convencional (CAP 50/70) deveriam ser mais suscetíveis.

De acordo com o gráfico, a mistura mais suscetível e, por consequência, menos estável é a S BAI FX C 60/85. De certa forma, contraria a literatura, pois trata-se de mistura com ligante modificado, teoricamente, menos suscetível que as misturas com ligante convencional. Faccin (2018) encontrou resultado em uma de suas misturas, também enquadrada na Faixa C e com ligante modificado 60/85, igualmente suscetível neste parâmetro. Porém, fica evidente a mínima variação do comportamento das misturas frente à suscetibilidade térmica com a variação de ligante asfáltico.

A análise completa dos dados obtidos no ensaio de módulo dinâmico envolve a geração das diferentes representações gráficas, incluindo curvas mestras, espaço Black, curvas Isotermas, curvas Isócronas e representação Cole-Cole. As mesmas estarão descritas nos subitens a seguir, e, em cada item, será apresentado primeiramente os métodos de dosagem separados (SUPERPAVE e Marshall), e em seguida, um gráfico com todas as misturas juntas.

Antes de apresentar a análise completa, fez-se uso da regressão linear múltipla para que fosse possível entender quais os fatores que influenciam significativamente nos resultados de Módulo Complexo. Diferentemente do ensaio de Módulo de Resiliência, fez-se a regressão apenas em uma temperatura e uma frequência, sendo escolhidas a temperatura de 19°C e a frequência de 10Hz. A escolha da temperatura e frequência deu-se pelo fato do ensaio de fadiga ser realizado nesta condição.

Primeiramente utilizou-se do programa IBM SPSS Statistics para verificar quais variáveis influenciam efetivamente pelo método de Análise de variância ANOVA (*Analysis of Variance*) para verificar a influência das variáveis independentes nas variáveis dependentes, pois como inicialmente se utilizou de muitas variáveis a regressão não funcionou, então fez-se necessário um método inicial de seleção de variáveis. Foram consideradas as variáveis que são estatisticamente significativas ao nível de 5% de significância (o mesmo que 95% de confiança). Ressalta-se, novamente, que o objetivo do modelo com o IBM SPSS Statistic é verificar quais variáveis são significativas no resultado, apenas para melhor explicação do comportamento das misturas.

No programa, entrou-se com as variáveis independentes da fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/4, passante na peneira 3/8, passante na peneira #4 e o passante na peneira #200), e da fração do ligante asfáltico (PG de alta temperatura, teores de ligante de projeto, $|G^*|_{sen(\delta)}$ na temperatura de 19°C, $|G^*|_{sen(\delta)}$ do ligante virgem, $|G^*|_{sen(\delta)}$ após RTFOT, penetração e ponto de amolecimento). Após o

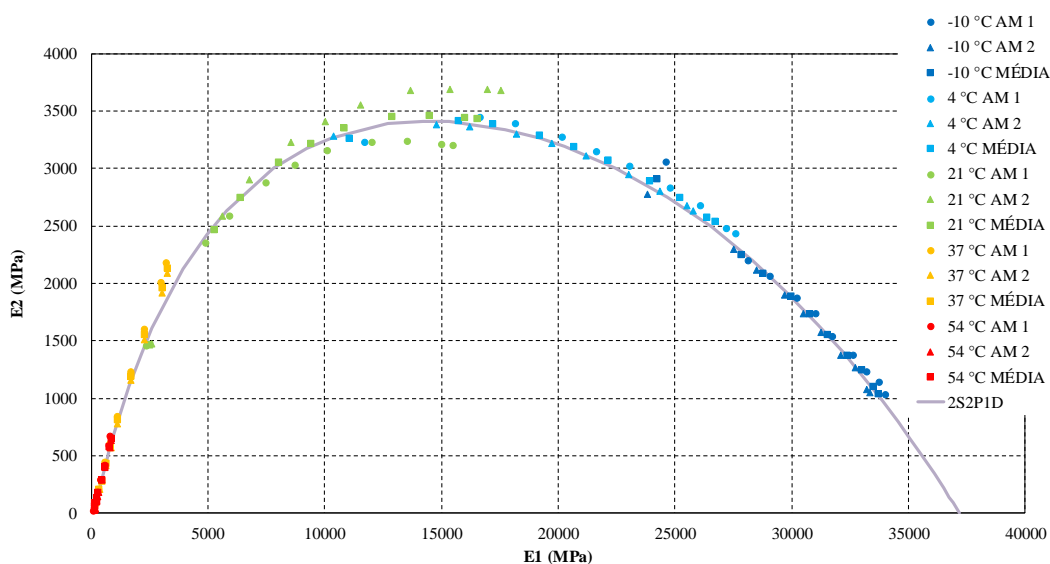
programa, as variáveis independentes que podem ter alguma influência na variável $|E^*|$ foram da fração dos agregados a proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/8 e o passante na peneira #200 e da fração do ligante asfáltico, PG de alta temperatura, teores de ligante de projeto e o ponto de amolecimento.

O modelo apresentou um bom R^2 ajustado ($R^2 = 0,67$), indicando bom ajuste e boa significância global ($\rho < 0,05$). Entretanto, ao analisar o teste de significância individual de cada variável, somente o PG de alta temperatura e o ponto de amolecimento apresentaram relação estatística com o módulo dinâmico ($\rho < 0,05$).

4.2.2.1 Espaço Cole-Cole

No espaço Cole-Cole é representada, em escala aritmética, a parte real (E_1) e imaginária ou de perda (E_2). A Figura 59 apresenta o espaço Cole-Cole para a mistura M CON FX C 60/85, escolhida de forma a exemplificar e demonstrar os dados obtidos experimentalmente, com as amostras 1, 2 e a média, juntamente com a modelagem 2S2P1D. A modelagem foi realizada a partir da análise da média dos dados obtidos para cada mistura.

Figura 59 - Espaço Cole-Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a mistura M CON FX C 60/85

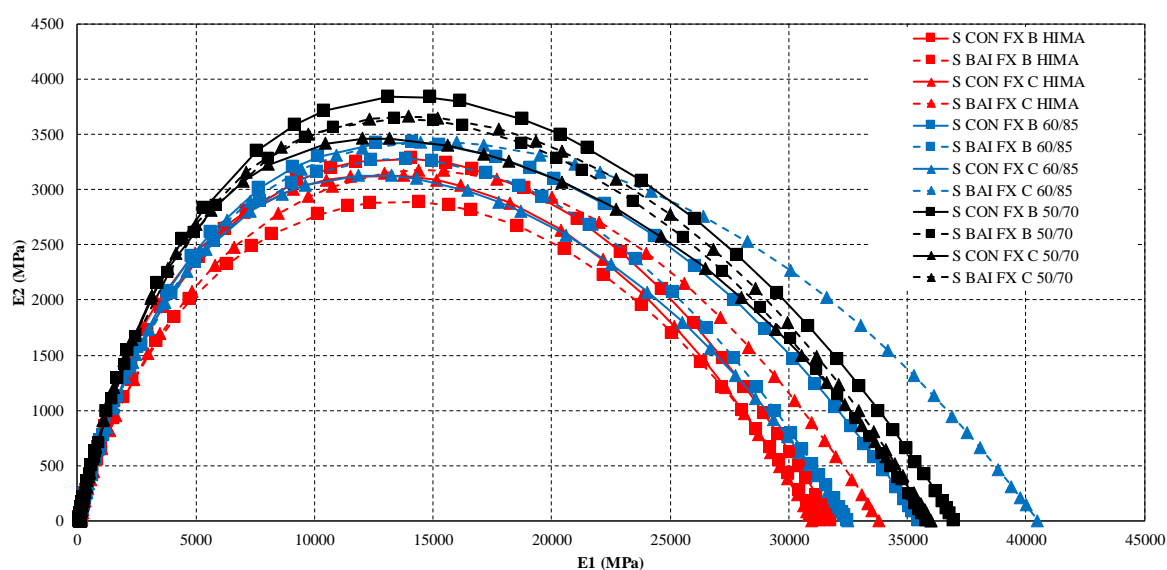


Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Nas Figuras 60, 61 e 62 estão demonstrados os espaços Cole-Cole para as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE, Marshall e para as todas as misturas, respectivamente.

Em cada uma das figuras estão plotados os resultados obtidos a partir do modelo 2S2P1D para cada mistura, vale salientar que a modelagem 2S2P1D foi realizada a partir da análise da média dos dados experimentais obtidos pelo ensaio, e que, a forma que estão representadas as curvas no espaço Cole-Cole, foram escolhidas de modo que se possa diferenciar cada mistura.

Figura 60 - Espaço Cole-Cole para as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE obtidos com a modelagem 2S2P1D



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

É notório, através da Figura 60, as diferenças de comportamento das misturas asfálticas dosadas pela metodologia SUPERPAVE, considerando os diferentes ligantes asfálticos utilizados. Visualiza-se que as misturas com ligante convencional apresentam valores de E2 e E1 superiores quando comparadas com as misturas com ligantes modificados, com exceção da mistura S BAI FX C 60/85, que apresentou um valor de E1 superior.

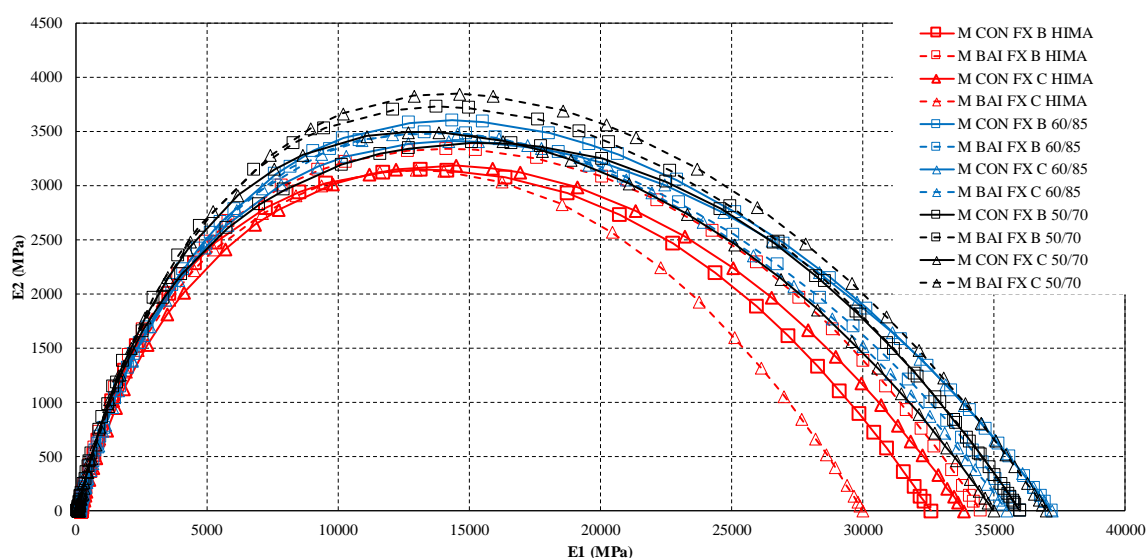
Sabe-se que misturas asfálticas utilizando ligante modificado apresentam um menor comportamento viscoso irreversível que misturas com ligante convencional, isto é, ao se deformar, retornam ao seu estado original com facilidade. Por outro lado, nas misturas com ligante convencional, por apresentarem os valores E1 e E2 superior, o esqueleto mineral é mais solicitado, ocorrendo assim, maior dissipação de energia devido ao atrito interno, o que acaba causando uma situação considerada de maior severidade.

As misturas que apresentaram os menores valores, tanto em E1 como E2, foram as misturas S BAI FX B HIMA, S BAI FX C HIMA e S CON FX C 60/85 junto com a S CON FX C HIMA, comprovando o efeito do ligante modificado. Os maiores valores ficaram com as

misturas S CON FX B 50/70, S BAI FX C 50/70 e S BAI FX B 50/70. Quanto as faixas granulométricas e os métodos de enquadramento das faixas (Bailey e Convencional), não se percebe uma tendência clara. Porém, é possível notar que as misturas enquadradas na Faixa B e pelo método convencional (tentativa e erro) apresentaram valores de E1 e E2 superiores, dentro do mesmo tipo de ligante, comparadas com as misturas enquadradas na Faixa C. De certa forma, granulometrias com maior número de agregados graúdos (Grossas) apresentam maior intertravamento do esqueleto pétreo, e, por consequência, maior atrito interno, ocasionando maior dissipação de energia quando comparadas com misturas de granulometria mais fina.

Para as misturas dosadas pela metodologia Marshall, que apresentam maior teor de ligante de projeto, verifica-se, através da Figura 61, a mesma tendência apresentada nas misturas dosadas com a metodologia SUPERPAVE. As misturas com ligante convencional apresentaram valores superiores de E1 e E2, quando comparadas com as misturas com ligantes modificados, com a exceção das misturas M CON FX B 50/70 e M CON FX C 50/70 que apresentaram valores semelhantes das misturas com ligante 60/85.

Figura 61 - Espaço Cole-Cole para as misturas dosadas pela metodologia Marshall obtidos com a modelagem 2S2P1D



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Através do espaço Cole-Cole para a dosagem pela metodologia Marshall, as misturas que apresentaram maiores valores de E1 e E2 foram: M BAI FX C 50/70 e M BAI FX B 50/70, e as misturas que apresentaram os menores valores foram: M BAI FX C HIMA, M CON FX B

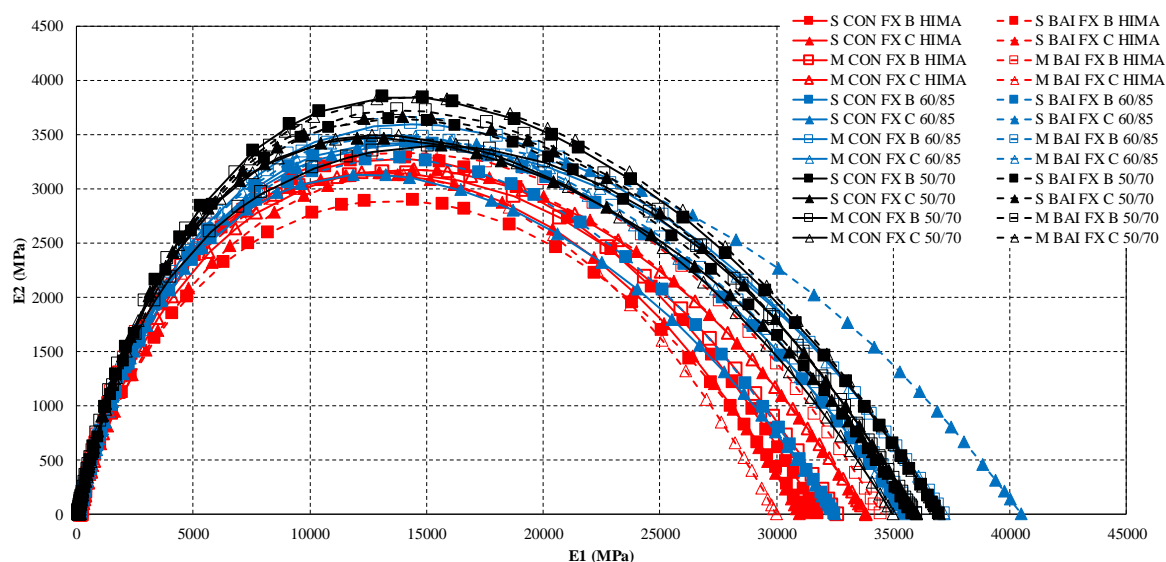
HIMA e M CON FX C HIMA. As demais misturas tiveram resultados intermediários entre as citadas, e, no geral, todas as misturas encontram-se com valores muito semelhantes.

O aumento no teor de ligante, devido a diferença entre os métodos de dosagem, fez com que os resultados apresentassem valores mais semelhantes, com exceção das misturas com ligante HIMA, que se distanciam do grupo apresentando recuperação elástica maior. Provavelmente, o aumento no teor de ligante fez com que houvesse diminuição no atrito interno do esqueleto mineral, devido ao aumento do filme asfáltico envolvente nos agregados minerais, fazendo com que as misturas apresentem valores semelhantes.

Em relação às faixas granulométricas e os métodos de enquadramento das misturas dosadas pela metodologia Marshall, o mesmo comportamento das misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE foi constatado. Uma pequena diferença foi observada nas misturas da Faixa B com o enquadramento Bailey, que apresentaram valores superiores para E1 e E2.

A Figura 62 demonstra graficamente as misturas com ambos os métodos de dosagem plotados juntos.

Figura 62 - Espaço Cole-Cole para todas as misturas obtidas com a modelagem 2S2P1D



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

A mesma tendência apresentada separadamente nos métodos de dosagem, pode ser vista quando plotadas todas as misturas juntas, ou seja, as misturas com ligantes modificados apresentam valores inferiores de E1 e E2 quando comparadas às misturas com ligante convencional, e, dessa forma, sugere um comportamento viscoso irreversível menor.

Levando em consideração os dois métodos mencionados, as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE, em especial as misturas com ligantes modificados (AMP 60/85 e HIMA), foram as que apresentaram os menores valores de E1 e E2. Logo, analisando os ensaios de caracterização dos ligantes asfálticos, os resultados se mostram coerentes, visto que, o ligante HIMA e AMP 60/85 tem as maiores recuperações elásticas.

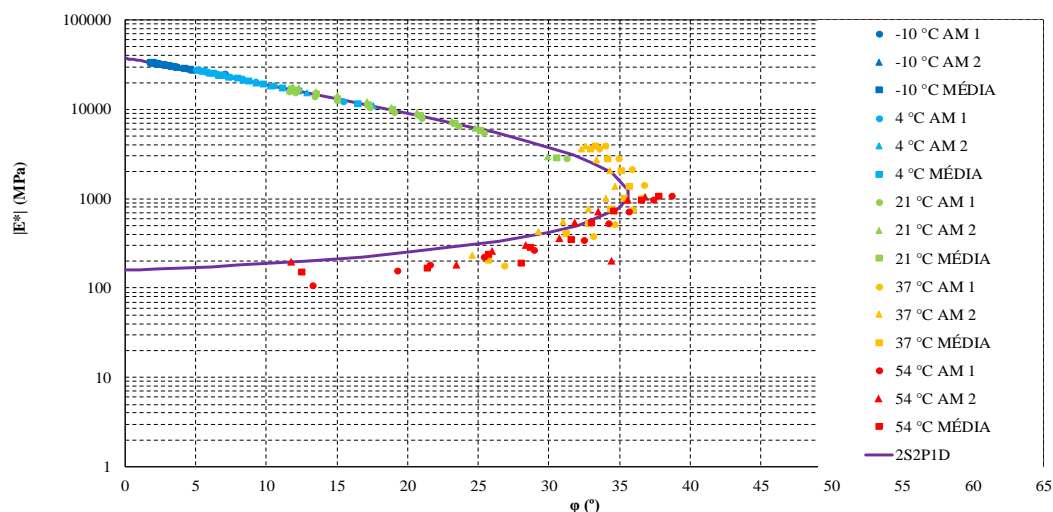
Quanto à diferença nos teores de ligante, devido aos métodos de dosagem, percebe-se que, mesmo com a redução do teor de projeto das misturas, as mesmas apresentaram melhor comportamento elástico do material. Também é possível afirmar que há melhor comportamento viscoso irreversível, devido a melhor dissipação de energia, sendo que este valor ainda representa a energia produzida por atrito interno no material. Isso demonstra a grande efetividade dos ligantes modificados, uma vez que, com menor percentual deste material, o esqueleto mineral acaba sendo mais eficiente, mesmo com o pequeno filme de ligante asfáltico envolvido no agregado.

4.2.2.2 Diagrama de Black

O Diagrama de Black é a representação do valor do módulo dinâmico em função do ângulo de fase para cada temperatura de ensaio, ambos apresentados na escala logarítmica. Assim como no espaço Cole-Cole, a Figura 63 demonstra graficamente o Diagrama Black para a mistura M CON FX C 60/85, mistura escolhida para exemplificar e demonstrar os dados obtidos experimentalmente, com as amostras 1, 2 e média, juntamente com a modelagem 2S2P1D.

Este diagrama permite visualizar a zona de valores com baixos módulos dinâmicos, no qual os valores de ângulo de fase são maiores, tornando possível verificar a influência da temperatura nos valores de ângulo de fase. Neste caso, observou-se que com o aumento da temperatura, ocorre diminuição dos valores de ângulo de fase.

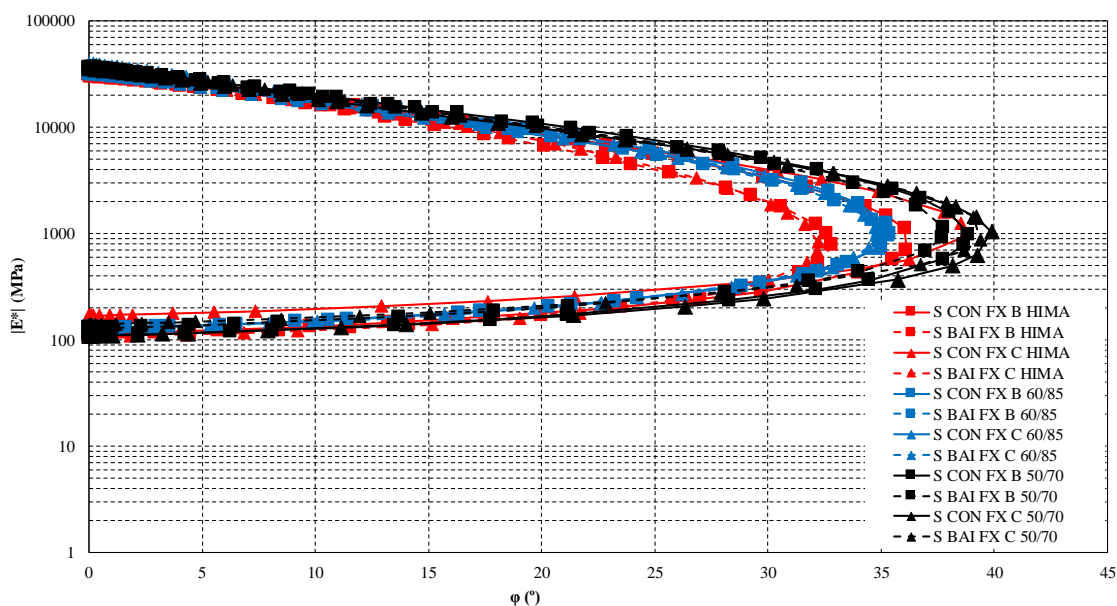
Figura 63 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a mistura M CON FX C 60/85



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Nas Figuras 64, 65 e 66 estão apresentados de forma gráfica os resultados do Diagrama de Black das misturas estudadas, primeiramente demonstrando as misturas dosadas pelo método SUPERPAVE, em seguida as misturas dosadas pela metodologia Marshall, e, por fim, todas as misturas plotadas juntas. Vale ressaltar que os resultados apresentados foram obtidos pela modelagem 2S2P1D, ou seja, sem os dados experimentais.

Figura 64 - Diagrama de Black para as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE obtidos com a modelagem 2S2P1D



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

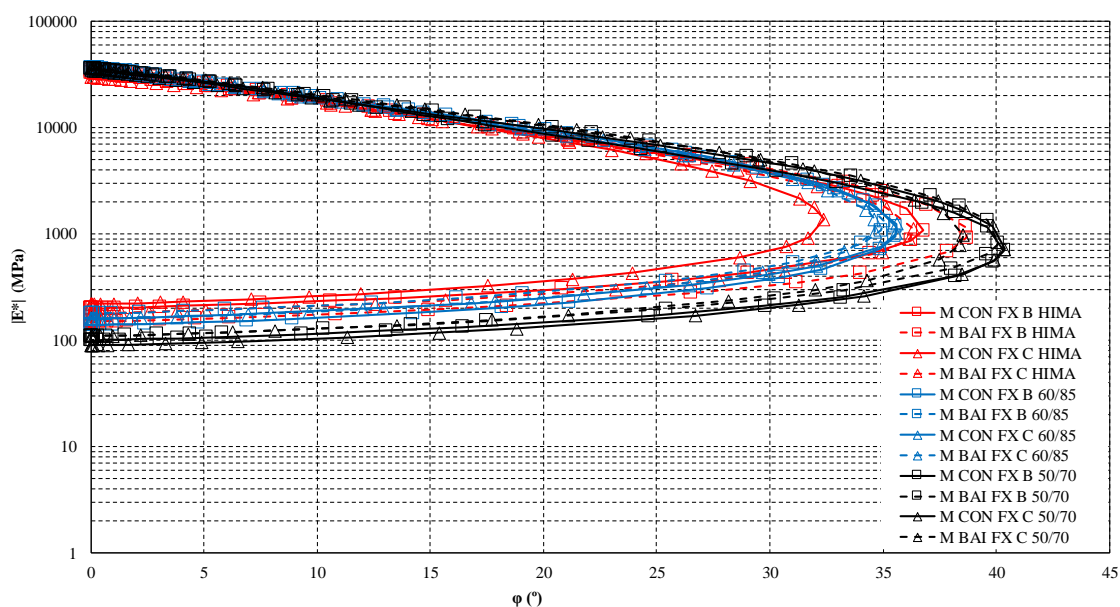
Pela Figura 64 percebe-se que as misturas com ligante modificado apresentaram valores menores de ângulo de fase em comparação com as misturas com ligante convencional. Isto indica que a parcela elástica, para essas misturas, é mais atuante que a parcela viscosa, e isto acontece pela adição de polímeros no ligante.

Os menores ângulos de fase ficaram com as misturas S BAI FX C HIMA e S BAI FX B HIMA, seguidas de todas as misturas com ligante AMP 60/85, que teve as quatro misturas com comportamento muito semelhante. Já as misturas S CON FX B HIMA e S CON FX C HIMA tiveram seus ângulos de fase com valores próximos às misturas com ligante convencional.

Nota-se, ainda, que tanto para as misturas com ligante HIMA, quanto para as misturas com o CAP 50/70, o método de enquadramento granulométrico nos parâmetros Bailey apresentou valores menores ângulos de fase. Comparando entre o tipo de ligante asfáltico, observa-se que, as misturas enquadradas nos parâmetros Bailey se apresentaram mais rígidas quando comparadas com as misturas com o método de enquadramento Convencional.

O comportamento observado nas misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE, também é verificado para a metodologia Marshall, como pode ser visto na Figura 65.

Figura 65 - Diagrama de Black para as misturas dosadas pela metodologia Marshall obtidos com a modelagem 2S2P1D



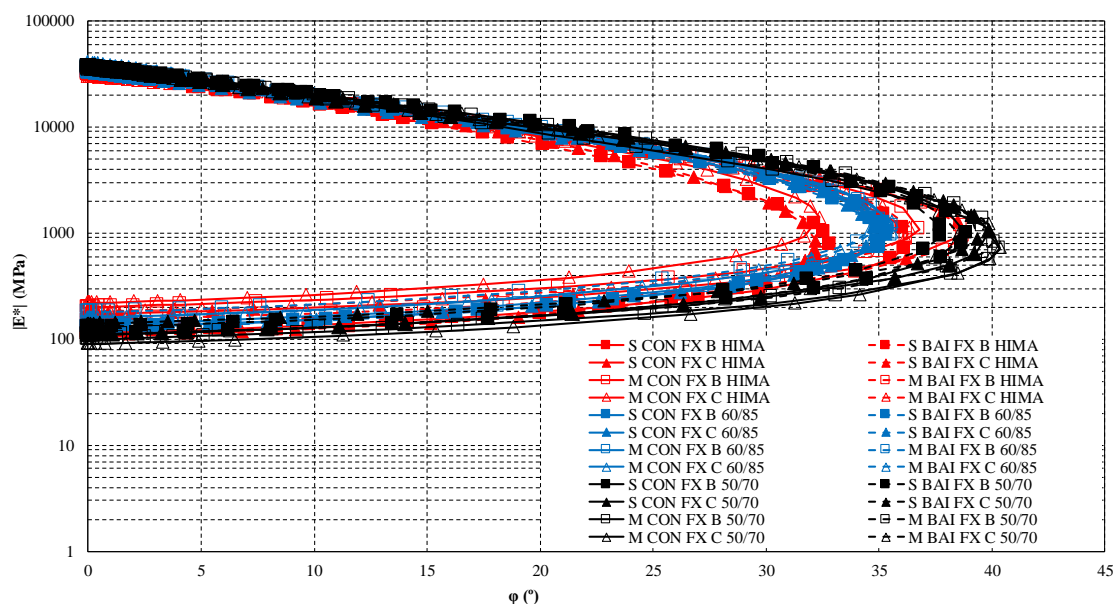
Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

As misturas com ligantes modificados apresentam ângulo de fase menor do que com ligante convencional, sendo a mistura M CON FX C HIMA apresentou os menores ângulos de fase, seguida das misturas M BAI FX B 60/85 e M BAI FX C 60/85.

Analisando cada ligante, percebe-se que as misturas Bailey apresentaram novamente os menores valores de ângulo de fase, para os ligantes CAP 50/70 e AMP 60/85. Já para o ligante HIMA, este comportamento se apresentou ao contrário, isto é, as misturas Convencionais apresentaram os menores ângulos de fase. Ainda, as misturas M BAI FX C HIMA, M CON FX B HIMA e M BAI FX B HIMA apresentaram valores de ângulo de fase semelhantes às misturas com ligante convencional, dessa forma, estão mais suscetíveis a uma parcela viscosa.

Analisando as misturas plotadas juntas, de acordo com a Figura 66, percebe-se que, assim como na interpretação individual dos métodos de dosagem, a influência na suscetibilidade do ligante asfáltico modificado. Isto é, as misturas dosadas com ligante modificado apresentaram valores menores de ângulo de fase e, conseqüentemente, tendem a apresentar uma parcela mais elástica.

Figura 66 - Diagrama de Black para todas as misturas obtidas com a modelagem 2S2P1D



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Quanto a diferença de teor de ligante promovido pelos métodos de dosagem, nota-se uma tendência das misturas dosadas na metodologia SUPERPAVE a apresentar menores ângulos de fase, de mesmo modo ao plano Cole-Cole. As maiores variações dos resultados entre as misturas ficaram com os ligantes CAP 50/70 e o HIMA, já o ligante AMP 60/85 apresentou

as menores variações nos resultados com as variações de teor de ligante de projeto e das granulometrias.

4.2.2.3 *Curvas Mestras de Módulo Dinâmico*

A análise dos dados obtidos com o ensaio de Módulo Complexo, sendo eles o Módulo Dinâmico e o Ângulo de Fase, possibilita a construção de uma curva mestra. A curva mestra de uma mistura asfáltica permite que as comparações possam ser feitas sobre qualquer faixa de temperatura e frequência, para isso utiliza-se do princípio da superposição tempo-temperatura. São transladadas as curvas isométricas em uma curva de referência, chamada de curva mestra, por meio de um modelo, neste caso, o modelo reológico 2S2P1D, associado à equação de WLF.

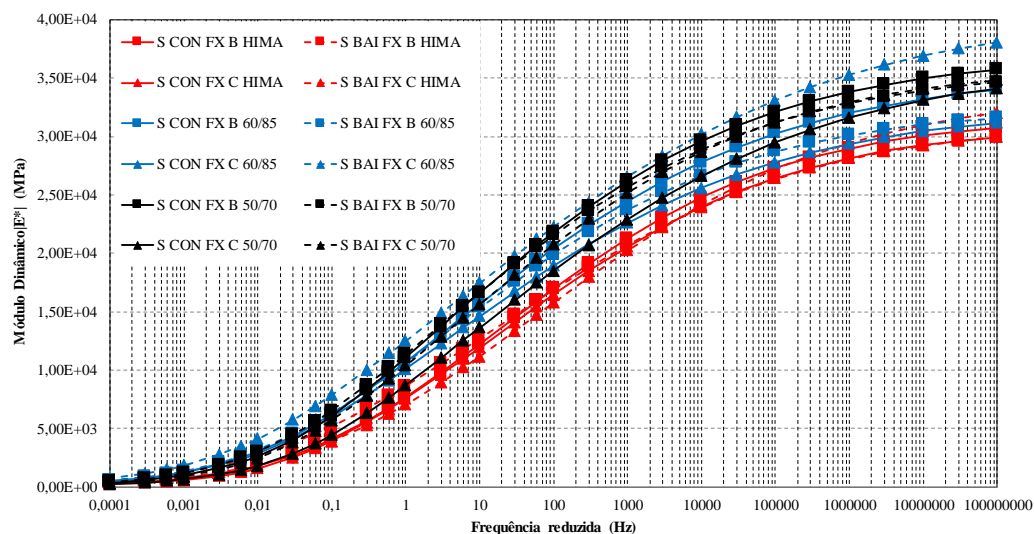
As curvas mestras do Módulo Dinâmico estão apresentadas, primeiramente, para as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE, em seguida as misturas dosadas pela metodologia Marshall e, por fim, todas as misturas plotadas juntas. Ressalta-se que, as curvas apresentadas foram modeladas pelo 2S2P1D, e estão sem os dados experimentais, sendo que a temperatura de referência é de 20°C.

Devido à suscetibilidade das misturas asfálticas, associado ao comportamento viscoelástico oriundo do ligante asfáltico, a mistura asfáltica responde de forma diferente aos carregamentos estáticos e dinâmicos. Assim, para carregamentos lentos, têm-se respostas mais viscosas, enquanto que para carregamentos rápidos, têm-se respostas elásticas, e, conseqüentemente, o módulo dinâmico tende a crescer com aumento da frequência.

Nas curvas mestras, as altas frequências estão relacionadas a uma inferência ao dano por trincamento térmico nas misturas asfálticas, porém muito incomum de acontecer no Brasil devido ao clima tropical. Por outro lado, as baixas frequências estão relacionadas a ocorrência da deformação permanente, e as temperaturas intermediárias ao dano por fadiga.

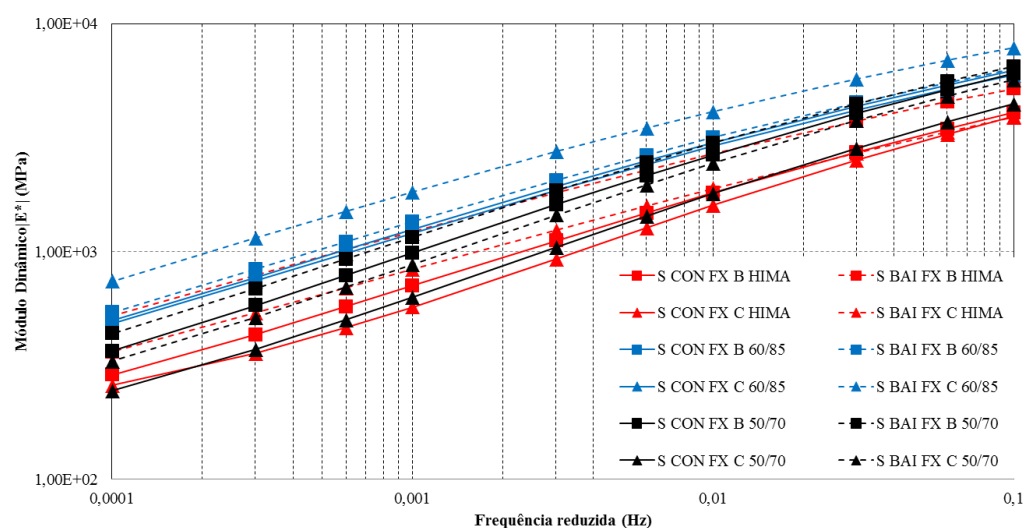
Nas Figuras 67 e 68 estão demonstradas as curvas mestras para as misturas dosadas através da metodologia SUPERPAVE, ressalta-se que as curvas foram obtidas através da modelagem 2S2P1D, ou seja, sem os dados experimentais.

Figura 67 – Curvas mestras de Módulo Dinâmico para as misturas dosadas pelo SUPERPAVE (@ 20°C)



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Figura 68 – Curvas mestras de Módulo Dinâmico para as misturas dosadas pelo SUPERPAVE (baixas frequências) (@ 20°C)



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Analisando as altas frequências, com a exceção da mistura S BAI FX C 60/85, percebe-se que as misturas com ligante convencional apresentaram os maiores valores de módulo dinâmico, já as misturas com o ligante altamente modificado HIMA apresentaram os menores valores de módulo dinâmico. Tal comportamento se justifica, pois nas altas frequências existe menor tempo de exposição à carga, e, dessa forma, acabam ocorrendo apenas deformações

elásticas no material. Assim, a alta modificação do ligante HIMA acaba absorvendo as tensões em uma maior velocidade, quando comparada com o ligante convencional.

Nota-se que nas altas frequências, o comportamento das misturas com ligante CAP 50/70 e com ligante HIMA apresentaram valores muito próximos, indicando que a variação de granulometria exerce pouca influência na rigidez. Porém, percebe-se que as misturas na Faixa Granulométrica B se apresentaram com rigidez superior quando comparadas com as misturas Faixa C, para esses ligantes. Já quanto às metodologias de enquadramento das faixas granulométricas (Bailey e Convencional), não é possível verificar uma tendência, os valores são quase equivalentes, com leve superioridade de rigidez nas misturas com o enquadramento convencional.

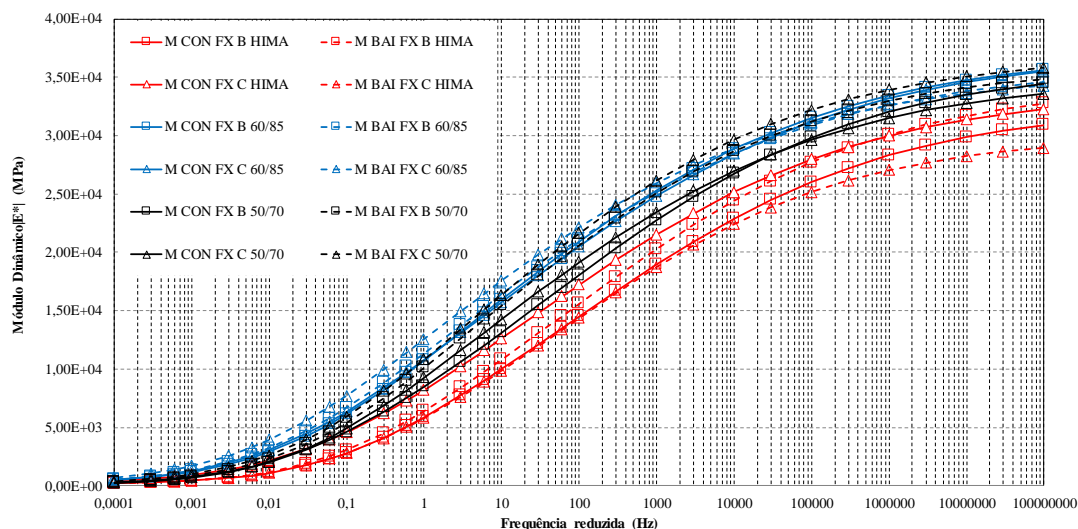
Por outro lado, as misturas com ligante AMP 60/85 apresentaram as maiores diferenças de rigidez entre as misturas. A mistura S BAI FX C 60/85 apresentou uma rigidez nas altas frequências superior a S CON FX C 60/85, em contrapartida, a mistura S CON FX B 60/85 obteve uma rigidez superior que a mistura S BAI FX B 60/85.

Analisando as baixas frequências através da Figura 68, que amplia a seção das baixas frequências da Figura 67, percebe-se que os comportamentos das misturas se invertem. As misturas com o ligante asfáltico AMP 60/85 apresentam uma rigidez superior, seguidas das misturas com ligante convencional e por final, as misturas com ligante altamente modificado (HIMA) apresentam comportamento com uma rigidez inferior.

Nas baixas frequências, nota-se que as misturas enquadradas nos parâmetros Bailey apresentaram rigidez superior às misturas enquadradas pela metodologia convencional, para cada ligante asfáltico. As misturas da Faixa Granulométrica B apresentaram maior rigidez que as misturas da Faixa Granulométrica C, com exceção da mistura S BAI FX C 60/85 que apresentou a maior rigidez nas baixas frequências.

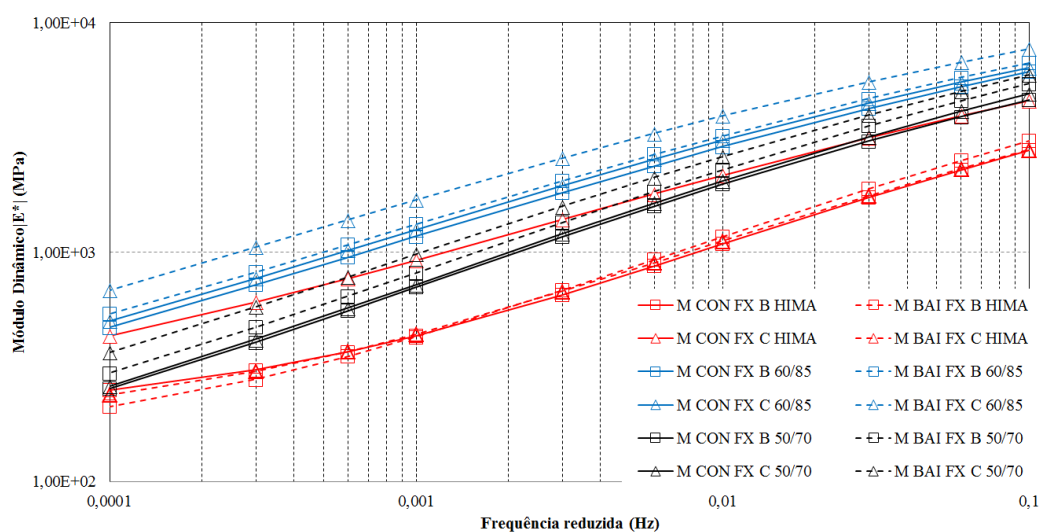
As curvas mestras de módulo dinâmico obtidas pela modelagem 2S2P1D para as misturas dosadas pela metodologia Marshall estão representadas nas Figura 69 e 70. Diferentemente do comportamento das misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE, com exceção das misturas com ligante altamente modificado, que apresentaram os mesmos valores de rigidez inferiores aos outros ligantes utilizados, os ligantes AMP 60/85 e convencional CAP 50/70 apresentaram uma sobreposição com relação a rigidez nas altas frequências. Os maiores valores de rigidez nas altas frequências foram encontrados nas misturas M BAI FX C 50/70, M CON FX B 60/85, M CON FX C 60/85 e M BAI FX B 50/70.

Figura 69 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico para as misturas dosadas pelo MARSHALL (@ 20°C)



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Figura 70 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico para as misturas dosadas pelo MARSHALL (baixas frequências) (@ 20°C)



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Para as misturas com o ligante CAP 50/70, percebe-se superioridade na rigidez das misturas nos parâmetros Bailey, e a mistura enquadrada na Faixa Granulométrica C tem valor superior à mistura na Faixa Granulométrica B. Já nas misturas com ligante modificado AMP 60/85, tal fato se inverte: nas altas frequências, as misturas enquadradas na metodologia convencional apresentaram rigidez maior que as misturas enquadradas nos parâmetros Bailey, mas à medida que há diminuição da frequência, há uma inversão e as misturas Bailey passam a apresentar rigidez superior às enquadradas na metodologia convencional.

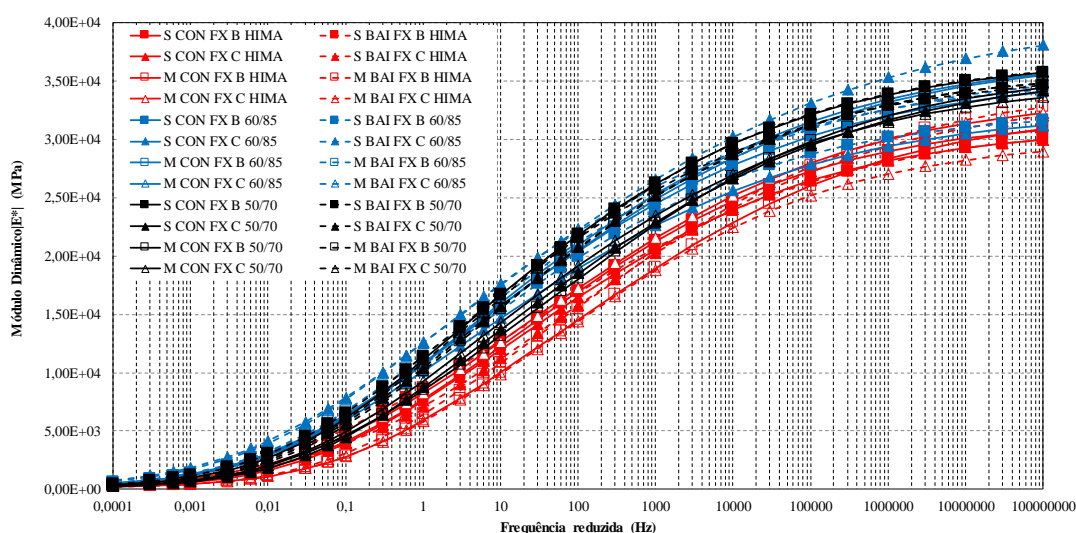
Quanto às faixas granulométricas nas altas frequências, os ligantes modificados AMP 60/85 e HIMA não apresentam tendência clara de superioridade de quaisquer faixas, pois existe sobreposição das Faixas Granulométricas B e C. No entanto, pode ser percebida leve superioridade na rigidez das misturas com Faixa Granulométrica C, com exceção da mistura M BAI FX C HIMA que apresentou a menor rigidez entre as misturas.

Nas baixas frequências, percebe-se mais efetivamente que as misturas com os parâmetros Bailey apresentaram rigidez maior, quando comparadas com as misturas com a metodologia convencional (tentativa e erro) de enquadramento granulométrico, porém, isto só acontece nas misturas com ligante asfáltico AMP 60/85 e com CAP 50/70. Já para as misturas com ligante altamente modificado HIMA, houve sobreposição das misturas nas baixas frequências, com exceção da mistura M CON FX C HIMA que apresentou comportamento superior às outras misturas do mesmo ligante.

Em relação às faixas granulométricas, novamente não se percebe grande diferença entre as granulometrias Faixa B e Faixa C das misturas com o enquadramento convencional. Para as misturas com o enquadramento nos parâmetros Bailey, apenas as misturas com os ligantes AMP 60/85 e CAP 50/70 apresentaram superioridade nas misturas da Faixa C.

Por fim, a Figura 71 demonstra as curvas mestras obtidas na modelagem 2S2P1D das misturas Marshall e SUPERPAVE juntas, permitindo assim, analisar os métodos de dosagem quanto ao comportamento viscoelástico.

Figura 71 – Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas SUPERPAVE e Marshall (@20°C)



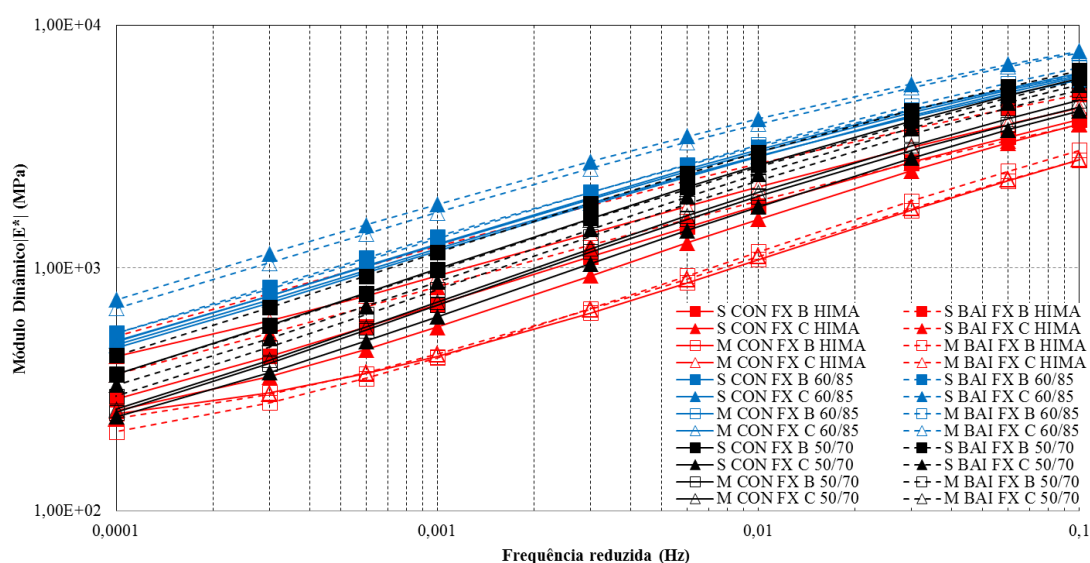
Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Nas altas frequências, não se percebe superioridade de um método para o outro, porém, algumas misturas se comportam de modo diferente dentro de um mesmo ligante, as misturas S BAI FX C 60/85, S BAI FX C 60/85 e S CON FX C 60/85 apresentaram, nas altas frequências, as maiores variações de módulo dinâmico quando comparadas com as misturas do mesmo ligante asfáltico utilizado. Nas altas frequências, com exceção das misturas já mencionadas do ligante AMP 60/85, nota-se sobreposição entre as misturas com ligante CAP 50/70 e o AMP 60/85. As misturas com o ligante altamente modificado HIMA apresentaram os menores módulos dinâmicos, isto é, se apresentaram menos rígidas.

Como as análises nas altas frequências correspondem às baixas temperaturas, e estão relacionadas a avaliação ao dano por trincamento térmico nas misturas asfálticas (incomum no Brasil, devido ao clima), os resultados indicam que as misturas asfálticas com ligante asfáltico AMP 60/85 e o ligante CAP 50/70 possuem comportamento semelhante. Porém, os ligantes convencionais apresentam grande suscetibilidade à temperatura, comportamento herdado pela mistura, assim, deve-se ter cuidado ao analisar a semelhança entre o comportamento do ligante convencional e do ligante modificado AMP 60/85.

Porém, de acordo com a Figura 72, analisando baixas frequências, relacionadas às altas temperaturas, percebe-se nitidamente que, abaixo da frequência de 10Hz, há um aumento na rigidez das misturas com ligante asfáltico AMP 60/85. Dessa forma, estas misturas passam a apresentar comportamento diferente das misturas com ligante CAP 50/70.

Figura 72 - Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas SUPERPAVE e Marshall (baixas frequências) (@20°C)



Tanto nas baixas frequências como nas altas frequências, não é perceptível influência da variação do teor de ligante pela diferença dos métodos de dosagem na rigidez das misturas asfálticas. Considerando o mesmo ligante asfáltico utilizado, observa-se sobreposição das curvas das misturas asfálticas dosadas pelas metodologias Marshall e SUPERPAVE. Vale ressaltar que, principalmente nas baixas frequências, as misturas com o enquadramento granulométrico dentro dos parâmetros Bailey apresentaram maior rigidez quando comparadas às misturas com o enquadramento granulométrico convencional (tentativa e erro).

Por fim, é notável que o fator de maior influência na rigidez das misturas asfálticas em estudo foi o tipo de ligante asfáltico utilizado, corroborando com a regressão linear múltipla realizada. Apesar de o modelo da regressão explicar apenas 67% dos fatores, foi apresentado que somente o PG de alta temperatura e o ponto de amolecimento apresentam relação estatística com o módulo dinâmico, ou seja, o tipo de ligante asfáltico tem influência significativa nos resultados.

A melhora da rigidez das misturas asfálticas com ligante asfáltico modificado por polímero nas altas temperaturas também foi confirmada por Bruxel (2015), Nascimento (2015), Centofante (2016), Bohn (2017) e Faccin (2018). Para Bruxel (2015) e Faccin (2018), as misturas com ligante TLA e TLA Flex apresentaram os maiores valores de módulo dinâmico, seguidas das misturas com ligante AMP 60/85. Já para Centofante (2016) e Bohn (2017), apesar da incorporação de fresado, as misturas que apresentaram maiores valores de rigidez foram as misturas com o ligante asfáltico AMP 60/85, vale ressaltar que as autoras utilizaram o mesmo ligante convencional utilizado nesta pesquisa.

Em contrapartida, Nascimento (2015) em sua tese de doutorado, encontrou os maiores valores de módulo dinâmico para as misturas: CAP 15/25 e HM (*High Modulus*), seguidos da mistura com ligante HIMA para as baixas frequências (altas temperaturas). A mistura com CAP 15/25 não é modificada, mas trata-se de um CAP duro; já o ligante HM e o HIMA são ligantes modificados, sendo o primeiro um ligante de alto módulo e o HIMA um ligante altamente modificado. Ressalta-se que o autor também utilizou uma mistura com ligante AMP 60/85 e ligante convencional (CAP 50/70), e encontrou valores de rigidez inferior às misturas com ligante HIMA, diferentemente dos resultados encontrados nesta pesquisa.

De certa forma, quanto maior a rigidez da mistura melhor a distribuição das tensões que a camada de revestimento transfere para as camadas subjacentes, sendo assim, as misturas asfálticas que obtiveram ganho de rigidez com o ligante AMP 60/85, em especial nas temperaturas mais altas, podem contribuir com o aumento da vida útil da estrutura do

pavimento. Estas misturas serão melhores avaliadas nas questões de dano por fadiga e pela deformação permanente nos tópicos mais adiante.

4.2.2.4 *Curvas Mestras de Ângulo de Fase*

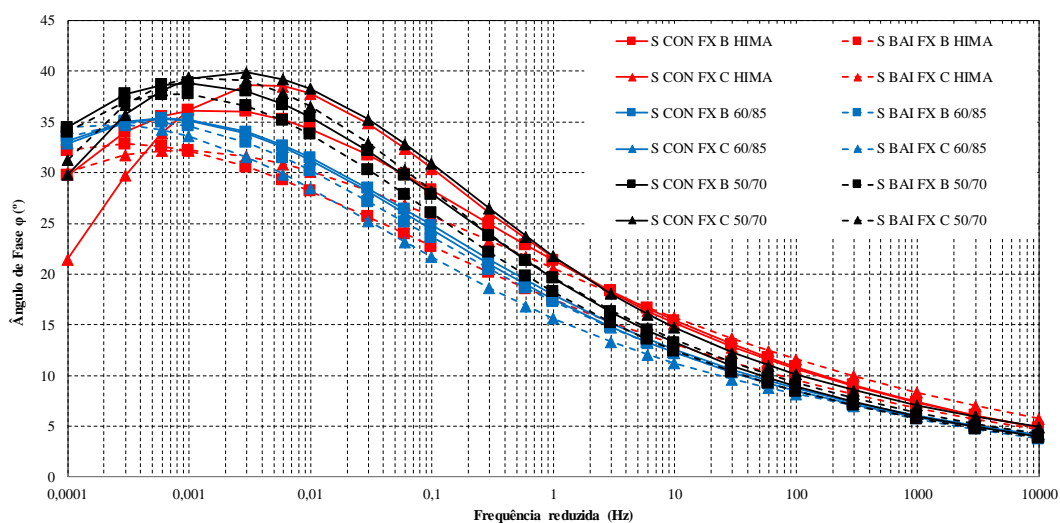
Assim como as curvas mestras do módulo dinâmico apresentam uma caracterização geral da rigidez da mistura asfáltica em relação a frequência de aplicação de carga e temperatura de ensaio, as curvas mestras de ângulo de fase também o fazem. O ângulo de fase está relacionado às propriedades elásticas e viscosas dos materiais asfálticos, o que o torna um parâmetro frequentemente utilizado para avaliar o efeito da modificação por polímero.

Ressalta-se que, a baixas temperaturas, o comportamento dos materiais viscoelásticos lineares homogêneos tende à elasticidade, representado no ângulo de fase por $\varphi=0$. Já para as altas temperaturas, o comportamento tende à viscosidade, ou seja, representado por $\varphi=90^\circ$. Este comportamento é válido para os ligantes asfálticos, mas no caso das misturas asfálticas, que é um material compósito, o intertravamento dos agregados impede que isto ocorra. Assim, o que acontece é que, nas frequências baixas (temperaturas altas) a defasagem do ângulo de fase aumenta, enquanto nas frequências mais altas (temperaturas baixas) acontece o inverso.

Os resultados de curva mestra de ângulo de fase seguem o mesmo protocolo apresentado, primeiramente são demonstradas as curvas mestras obtidas na modelagem 2S2P1D das misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE, em seguida as curvas mestras obtidas na modelagem 2S2P1D das misturas Marshall, e por fim, ambas plotadas juntas.

A Figura 73 demonstra as curvas mestras de ângulo de fase das misturas dosadas através da metodologia SUPERPAVE. Percebe-se que para quase todo o espectro de frequência, os menores valores de ângulo de fase foram das misturas com o ligante AMP 60/85, representando maior elasticidade. Os maiores valores de ângulo de fase, principalmente nas frequências abaixo de 10Hz, foram das misturas com o ligante asfáltico CAP 50/70, já nas frequências acima de 10Hz, percebe-se uma tendência das misturas com o ligante HIMA apresentarem os maiores valores de ângulo de fase.

Figura 73 – Curvas mestras de ângulo de fase para misturas dosadas pelo SUPERPAVE (@20°C)



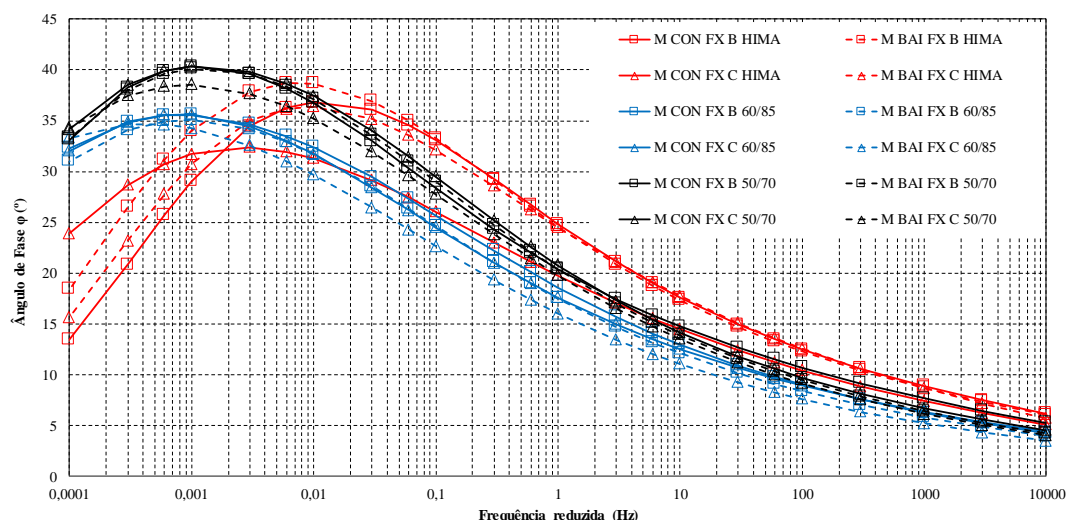
Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Para as misturas com ligante modificado, tanto o AMP 60/85 e HIMA, as misturas com o enquadramento da faixa granulométrica dentro dos parâmetros Bailey apresentam os menores valores de ângulo de fase. Nas frequências abaixo de 0,01Hz, as misturas S BAI FX B HIMA e S BAI FX C HIMA apresentaram os menores ângulos de fase, e, nas frequências acima de 0,01Hz, as misturas S BAI FX B 60/85 e S BAI FX C 60/85 apresentaram os menores valores.

Ressalta-se que as misturas S CON FX B HIMA e S CON FX C HIMA se demonstraram com os valores de ângulo de fase equivalentes às misturas com o ligante convencional. Ou seja, maiores valores de ângulos de fase, o que indica que tais misturas podem apresentar problemas de resistência à deformação permanente, devido ao comportamento mais viscoso da mistura.

Na Figura 74 estão as curvas mestras das misturas dosadas através da metodologia Marshall, verifica-se que o comportamento das misturas asfálticas com o ligante AMP 60/85 se mostram semelhantes aos das misturas dosadas com a metodologia SUPERPAVE, apresentando, dentro de todo o espectro de frequência, os menores ângulos de fase. Em contrapartida, as misturas com o ligante altamente modificado HIMA, com exceção da mistura S CON FX C HIMA (que apresentou valores de ângulo de fase semelhante às misturas com ligante AMP 60/85), obtiveram os maiores valores de ângulo de fase, ultrapassando até as misturas com o ligante convencional CAP 50/70.

Figura 74 - Curvas mestras de ângulo de fase para misturas dosadas pelo Marshall (@20°C)



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

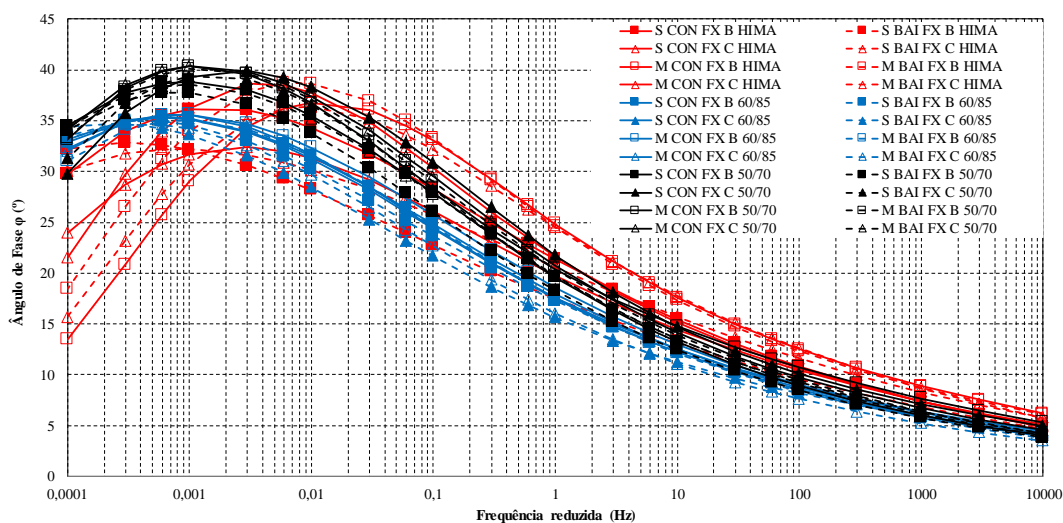
A tendência das misturas nos parâmetros Bailey apresentarem os menores valores de ângulo de fase para as misturas asfálticas com ligante AMP 60/85 e CAP 50/70 se confirma para as misturas dosadas na metodologia Marshall.

Nota-se que as misturas com o ligante HIMA, além de apresentarem os maiores ângulos de fase, mostram inversão de comportamento nas frequências abaixo de 0,01 Hz. Este fato pode ser justificado pelo deslocamento dos pinos de fixação dos LVDT's, pois este nível de frequência está relacionado às altas temperaturas (37°C e 54°C). Nestas temperaturas específicas, houve certa dificuldade de realizar as leituras devido a maior quantidade de ligante ao redor da amostra, que causava à queda sucessiva dos pinos de fixação dos LVDT's.

Analisando todas as misturas asfálticas juntas, conforme demonstra a Figura 75, verifica-se para as misturas com ligante CAP 50/70 e AMP 60/85 que não há grande variação do ângulo de fase com o aumento do teor de ligante de projeto (consequência do método de dosagem Marshall) considerando a mesma mistura.

A maior variação de ângulo de fase entre os métodos de dosagem foi apresentada pelas misturas com o ligante asfáltico HIMA, as quais apresentaram maior valor do ângulo de fase para misturas com maior teor de ligante. Assim, as misturas dosadas através da metodologia SUPERPAVE, que, conseqüentemente, apresentam menor teor de ligante e menores valores nos ângulos de fase, tendem a um comportamento mais elástico quando comparadas com as mesmas misturas com o mesmo ligante asfáltico.

Figura 75 - Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas SUPERPAVE e Marshall (@20°C)



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

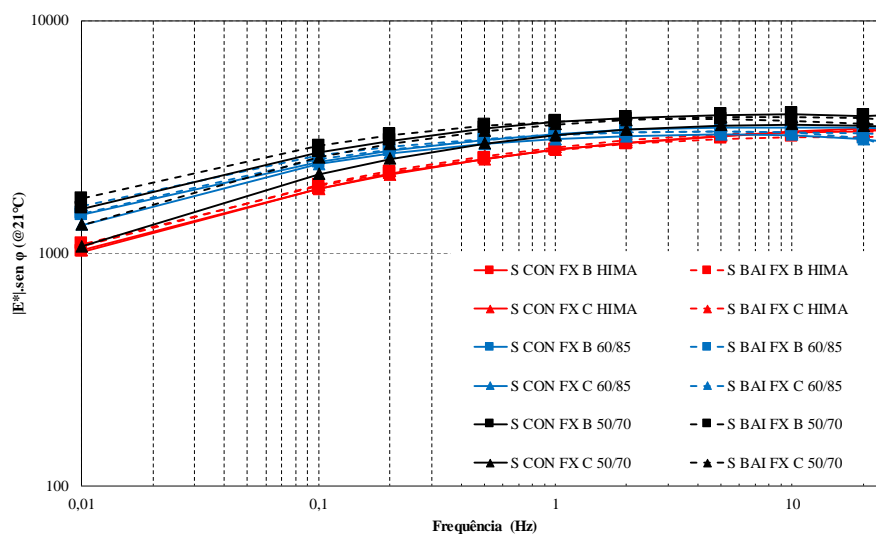
4.2.2.5 Obtenção de Indicador de Resistência à Fadiga e à Deformação Permanente

Com os dados obtidos no ensaio de Módulo Complexo é possível realizar uma inferência de resistência à fadiga e à deformação permanente. É realizado do mesmo modo que para os ligantes asfálticos, com alguns cuidados, associando-se as relações $|E^*|. \text{sen } \varphi$ e $|E^*|/\text{sen } \varphi$ com o desempenho à fadiga e deformação permanente, respectivamente. Não espera é esperada uma quantificação dos valores, mas sim, uma qualificação entre as misturas, e ressalta-se que o estudo da viscoelasticidade linear, não é um indicativo direto de dano, todavia estas correlações das propriedades podem ser utilizadas.

O mesmo protocolo para demonstrar os resultados das inferências será seguido, ou seja, primeiro as misturas dosadas através da metodologia SUPERPAVE, em seguida as misturas dosadas pela metodologia Marshall e por fim todas as misturas plotadas juntas. Como são duas análises (fadiga e deformação permanente), primeiramente, serão demonstradas e comentadas as inferências de resistência à fadiga e por fim as inferências de resistência à deformação permanente.

A Figura 76 demonstra para a temperatura de 21°C as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE. As verificações dos indicadores são realizadas nas altas frequências, entre 1Hz e 25Hz, e quanto menores forem os valores de $|E^*|. \text{sen } \varphi$, melhor tende a ser o comportamento da mistura frente à fadiga.

Figura 76 – Inferência à fadiga a 21 °C das misturas dosadas pelo SUPERPAVE



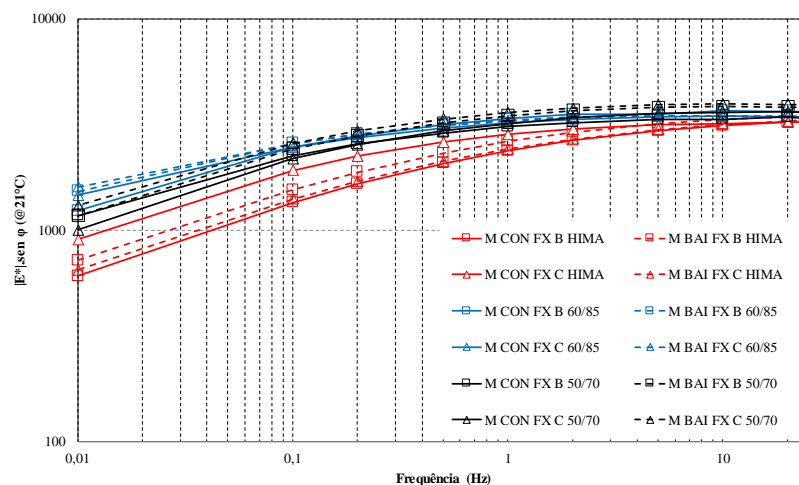
Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

É nítida a influência positiva da modificação dos ligantes, uma vez que ambas as misturas com modificação do ligante asfáltico apresentam os menores valores de $|E^*|.sen \phi$ para as misturas dosadas através da metodologia SUPERPAVE, indicando que estas misturas são mais resistentes ao dano por fadiga. Portanto, a modificação por polímero de ligantes asfálticos melhora o comportamento a fadiga, o que condiz com a literatura.

Nas frequências de 1Hz a 10Hz, as misturas com o ligante HIMA apresentaram os menores valores, já acima de 10 Hz, existe uma inversão de comportamento, e as misturas com ligante AMP 60/85 apresentam os menores valores. Não é possível verificar uma influência das faixas granulométricas nas misturas com ligante modificado, já para o ligante asfáltico convencional, a mistura S CON FX C 50/70 mostrou melhor comportamento frente à fadiga, quando comparada com as outras misturas com o mesmo ligante asfáltico.

A Figura 77 demonstra os indicadores do comportamento à fadiga das misturas dosadas através da metodologia Marshall. Como é verificado, o ligante asfáltico HIMA apresentou melhor comportamento frente a inferência à fadiga. Novamente, não se verifica influência das faixas granulométricas para ambos os ligantes asfálticos modificados por polímero, entretanto, nas misturas asfálticas com ligante CAP 50/70 duas misturas apresentaram comportamento semelhante aos das misturas com ligante AMP 60/85, são elas: M CON FX B 50/70 e M CON FX C 50/70, tal comportamento não era esperado.

Figura 77 – Inferência à fadiga a 21 °C das misturas dosadas pelo Marshall

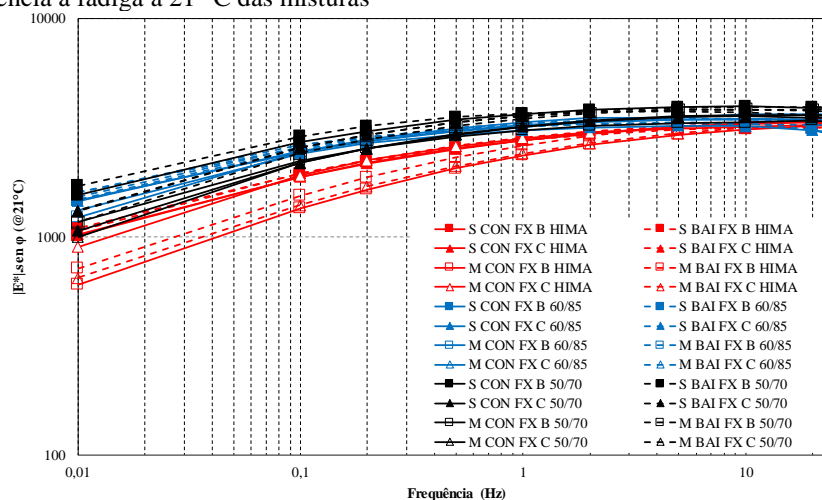


Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Por fim, na Figura 78 estão demonstradas todas as misturas juntas (SUPERPAVE e Marshall). Verifica-se que o aumento no teor de ligante devido a diferença do método de dosagem, não representou melhora no comportamento das misturas. Assim, as misturas dosadas através da metodologia SUPERPAVE apresentaram resistência superior ao fenômeno de fadiga.

Ressalta-se que estas análises são apenas para procurar um indicador, podendo, ou não, serem consideradas coerentes apenas com a realização do ensaio. Estas observações reforçam a importância da realização de ensaios de dano, pois misturas semelhantes na rigidez podem apresentar resistência diferentes perante ao dano, seja ele, por fadiga como foi apresentado, ou pela deformação permanente que será apresentado em seguida.

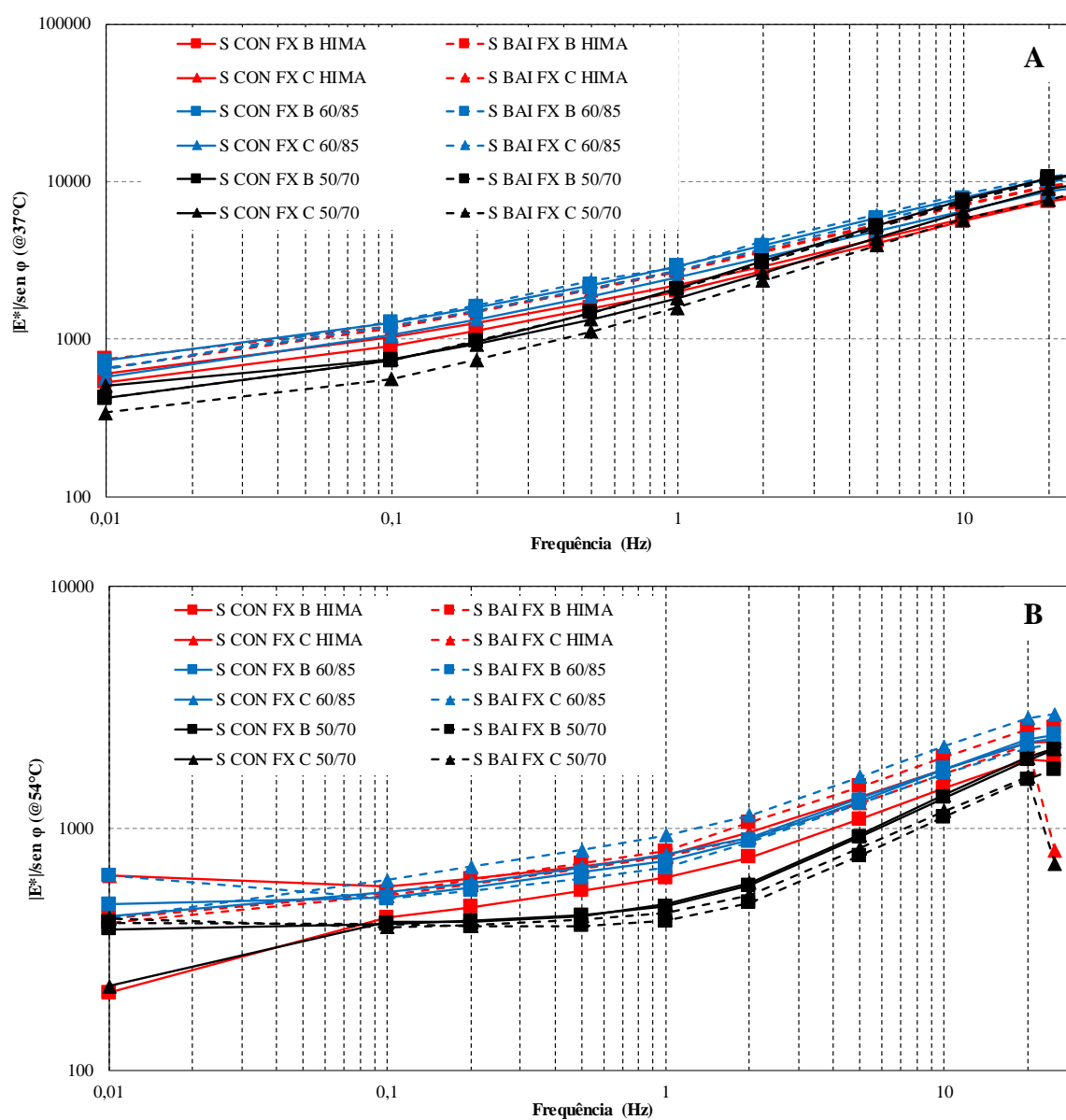
Figura 78 - Inferência à fadiga a 21 °C das misturas



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Na Figura 79 estão os indicadores à deformação permanente das misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE nas duas temperaturas, e verifica-se que os maiores valores de $|E^*|/\text{sen } \phi$ ficaram com ambas as misturas asfálticas com ligante modificado, com leve superioridade das misturas com ligante asfáltico AMP 60/85. Nota-se ainda, que as misturas com o enquadramento granulométrico dentro dos parâmetros Bailey apresentaram os maiores valores $|E^*|/\text{sen } \phi$, indicando dessa forma que são mais resistentes a deformação permanente.

Figura 79 – Inferência à deformação permanente das misturas dosadas através do SUPERPAVE nas temperaturas de 37 °C (a) e 54 °C (b)



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

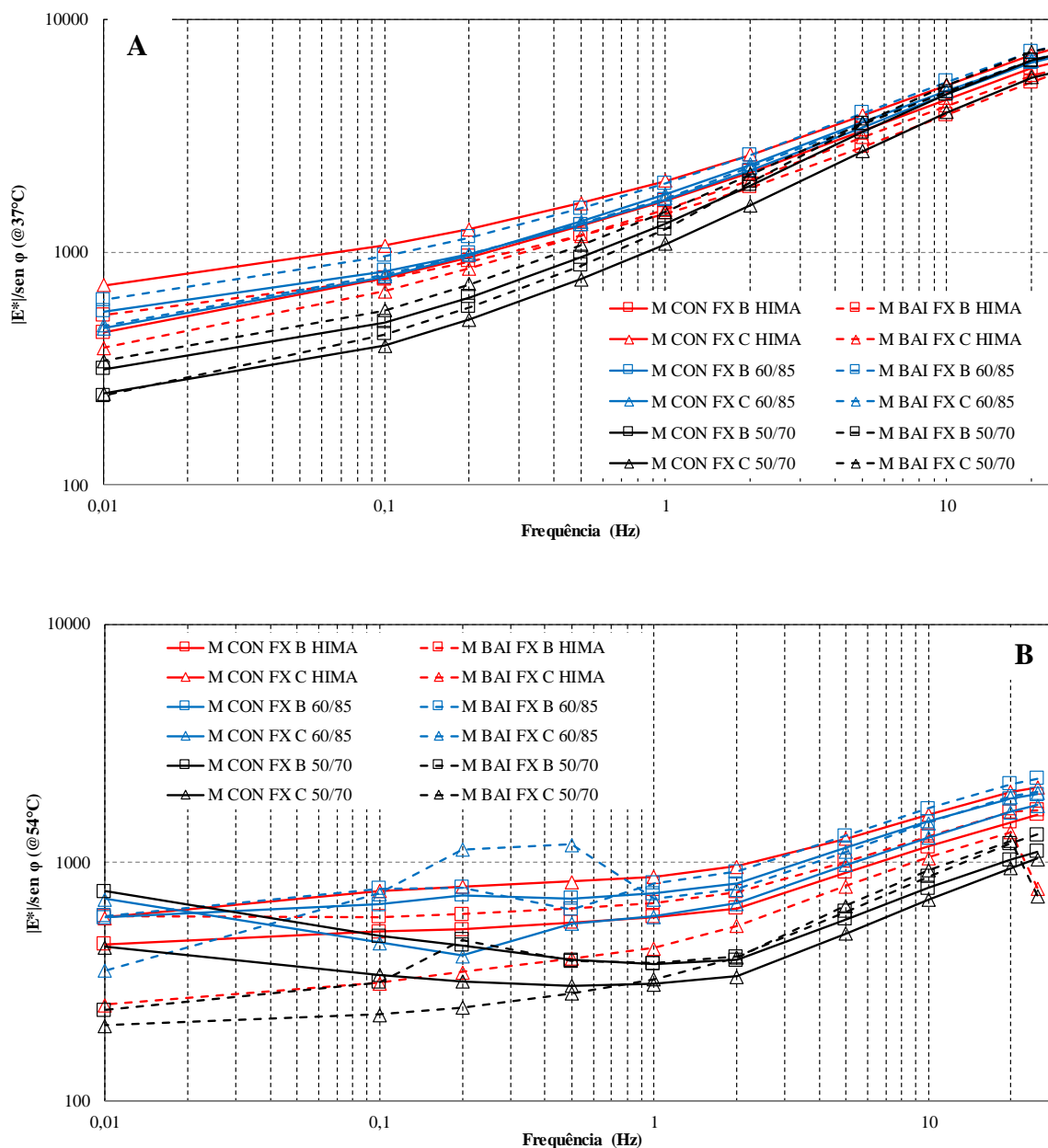
Diferentemente da fadiga, os indicadores à deformação permanente são realizados nas baixas frequências (1 a 0,01 Hz), e quanto maior o valor de $|E^*|/\sin \phi$, melhor será o comportamento à deformação permanente. As inferências à deformação permanente usualmente são realizadas na temperatura de 54°C, mas devido à dificuldade de medir o ângulo de fase nesta temperatura (queda sucessiva dos pinos), será apresentada a inferência utilizando como base além da temperatura de 54°C, a temperatura de 37°C.

Como pode ser verificado através da Figura 80, o mesmo comportamento apresentado pelas misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE, são vistos nas misturas dosadas pela metodologia Marshall. Isto é, as misturas asfálticas com ligantes modificados apresentam os maiores valores de $|E^*|/\sin \phi$, quando comparadas com as misturas com ligante asfáltico convencional.

Diferentemente das misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE, não se verifica superioridade das misturas com os parâmetros Bailey para as misturas dosadas pela metodologia Marshall, existe uma sobreposição das misturas Bailey e Convencional. Em contrapartida, com a exceção da mistura M CON FX C HIMA que apresentou os maiores valores de $|E^*|/\sin \phi$ em todo o espectro de frequência, as misturas enquadradas na Faixa Granulométrica B apresentaram valores superiores quando comparadas com as misturas com faixa C.

O aumento no teor de ligante de projeto nas misturas dosadas pelo método Marshall, devido a diferença de compactação nos métodos de dosagem, ocasionou maior variabilidade dos resultados do que as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE. Foi verificada uma grande incoerência nos resultados da inferência à deformação permanente na temperatura de 54°C (Figura 80), o que não aconteceu de forma tão contrastante nas misturas dosadas pelo SUPERPAVE. Pode-se atribuir a causa desta incoerência ao excesso de ligante juntamente com a alta temperatura, exatamente as circunstâncias em que houve o descolamento dos pinos de fixação dos LVDT's, para cessar este problema uma solução é passar no esmeril a seção onde é feita a colagem dos pinos de fixação, fazendo com que esse excesso de ligante diminua.

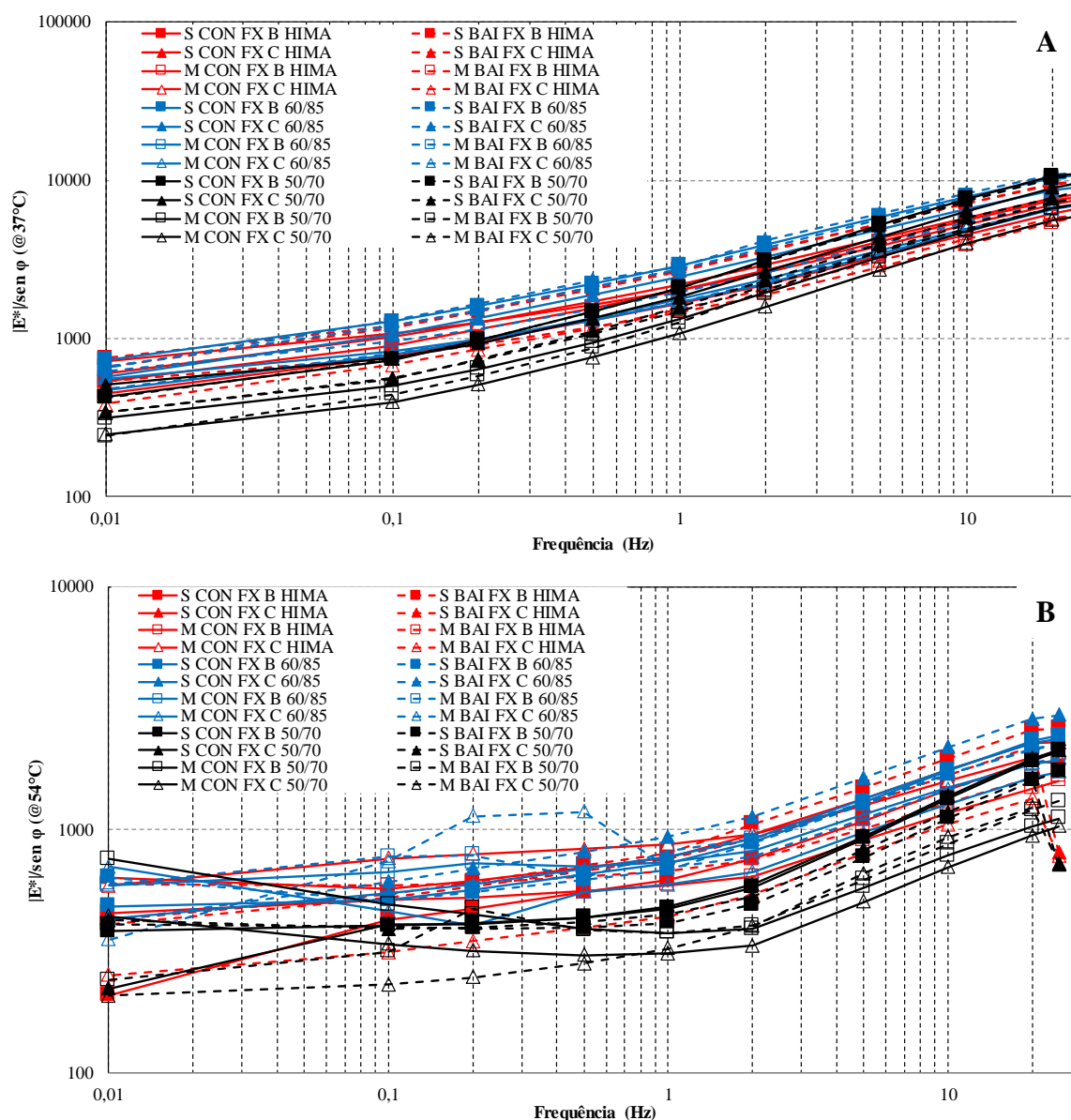
Figura 80 - Inferência à deformação permanente das misturas dosadas através do Marshall nas temperaturas de 37 °C (a) e 54 °C (b)



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Ao analisar todas as misturas plotadas juntas, conforme pode ser visualizado na Figura 81, nota-se que para as misturas com os ligantes asfálticos AMP 60/85 e HIMA existe sobreposição dos resultados. Porém, pode-se verificar uma tendência das misturas dosadas pelo SUPERPAVE serem mais resistentes ao afundamento em trilha de roda que as misturas dosadas pelo Marshall, quando comparado separadamente cada ligante asfáltico. Esta superioridade das misturas dosadas pelo SUPERPAVE é mais evidente para as misturas com o ligante convencional CAP 50/70.

Figura 81 - Inferência à deformação permanente a 37 °C (a) e 54 °C (b) das misturas



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Ressalta-se que, assim como indicadores à fadiga, e à deformação permanente será comentada no próximo item (4.3 Propriedades de Resistência), com os resultados obtidos propriamente com os ensaios de dano nas misturas (*Flow Number* e *Fadiga*).

4.3 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA

As propriedades de resistência das misturas asfálticas são de fundamental importância, assim como as propriedades de deformabilidade, pois ambas trabalham juntas na vida da

estrutura de um pavimento. Na abordagem mecanística, as tensões, deformações e deslocamentos são comparados entre si como critérios de dimensionamento para evitar os principais defeitos, como por exemplo: trincamento por fadiga e deformação permanente. Estes critérios são estabelecidos pelos valores limites de resistência dos materiais (MOTTA, 1991).

Sabe-se que os defeitos mais presentes em pavimentos asfálticos são o trincamento por fadiga e a deformação permanente, e, as cargas usadas no ensaio de fadiga são determinadas a partir do ensaio de resistência à tração. Para caracterização das misturas na deformação permanente, o ensaio mais utilizado é o ensaio de *creep* dinâmico (*Flow Number*). Ambos ensaios são necessários para permitir a caracterização do comportamento mecânico das misturas asfálticas.

4.3.1 Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral e Indicadores de Desempenho das Misturas Asfálticas

O parâmetro de Resistência à Tração tem se mostrado muito importante na caracterização de misturas asfálticas. A Resistência à Tração por Compressão Diametral, por exemplo, torna-se importante devido à dificuldade de se obter resistência à tração direta. Esta importância passa simplesmente pela popularidade deste ensaio, onde se tem facilidade e rapidez na execução do mesmo, além de contar ainda, com o fato de utilizar amostras cilíndricas, que são de fácil obtenção.

Neste sentido, fez-se uso de duas metodologias para execução do ensaio: a primeira, utilizando os mesmos corpos de prova do Módulo de Resiliência, sendo rompidos sem leitura de deslocamento, metodologia normalmente empregada; e a segunda, utilizando dos corpos de prova do Módulo Complexo, que foram rompidos no ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral com medidas de deslocamento vertical e força, a cada 0,01 segundo, calculando então os parâmetros.

Realizou-se a aplicabilidade das metodologias apresentadas em duas etapas, pois, quando os corpos de prova do Módulo de Resiliência foram rompidos, a metodologia para medir o deslocamento vertical e a força ainda não estava implantada no grupo GEPPASV (Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária). Após a implantação, utilizou-se, conforme comentado na própria metodologia, os corpos de prova do Módulo Complexo com volume de vazios de 5,5% para o cálculo dos indicadores, para posteriormente verificar as correlações com os resultados obtidos por meio do ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico, demonstrados no item subsequente.

A Tabela 22 mostra a média de três corpos de prova (Módulo de Resiliência) por mistura ensaiada à compressão diametral, na temperatura de 25°C (condicionados por no mínimo 12 horas), e seus respectivos desvios-padrões e coeficientes de variação.

Primeiramente nota-se alguns Coeficiente de Variação (CV) acima de 10%. São eles: S CON FX C 50/70, S BAI FX B 60/85 e M BAI FX C 50/70. No entanto, são valores aceitáveis, sendo o maior com a mistura M BAI FX C 50/70 de 12,12%. Já as misturas dosadas pela metodologia Marshall obtiveram valores de CV maior do que as misturas dosadas com a metodologia SUPERPAVE, com exceção das S CON FX C 50/70, S BAI FX B 60/85 e S CON FX C HIMA.

Tabela 22 – Valores de RT, Desvio Padrão e Coeficiente de Variação das amostras de Módulo de Resiliência

MISTURAS	MEDIA (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	MISTURAS	MEDIA (MPa)	SD (MPa)	CV (%)
S CON FX B 50/70	2,265	0,113	4,969	M CON FX B 50/70	2,035	0,115	5,627
S BAI FX B 50/70	2,348	0,163	6,925	M BAI FX B 50/70	2,148	0,153	7,128
S CON FX C 50/70	2,239	0,240	10,723	M CON FX C 50/70	1,963	0,161	8,218
S BAI FX C 50/70	2,247	0,183	8,130	M BAI FX C 50/70	1,907	0,231	12,127
S CON FX B 60/85	2,616	0,207	7,916	M CON FX B 60/85	3,070	0,258	8,402
S BAI FX B 60/85	2,917	0,325	11,131	M BAI FX B 60/85	3,124	0,176	5,634
S CON FX C 60/85	2,458	0,162	6,590	M CON FX C 60/85	2,845	0,022	0,769
S BAI FX C 60/85	2,788	0,075	2,700	M BAI FX C 60/85	3,061	0,121	3,944
S CON FX B HIMA	2,365	0,014	0,602	M CON FX B HIMA	2,409	0,030	1,258
S BAI FX B HIMA	2,361	0,010	0,429	M BAI FX B HIMA	2,337	0,054	2,326
S CON FX C HIMA	2,366	0,017	0,729	M CON FX C HIMA	2,474	0,010	0,405
S BAI FX C HIMA	2,430	0,020	0,839	M BAI FX C HIMA	2,486	0,052	2,111

Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Os valores limites para a Resistência à Tração são preconizados pelas normas DNIT – ES 31/2006 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço e pela DNER - ES 385/99 - Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero. A norma DNIT – ES 31/2006 especifica que a resistência à tração deve ser maior que 0,65 MPa para ligantes convencionais. Já na norma DNER - ES 385/99 o valor do RT deve se encaixar dentro da variação de 0,7 a 1,2 MPa para concretos asfálticos com ligantes modificados por polímero. Por outro lado, Bernucci *et al.* (2008) demonstra valores típicos para misturas asfálticas a quente recém moldadas na média entre 0,5 e 2,0 MPa, já para misturas com módulo elevado, por sua vez, dada a consistência mais dura do ligante, o valor fica na ordem de 2,0 a 3,0 MPa.

Nota-se que, para todas as misturas os valores de RT ficaram acima de 2,0 MPa, inclusive as misturas com ligante convencional (50/70). Pesquisas realizadas na região de Santa

Maria/RS, com diversos agregados e ligantes não obtiveram valores semelhantes. Como exemplo, Rossato (2015) avaliou agregado de origem em Itaara/RS (Riodacito) com ligante 50/70 e AMP 60/85, e encontrou valores para misturas confeccionadas com ligante 50/70 de 1,06 MPa e para as misturas com o ligante 60/85 de 1,58 MPa, ambas misturas enquadradas na Faixa C, e altos teores de ligante devido à alta absorção do agregado.

Bruxel (2015) realizou a pesquisa com agregados de origem em Santo Antônio da Patrulha/RS (Dacito), com ligantes convencional e modificados (AMP TLA, AMP TLA Flex e AMP 60/85), com ambas as misturas enquadradas na Faixa C do DNIT. Os valores encontrados foram: CAP 50/70 (1,15 MPa), AMP 60/85 (1,67 MPa), AMP TLA (1,69 MPa) e com AMP TLA Flex (2,37 MPa). Paniz (2018) encontrou os mesmos 2,37 MPa em uma mistura com ligante 30/45 em uma amostra com agregado de origem em Itaara/RS.

Centofante (2016) estudou misturas recicladas a quente com ligante 50/70, e encontrou valores de 1,42, 1,79, 2,08 e 2,36 MPa, respectivamente para misturas de referência (0% de adição de reciclagem), 10% de reciclagem, 20% de reciclagem e 30% de adição de material reciclado. Já Bohn (2016) estudou as misturas recicladas mornas com ligante 50/70 e AMP 60/85 e adição de 25% e 50% de material fresado, e encontrou os valores mais próximos desta pesquisa com as misturas mornas com 25% de adição de fresado (CAP 50/70 2,01MPa e AMP 60/85 2,32MPa) e 50% (CAP 50/70 2,64MPa e AMP 60/85 2,99MPa).

Percebe-se a superioridade dos valores das misturas encontrados nesta pesquisa, quando comparadas as outras misturas asfálticas. Este fator pode estar condicionado à estrutura mineral, com alto nível de intertravamento e à própria mineralogia do agregado. Para que houvesse um entendimento sobre os principais fatores que influenciam na resistência à tração, realizou-se, assim como nos outros ensaios, uma regressão linear múltipla para verificar quais fatores de fato influenciaram no resultado, observando novamente que, o modelo não vem a ser o objetivo da regressão, e, sim o entendimento das variáveis significativas que compõe este estudo.

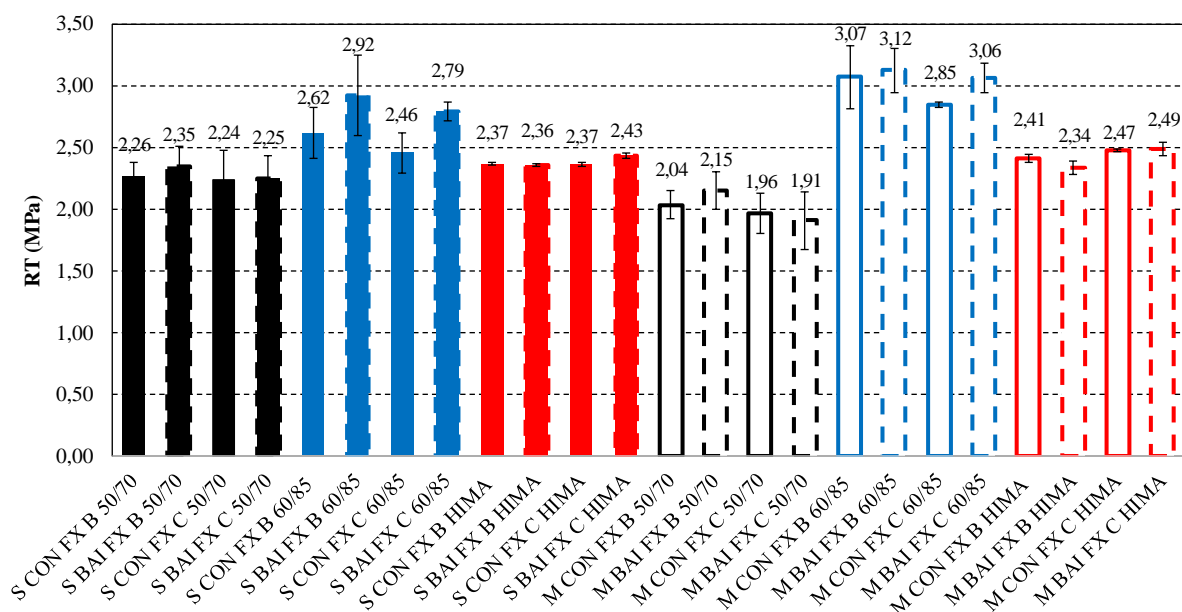
Para a realização da regressão, utilizou-se da variável dependente, Resistência à Tração, e das principais variáveis independentes: para a fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/4, passante na peneira 3/8, passante na peneira #4 e o passante na peneira #200), e para a fração do ligante asfáltico (PG de alta temperatura, teores de ligante de projeto, $|G^*|_{sen(\delta)}$ na temperatura de 19°C, $|G^*|_{sen(\delta)}$ do ligante virgem, $|G^*|_{sen(\delta)}$ após RTFOT, penetração e ponto de amolecimento). Utilizou-se também do software IBM SPSS Statistics para a seleção das variáveis que influenciam efetivamente pois, como são muitas variáveis, algumas poderiam não ter influência e apenas confundir os dados evidenciados na regressão. Foram utilizados os dados brutos de todos os ensaios, ou seja, não

as médias, e realizou-se junto com a regressão linear múltipla, o método de variância ANOVA (Analysis of Variance) para verificar a influência das variáveis independentes. Após o tratamento dos dados pelo software, realizou-se a regressão linear múltipla com as seguintes variáveis independentes: para a fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/8 e o passante na peneira #200), e para a fração do ligante asfáltico (PG de alta temperatura e o $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ do ligante virgem).

O modelo apresentou um R^2 ajustado de 0,70, indicando um bom ajuste da reta, mas como o objetivo não é o modelo, e sim, a realização no intuito de verificar a significância das variáveis no resultado do ensaio, as únicas variáveis que apresentaram significância ($\rho < 0,05$) foram o PG de alta temperatura e o $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ do ligante virgem. As variáveis referentes aos agregados apresentaram significância de $\rho = 0,20$, demonstrando assim que, não apresentam significância na variável dependente.

A influência efetiva do ligante é confirmada através da Figura 82, que demonstra graficamente os valores de RT ensaiados com as amostras do Módulo de Resiliência, com um volume de vazios de 4%.

Figura 82 – Resistência à Tração das amostras de Módulo de Resiliência



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

As misturas SUPERPAVE com ligante asfáltico 60/85 apresentaram em média um valor de 18,46% superior quando comparadas com ligante asfáltico convencional (50/70). Já para as misturas SUPERPAVE com ligante HIMA apresentaram em média um valor 4,66% superior

quando comparadas com o ligante convencional. As misturas dosadas pelo método Marshall apresentaram um valor de 50,24% e 20,50% superiores respectivamente, as misturas com ligante AMP 60/85 e HIMA, comparadas com o ligante convencional. As misturas com ligante HIMA, tanto as dosadas com SUPERPAVE como as Marshall, apresentam uma redução no RT quando comparadas com as misturas com ligante 60/85. Isso se dá devido a sua alta modificação do polímero, fazendo com que as misturas tenham sua rigidez menor. Há de se destacar que o mesmo comportamento foi evidenciado no ensaio de Módulo de Resiliência.

O aumento no teor de ligante, devido ao método de dosagem por impacto do Marshall, causou um aumento médio de 12,26% no valor do RT nas misturas com ligante 60/85, quando comparadas às dosadas no CGS. Contrariamente as misturas com ligante convencional houve uma redução de 11,48% e, para as misturas com ligante HIMA, houve um aumento de 1,91% no valor RT. O aumento na quantidade de ligante modificado aumentou a coesão da mistura e, já para o ligante convencional o efeito foi contrário, onde o aumento do teor de ligante reduziu o atrito da mistura, visto que os esqueletos minerais são os mesmos.

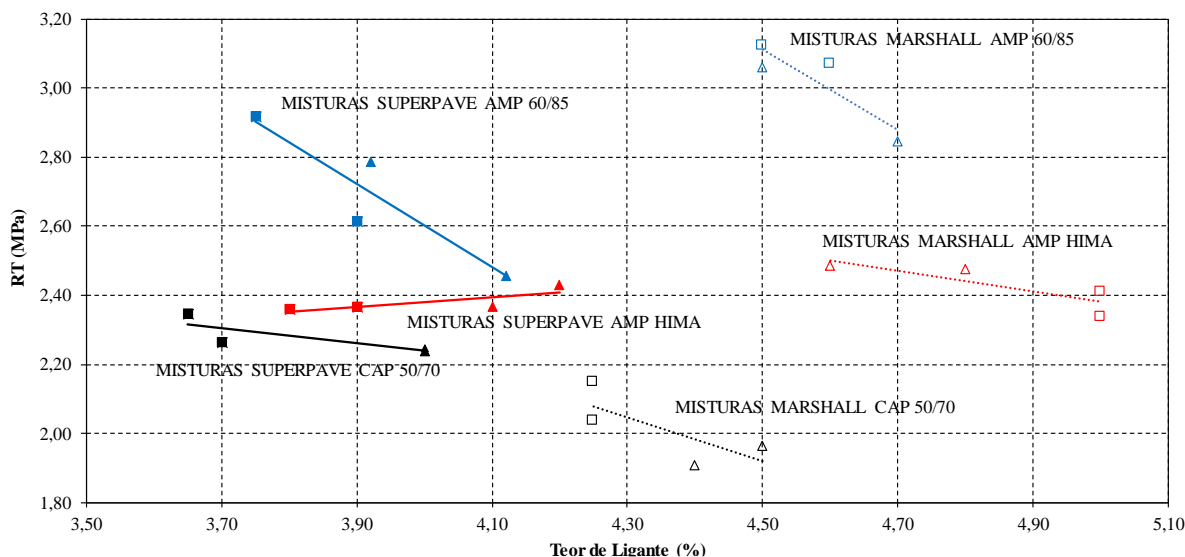
Com relação as faixas granulométricas, sabe-se que granulometrias enquadradas a Faixa B do DNIT apresentam superfície específica de agregado menor que uma mistura enquadrada na Faixa C, em virtude de a granulometria das misturas enquadradas na Faixa B apresentarem maior quantidade de agregados graúdos, o que acaba causando uma redução na quantidade de ligante necessária para envolver os agregados.

A Figura 83 demonstra a relação entre a Resistência à Tração das faixas granulométricas com o teor de ligante de projeto das misturas. Evidencia-se que para as misturas asfálticas com ligante CAP 50/70 e AMP 60/85, tanto para as dosagens SUPERPAVE e Marshall, há um incremento no valor do RT para as misturas enquadradas nas Faixa B do DNIT. Entretanto, para as misturas com o ligante asfáltico HIMA, as misturas enquadradas na Faixa C do DNIT são superiores as misturas enquadradas na Faixa B, tanto para as misturas dosadas na metodologia SUPERPAVE quanto para as misturas dosadas na metodologia Marshall. Vale ressaltar que as variações dos resultados apresentam valores equivalentes.

As misturas enquadradas na Faixa B com CAP 50/70 dosadas pelo método SUPERPAVE foram cerca de 2,80% superiores às enquadradas pela Faixa C. Já com o aumento no teor de ligante, devido a diferença da metodologia de dosagem (Marshall), este aumento ficou ainda mais superior, com cerca de 8,06% maior que as misturas enquadradas pela Faixa C. As misturas enquadradas na Faixa B com ligante 60/85, foram 5,48% (SUPERPAVE) e 4,87% (Marshall) superiores as enquadradas na Faixa C. Ainda cabe destacar que, nas misturas realizadas com o ligante HIMA, esta tendência foi contrária: misturas enquadradas na Faixa C

foram cerca de 1,48% (SUPERPAVE) e 4,76% (Marshall) superiores as misturas enquadradas na Faixa Granulométrica B do DNIT.

Figura 83 – Relação entre a Resistência à Tração e o Teor de Ligante entre Faixas Granulométricas das Misturas



Nesse sentido, é visível o efeito positivo no tipo de ligante asfáltico utilizado, no qual as misturas com ligante asfáltico modificado apresentaram uma resistência à tração superior, comparadas com o ligante convencional. Já quanto ao aumento no teor de ligante, apenas as misturas com ligante convencional obtiveram valores inferiores, isto comparado à mesma granulometria. Para uma mesma rigidez, quanto maior o valor da resistência à tração melhor será o comportamento da mistura e, haverá maior capacidade de distribuição de tensão com maior resistência.

4.3.1.1 Indicadores do Desempenho das Misturas Asfálticas

A segunda metodologia de ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral, seguiu as prescrições da norma DNIT 136/2010 – ME, e para cada mistura foram realizados três corpos de prova na temperatura de 25°C. Diferentemente das amostras da primeira metodologia, as amostras utilizadas foram as do Módulo Complexo, com um volume de vazio de 5,5%, e, durante a execução do ensaio houve a leitura de deslocamento a cada 0,01 segundo. Então além de obter o valor do RT das misturas, foi possível calcular os parâmetros de Tenacidade, Energia Máxima, Energia Total, Índice de Tenacidade e o Índice de Flexibilidade adaptado.

Na Tabela 23 estão demonstradas a média dos valores de RT e dos parâmetros calculados por meio do deslocamento e da carga durante a execução do ensaio. Verifica-se, principalmente, para os parâmetros de Índice de Tenacidade e Índice de Flexibilidade adaptado um coeficiente de variação muito elevado, percebendo elevada variação de ensaio para a mesma mistura, podendo assim, inviabilizar a utilização destes índices.

Em seu trabalho, Paniz (2018) encontrou valores mais consistentes para os resultados e para os coeficientes de variação dos parâmetros, porém a autora complementa que isto já era esperado devido ao mesmo esqueleto pétreo e teores de ligantes próximo, justificando a origem dos diferentes ligantes convencionais (CAP 50/70) utilizados na pesquisa. Diferentemente do que acontece neste estudo, que para o mesmo esqueleto pétreo tem-se diferentes teores de ligante e métodos de dosagem e, ainda, diferentes tipos de ligantes utilizados.

Da mesma forma que os outros ensaios, utilizou-se a regressão linear múltipla para análise das variáveis com maior significância no modelo. Utilizou-se da resistência à tração como variável dependente. Para as variáveis independentes, a fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/4, passante na peneira 3/8, passante na peneira #4 e o passante na peneira #200) e para a fração do ligante asfáltico (PG de alta temperatura, teores de ligante de projeto, $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ na temperatura de 19°C, $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ do ligante virgem, $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ após RTFOT, penetração e ponto de amolecimento).

Após utilizar o software IBM SPSS Statistics para a seleção das variáveis através do método de variância ANOVA (Analysis of Variance) e a regressão linear múltipla, para verificar a influência das variáveis independentes que influenciam efetivamente, as seguintes variáveis independentes foram utilizadas: fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/4, e a passante na peneira #4) e para a fração do ligante asfáltico (PG de alta temperatura, teor de ligante e o ponto de amolecimento).

O modelo apresentou um R^2 ajustado de 0,49, indicando não ter um bom ajuste da reta, mas como o objetivo não é o modelo, e sim, realizado no intuito de verificar a significância das variáveis no resultado do ensaio, as únicas variáveis que apresentaram significância ($p < 0,05$) foram o PG de alta temperatura e o teor de ligante, sendo o teor de ligante com um nível de significância de 0,062, um pouco superior aos 5%, porém muito próximo quando comparado as outras variáveis.

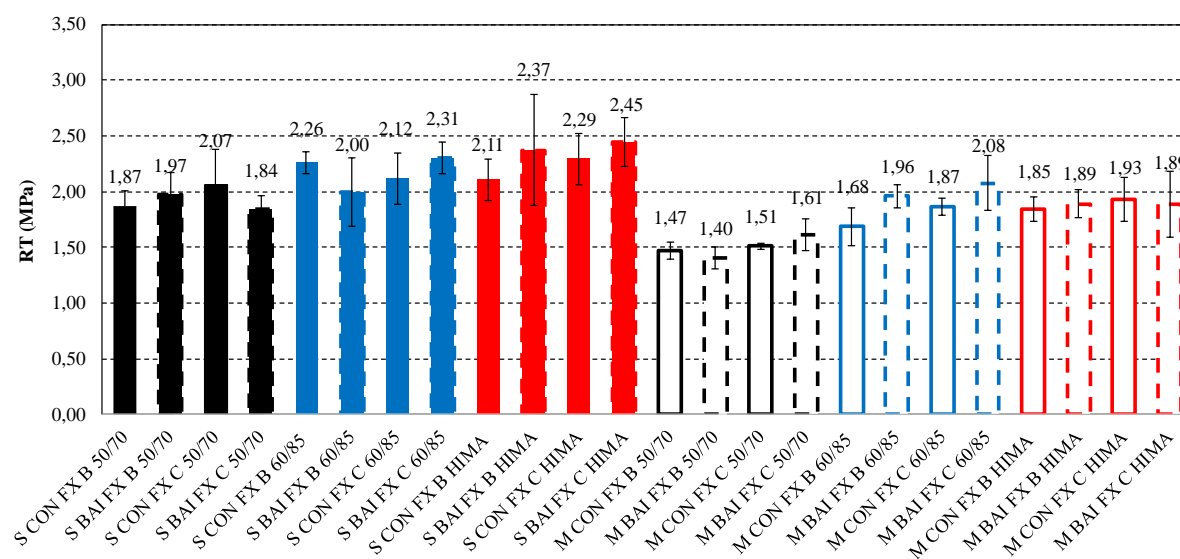
Tabela 23 – Resultados do ensaio de RT e parâmetros de tenacidade, Energia Máxima, Energia Total, Índice de Tenacidade e Índice de Flexibilidade

MISTURAS	RT			TENACIDADE			ENERGIA MÁXIMA			ENERGIA TOTAL			ÍNDICE DE TENACIDADE			ÍNDICE DE FLEXIBILIDADE adaptado		
	Média (MPa)	Sd (MPa)	CV (%)	Média (N/mm)	Sd (N/mm)	CV (%)	Média (N.m(J))	Sd (N.m(J))	CV (%)	Média (N.m(J))	Sd (N.m(J))	CV (%)	Média	Sd	CV (%)	Média	Sd	CV (%)
S CON FX B 50/70	1,868	0,138	7,404	1,732	0,229	13,252	27,448	5,930	21,603	59,133	12,510	21,156	0,037	0,190	508,084	28,038	12,349	44,045
S BAI FX B 50/70	1,970	0,203	10,311	1,647	0,025	1,495	24,651	1,996	8,098	62,019	1,159	1,868	0,119	0,041	34,762	40,375	18,821	46,615
S CON FX C 50/70	2,067	0,308	14,889	1,789	0,188	10,533	26,968	6,341	23,512	58,489	7,060	12,071	0,056	0,085	152,652	26,496	8,088	30,525
S BAI FX C 50/70	1,838	0,130	7,088	1,714	0,107	6,272	25,743	1,060	4,116	60,633	4,233	6,982	0,091	0,035	38,203	23,443	7,683	32,774
S CON FX B 60/85	2,262	0,097	4,286	1,818	0,107	5,881	27,118	5,516	20,341	62,389	3,891	6,237	0,069	0,063	91,269	40,048	27,552	68,798
S BAI FX B 60/85	1,996	0,305	15,303	1,715	0,000	13,133	30,452	11,176	36,700	57,250	7,280	12,716	0,069	0,084	121,522	37,306	14,482	38,819
S CON FX C 60/85	2,120	0,232	10,934	1,576	0,000	11,069	25,702	5,264	20,479	52,388	6,689	12,768	0,011	0,059	523,088	28,392	9,138	32,186
S BAI FX C 60/85	2,308	0,142	6,147	1,983	0,146	7,369	33,444	4,941	14,772	65,725	9,331	14,198	0,009	0,059	665,538	43,598	4,240	9,724
S CON FX B HIMA	2,108	0,185	8,792	2,015	0,000	26,167	30,583	12,561	41,072	62,662	13,436	21,442	0,066	0,173	262,335	37,790	16,002	42,344
S BAI FX B HIMA	2,371	0,498	21,011	1,864	0,000	25,518	25,560	6,453	25,248	57,473	10,808	18,806	0,065	0,081	124,710	44,558	9,890	22,195
S CON FX C HIMA	2,293	0,232	10,116	2,013	0,174	7,967	28,470	2,386	8,381	59,560	3,656	6,139	0,025	0,084	330,910	29,394	13,144	44,717
S BAI FX C HIMA	2,446	0,218	8,931	2,247	0,000	4,351	30,061	1,021	3,398	69,915	5,671	8,112	0,086	0,047	54,344	40,702	18,462	45,359
M CON FX B 50/70	1,470	0,080	5,413	1,402	0,000	9,578	19,473	1,301	6,680	55,660	5,965	10,716	0,210	0,041	19,504	35,125	7,356	20,943
M BAI FX B 50/70	1,403	0,096	6,816	1,482	0,000	5,708	20,244	1,342	6,628	61,815	6,881	11,131	0,247	0,019	7,808	21,613	3,003	13,895
M CON FX C 50/70	1,511	0,029	1,921	1,617	0,000	3,125	23,548	2,857	12,131	61,643	0,767	1,245	0,175	0,080	45,702	44,558	4,099	9,198
M BAI FX C 50/70	1,612	0,145	9,002	1,700	0,476	17,235	26,068	7,085	27,178	64,065	7,858	12,265	0,091	0,127	139,814	29,303	11,403	38,913
M CON FX B 60/85	1,684	0,167	9,923	1,670	0,000	14,087	24,941	3,845	15,415	63,961	10,822	16,920	0,136	0,013	9,415	27,611	6,523	23,624
M BAI FX B 60/85	1,959	0,102	5,230	1,949	0,000	2,161	26,382	0,997	3,781	71,565	5,599	7,823	0,185	0,049	26,458	46,508	9,389	20,188
M CON FX C 60/85	1,865	0,080	4,312	1,820	0,000	1,278	27,294	0,679	2,488	63,512	2,388	3,761	0,097	0,038	38,817	26,982	8,069	29,907
M BAI FX C 60/85	2,076	0,246	11,849	2,076	0,527	6,143	38,036	6,655	17,496	65,271	4,556	6,980	0,054	0,154	284,794	40,392	18,950	46,915
M CON FX B HIMA	1,845	0,107	5,785	2,622	0,000	8,203	34,738	6,299	18,131	87,872	8,173	9,301	0,107	0,199	185,060	22,697	5,120	22,560
M BAI FX B HIMA	1,892	0,127	6,694	2,769	0,000	22,253	39,135	10,288	26,290	84,078	8,406	9,998	0,092	0,412	445,751	41,429	12,185	29,411
M CON FX C HIMA	1,928	0,196	10,161	2,218	0,000	17,535	29,654	7,278	24,543	71,761	4,524	6,304	0,117	0,185	158,428	23,590	14,909	63,199
M BAI FX C HIMA	1,889	0,299	15,850	2,041	0,098	17,793	26,863	6,010	22,372	68,683	9,751	14,197	0,173	0,075	43,114	33,041	25,729	77,871

Na Figura 84 estão demonstrados os valores de resistência à tração das amostras com 5,5% volume de vazios. Percebem-se valores inferiores, quando comparadas com os valores de RT com volume de vazios de 4%, porém a tendência permanece inalterada, ou seja, valores de RT superiores para as misturas com ligante modificado. Diferentemente das amostras com vv de 4%, nas misturas com maior teor de ligante (dosadas pelo método Marshall), houve uma redução na RT de todas nas misturas, em média de 21,36% do que as misturas dosadas pelo método SUPERPAVE.

Outro ponto é a igualdade de valores entre os ligantes modificados, nos valores de RT das amostras do Módulo de Resiliência, onde houve uma redução nos valores das misturas com ligante HIMA, quando comparadas com o AMP 60/85. Demonstrando assim a influência do volume de vazios nos resultados dos ensaios, no qual, uma variação de 1,5% já demonstra grande variabilidade nos resultados. Mas mesmo assim, de acordo com limites para RT, regidos pelas normas do DNIT, todas as misturas apresentam valores superiores aos limites.

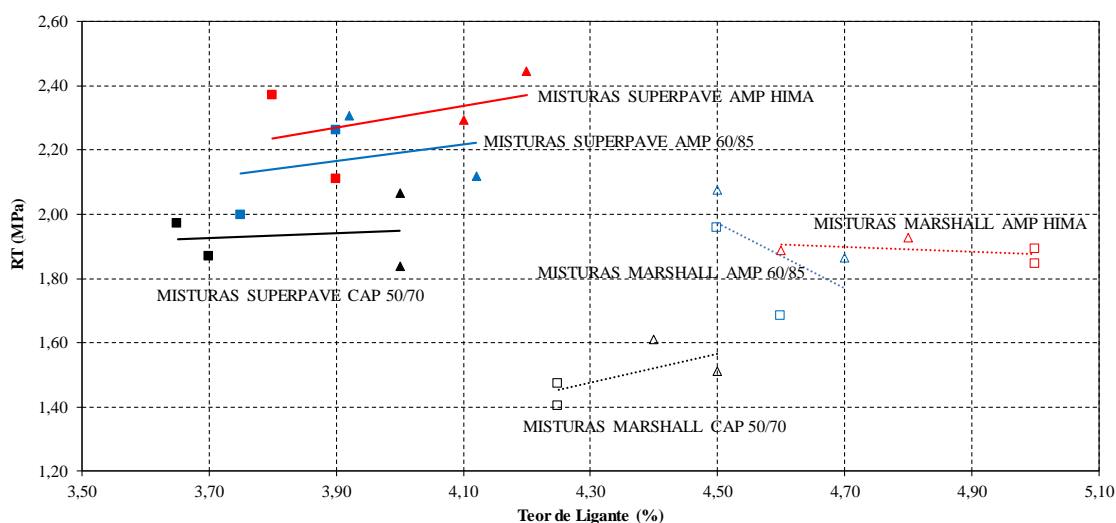
Figura 84 – Resistência à Tração das amostras de Módulo Complexo



Nas misturas dosadas pelo método SUPERPAVE houve um incremento de 12,14% nos resultados das misturas com ligante 60/85 e de 19% nas misturas com ligante HIMA, em comparação com as misturas com ligante convencional (CAP 50/70). Já para as misturas dosadas pelo método Marshall este incremento nos resultados foi grande, cerca de 26,48% para as misturas com AMP 60/85 e de 25,95% para as misturas com o ligante HIMA, ambas em comparação ao ligante convencional.

Com relação a diferença de teor de ligante entre as faixas granulométricas, verifica-se pela Figura 85, que diferentemente das amostras realizadas com volume de vazios de 4% das amostras do Módulo de Resiliência, as amostras do Módulo Complexo com volume de vazios de 5,5% obtiveram, de certa forma, os valores de RT maiores para as misturas enquadradas na Faixa C do DNIT.

Figura 85 – Resistência à Tração das amostras de Módulo Complexo



Percebe-se que as maiores diferenças entre as faixas granulométricas, ficaram com as misturas dosadas pelo método Marshall, no qual, a maior diferença ficou com as misturas com ligante 50/70, cerca de 8,70% maior as misturas com Faixa C, para as misturas com ligante 60/85 cerca de 8,18% as misturas com Faixa C superior, e para as misturas com ligante Hima essa superioridade não foi tão significativa (2,08%).

Por outro lado, nas misturas dosadas pelo método SUPERPAVE esta diferença não foi significativa, sendo as misturas com ligante HIMA ficaram com as misturas enquadradas na Faixa C cerca de 5,80% superior que as misturas enquadradas na Faixa B. Já as misturas com ligante AMP 60/85 e as misturas com Faixa C ficaram com 3,99% superior, e, para as misturas com ligante 50/70 esta diferença ficou pequena: cerca de 1,77%.

Para fins de comparação, os parâmetros calculados com os resultados de RT foram normalizados e então gerado a Tabela 24, que nos permite analisar as tendências dos índices. Assim como os resultados de Resistência à Tração, utilizou-se da regressão linear múltipla para realizar um tratamento estatístico, com objetivo de verificar as principais variáveis com significância nos resultados destes parâmetros.

Em cada parâmetro calculado utilizou-se uma variável dependente e para as variáveis independentes a fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/4, passante na peneira 3/8, passante na peneira #4 e o passante na peneira #200), e para a fração do ligante asfáltico (PG de alta temperatura, teores de ligante de projeto, $|G^*|_{sen}(\delta)$ na temperatura de 19°C, $|G^*|_{sen}(\delta)$ do ligante virgem, $|G^*|_{sen}(\delta)$ após RTFOT, penetração e ponto de amolecimento). E após ter sido submetido ao software, fixou-se para todos os parâmetros as variáveis independentes: fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/4, e a passante na peneira #4) e para a fração do ligante asfáltico (PG de alta temperatura, teor de ligante e o $|G^*|_{sen}(\delta)$ após RTFOT).

Os únicos parâmetros que tiveram algum modelo possível de explicar as variáveis foram a Tenacidade e a Energia Total. Sendo que para a Tenacidade o modelo ficou com um R^2 ajustado de 0,44, ou seja, o modelo de regressão linear múltipla ajustado é capaz de explicar 44% da variabilidade dos dados, e, para Energia Total, o modelo ficou com um R^2 ajustado de 0,474. Para cada um dos modelos, as variáveis com maior significância foram o Teor de Ligante e o $|G^*|_{sen}(\delta)$ após RTFOT, demonstrando mais uma vez que o ligante asfáltico vem a ser o fator mais importante dentre os resultados.

Tabela 24 – Valores normalizados dos parâmetros de Resistência à Tração das misturas

MISTURAS	TENACIDADE	ENERGIA MÁXIMA	ENERGIA TOTAL	ÍNDICE DE TENACIDADE	ÍNDICE DE FLEXIBILIDADE adaptado
S CON FX B 50/70	0,63	0,70	0,67	0,15	0,60
S BAI FX B 50/70	0,59	0,63	0,71	0,48	0,87
S CON FX C 50/70	0,65	0,69	0,67	0,22	0,57
S BAI FX C 50/70	0,62	0,66	0,69	0,37	0,50
S CON FX B 60/85	0,66	0,69	0,71	0,28	0,86
S BAI FX B 60/85	0,62	0,78	0,65	0,28	0,80
S CON FX C 60/85	0,57	0,66	0,60	0,05	0,61
S BAI FX C 60/85	0,72	0,85	0,75	0,04	0,94
S CON FX B HIMA	0,73	0,78	0,71	0,27	0,81
S BAI FX B HIMA	0,67	0,65	0,65	0,26	0,96
S CON FX C HIMA	0,73	0,73	0,68	0,10	0,63
S BAI FX C HIMA	0,81	0,77	0,80	0,35	0,88
M CON FX B 50/70	0,51	0,50	0,63	0,85	0,76
M BAI FX B 50/70	0,54	0,52	0,70	1,00	0,46
M CON FX C 50/70	0,58	0,60	0,70	0,71	0,96
M BAI FX C 50/70	0,61	0,67	0,73	0,37	0,63
M CON FX B 60/85	0,60	0,64	0,73	0,55	0,59
M BAI FX B 60/85	0,70	0,67	0,81	0,75	1,00
M CON FX C 60/85	0,66	0,70	0,72	0,39	0,58
M BAI FX C 60/85	0,75	0,97	0,74	0,22	0,87
M CON FX B HIMA	0,95	0,89	1,00	0,44	0,49
M BAI FX B HIMA	1,00	1,00	0,96	0,37	0,89
M CON FX C HIMA	0,80	0,76	0,82	0,47	0,51
M BAI FX C HIMA	0,74	0,69	0,78	0,70	0,71

A tenacidade é a capacidade de um material absorver energia e se deformar plasticamente antes da fratura e o índice de tenacidade é um parâmetro adimensional que descreve a tenacidade e tem a capacidade comparar o desempenho de uma amostra com o de um material de referência (elastoplástico $IT=1$), sendo então, o IT igual a zero para um material frágil. Percebe-se para os parâmetros que os maiores valores ficaram com as misturas dosadas pelo método Marshall que, conseqüentemente, são misturas com maiores teores de ligante asfáltico, no entanto, deve-se tomar cuidado com os resultados dos parâmetros, visto que os coeficientes de variação são altos, principalmente para o índice de tenacidade e o índice de flexibilidade.

Para contar com uma análise completa dos dados obtidos a partir do ensaio de RT, é necessário executar ensaios adicionais como o de Fadiga, buscando assim indicadores do desempenho das misturas asfálticas perante o fenômeno de Fadiga. Nesse sentido, será avaliada a correlação dos parâmetros obtidos através do ensaio de RT com os resultados das mesmas misturas por meio do ensaio de fadiga tração-compressão e, então, analisar a viabilidade de utilização tanto do RT quanto dos índices correlatos para inferência a fenômenos de fadiga em misturas asfálticas.

4.3.2 Ensaio de *Creep* Dinâmico (*Flow Number*)

Para a realização deste ensaio foram moldadas 3 amostras por mistura nas dimensões 10 x 15 cm no Compactador Giratório Superpave com volume de vazios de $7 \pm 0,5\%$, mas devido as pequenas variações nos resultados, optou-se por utilizar apenas duas amostras. Como parâmetros de ensaio adotou-se o tempo de aplicação de carga de 0,1 s, tempo de repouso de 0,9 s, tensão de 204 kPa, tensão de repouso de 10,2 kPa, tensão de pré-carregamento de 15 kPa com duração de 60 s, temperatura de ensaio de 60 °C e tempo mínimo de condicionamento das amostras de 3 horas. O critério de parada do ensaio foi de 5% da deformação ou 10000 ciclos.

A curva de deformação plástica vertical uniaxial de cada corpo de prova foi ajustada ao modelo de *Francken*, que é uma combinação dos modelos de potência e exponencial, conforme pode ser visualizado através da Tabela 25 juntamente com a média dos resultados, desvio padrão e coeficiente de variação. Com os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida, buscou-se correlacionar os *FNs* das misturas asfálticas com as propriedades reológicas, J_{nr} e PG de alta, dos ligantes asfálticos, teor de ligante de projeto, proporção AG e porosidade FAD.

Tabela 25 - *Flow Number* para cada mistura obtido pelo Modelo Francken e seus respectivos parâmetros

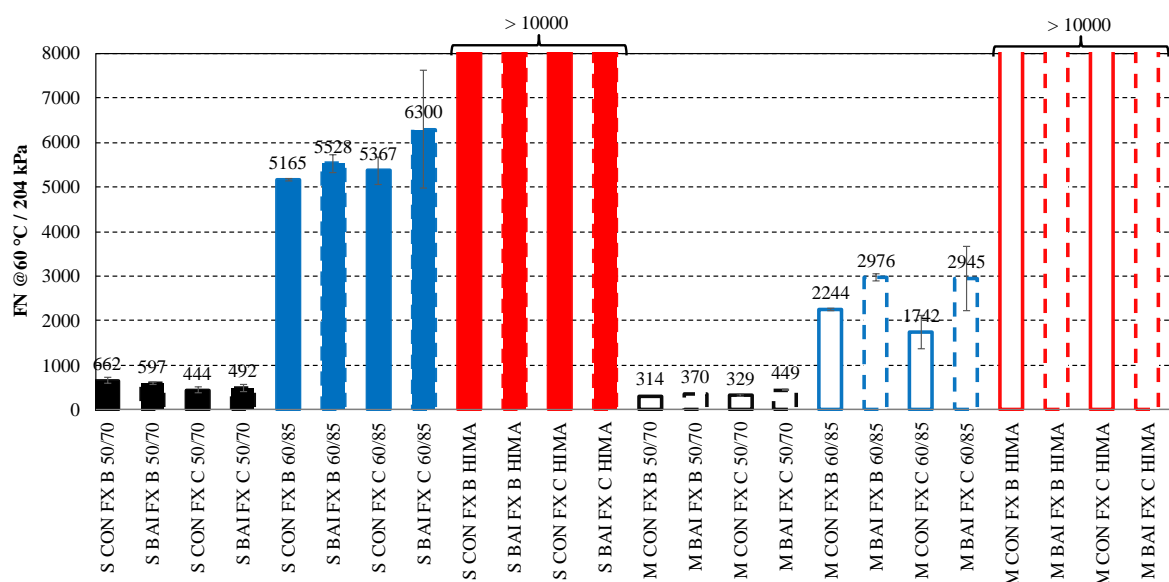
MISTURAS	FN	MÉDIA (Ciclo)	DP (Ciclo)	CV (%)	PARÂMETROS MODELO FRANCKEN			
					A	B	C	D
S CON FX B 50/70	620	662	59	8,87	718,634	0,50073	177,616	0,00310002
	703				836,02	0,47836	149,173	0,00290734
S BAI FX B 50/70	612	597	22	3,67	1196,55	0,43429	251,573	0,00291461
	581				712,949	0,51199	324,405	0,00284507
S CON FX C 50/70	399	444	63	14,19	893,138	0,49748	317,55	0,00410354
	488				741,872	0,50868	350,837	0,00325106
S BAI FX C 50/70	546	492	76	15,52	1081,56	0,45458	314,171	0,00306786
	438				904,619	0,49556	339,655	0,00372189
S CON FX B 60/85	5183	5165	25	0,49	1223,32	0,29129	2630,62	0,0001433
	5147				1339,64	0,27659	2185,22	0,00015058
S BAI FX B 60/85	5389	5528	197	3,56	1245,34	0,28171	2202,52	0,00014315
	5667				1440,14	0,28006	1799,45	0,00015377
S CON FX C 60/85	5592	5367	318	5,93	1220,58	0,27925	2116,07	0,00013814
	5142				1545,56	0,25754	2298,72	0,00014453
S BAI FX C 60/85	5367	6300	1319	20,94	1293,03	0,29096	1764,37	0,00016312
	7233				1169,1	0,27756	1610,67	0,00011811
S CON FX B HIMA	10000	10000	0	0,00	1435,64	0,24322	1708,33	0,00000000
	10000				1403,23	0,23972	721,015	0,00003417
S BAI FX B HIMA	10000	10000	0	0,00	1183,51	0,23411	2384,28	0,00000000
	10000				1118,01	0,23266	1834,4	0,00000000
S CON FX C HIMA	10000	10000	0	0,00	1092,64	0,23711	1831,15	0,00000000
	10000				1261,34	0,22039	659,802	0,00000000
S BAI FX C HIMA	10000	10000	0	0,00	1358,09	0,24713	2253,12	0,00000000
	10000				1029,62	0,24283	1836,31	0,00000000
M CON FX B 50/70	338	314	35	11,05	1693,96	0,43716	1850,45	0,00301564
	289				1172,32	0,51451	1162,71	0,00411642
M BAI FX B 50/70	381	370	16	4,40	1213,08	0,47276	1100,31	0,00310361
	358				1135,09	0,48306	1095,9	0,00327081
M CON FX C 50/70	309	329	28	8,60	1675,48	0,45641	1443,78	0,00365728
	349				1326,53	0,47111	1168,76	0,00336756
M BAI FX C 50/70	388	449	86	19,08	1026,26	0,4967	1256,22	0,0029076
	509				1096,87	0,4803	589,997	0,00287648
M CON FX B 60/85	2509	2244	375	16,70	1212,88	0,37524	926,812	0,00050735
	1979				1995,39	0,31547	3455,02	0,00039838
M BAI FX B 60/85	3486	2976	722	24,26	1293,15	0,35501	1362,27	0,00032367
	2465				1697,29	0,30902	3523,08	0,00030036
M CON FX C 60/85	1668	1742	105	6,01	1620,51	0,34833	1855,55	0,00059288
	1816				1348,11	0,38133	1168,93	0,00065973
M BAI FX C 60/85	2590	2945	502	17,05	984,29	0,40764	261,616	0,00071946
	3300				1056,19	0,37749	390,965	0,00049346
M CON FX B HIMA	10000	10000	0	0,00	2531,01	0,21189	2543,82	0,00000000
	10000				2066,86	0,24599	2061,22	0,00000000
M BAI FX B HIMA	10000	10000	0	0,00	2266,69	0,23351	2683,45	0,00000000
	10000				2344,48	0,22575	1924,05	0,00000000
M CON FX C HIMA	10000	10000	0	0,00	1809,68	0,25591	2722,84	0,00000000
	10000				1810,51	0,24714	750,671	0,00001258
M BAI FX C HIMA	10000	10000	0	0,00	1718,87	0,27053	2113,73	0,00000000
	10000				1787,41	0,27004	632,346	0,00000000

Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Primeiramente ao se analisar os resultados, percebe-se que alguns coeficientes de variação ficaram acima do que é estabelecido nas normas, muito provável serem decorrentes do processo de mistura e também da disposição da estrutura do agregado mineral no CP, uma vez que as misturas que apresentam maiores valores em coeficiente de variação são as com enquadramento dentro dos parâmetros Bailey, ou seja, grande quantidade de agregados graúdos. Outros autores encontraram valores de CV distintos, como Onofre (2012), que encontrou valores entre 13% a 26% e Nascimento (2008), que encontrou valores entre 2,5% a 42,9%, o que indica a grande variabilidade do ensaio.

Os resultados do ensaio estão apresentados graficamente na Figura 86. Percebe-se nitidamente a influência significativa do tipo e teor do ligante asfáltico nos resultados, pois quanto maior foi a quantidade de modificação no ligante asfáltico por polímero SBS, maior o FN das misturas, uma vez que o ligante AMP 60/85 apresenta uma modificação de 4,5% de polímero SBS e o ligante HIMA uma modificação de 7,5% de SBS. Esta influência está relacionada a decorrência da melhor absorção dos esforços e da maior recuperação elástica que as modificações conferem ao concreto asfáltico.

Figura 86 - *Flow Number* obtido para as 24 misturas asfálticas



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Por outro lado, quando se houve um aumento no teor de ligante asfáltico devido a diferença entre os métodos de dosagem, por impacto e amassamento, para as misturas asfálticas

com ligante AMP 60/85 e o CAP 50/70 aconteceu uma redução do FN das misturas. Já para as misturas com o ligante asfáltico HIMA não houve redução, pois em ambos métodos de dosagem estas misturas não atingiram a deformação de 5% em 10000 ciclos. Percebe-se que para as misturas asfálticas com ligante AMP 60/85, o aumento no teor de ligante causou uma maior redução do FN, chegando a 208,10% menor para a mistura M CON FX C 60/85. Justifica-se esta redução pois a partir do aumento no teor de ligante há um aumento na espessura do filme asfáltico em volta do agregado que, conseqüentemente, reduz o atrito entre os grãos reduzindo então a resistência ao cisalhamento que o atrito entre os grãos de agregados produz.

Nota-se que para as misturas dosadas pela metodologia Marshall e com ligante asfáltico AMP 60/85, o método Bailey apresentou o maior ganho no valor de *FN*, quando comparadas as misturas convencionais. Para as misturas com ligante CAP 50/70, tanto as misturas SUPERPAVE como as Marshall, considerando o desvio padrão das amostras, existe uma superposição estatística. Percebe-se que para misturas com maior teor de ligante, o intertravamento do esqueleto mineral nos parâmetros Bailey forneceu uma maior capacidade de resistência à deformação permanente.

Quanto às faixas granulométricas, apenas nas misturas SUPERPAVE com ligante CAP 50/70 foi que as misturas com granulometria Faixa B apresentaram uma maior resistência que nas misturas com granulometria Faixa C. Tais observações mostram que a utilização de uma granulometria mais grossa (Faixa B) não necessariamente vão conferir uma maior resistência à deformação permanente comparada a uma granulometria mais fina (Faixa C), e sim o importante é a efetividade do contato granular, que é o que irá formar o esqueleto mineral, no qual o método Bailey se mostrou uma boa ferramenta.

Alguns autores estabeleceram limites/critérios para diferentes níveis de tráfego com base nos resultados obtidos em seus estudos para FN. Na Tabela 26 estão demonstrados os limites/critérios de Nascimento (2008), Bastos *et al.* (2017) e Faccin (2018). Em ambos, os limites propostos não devem ser considerados para misturas asfálticas mornas e com asfalto borracha.

Tabela 26 – Critérios de *Flow Number* para diferentes níveis de tráfego

PESQUISAS / NÍVEIS DE TRÁFEGO	TEMP. (°C)	TENSÃO (kPa)	LEVE	MÉDIO	PESADO	EXTREMAMENTE PESADO
			3×10^6	$[3 \times 10^6; 1 \times 10^7]$	$[1 \times 10^7; 3 \times 10^7]$	$> 3 \times 10^7$
Nascimento (2008)	60	204	-	300	750	-
Bastos et al. (2017)	60	204	-	100	300	> 1000
Faccin (2018)	60	204	-	300	600	> 2000

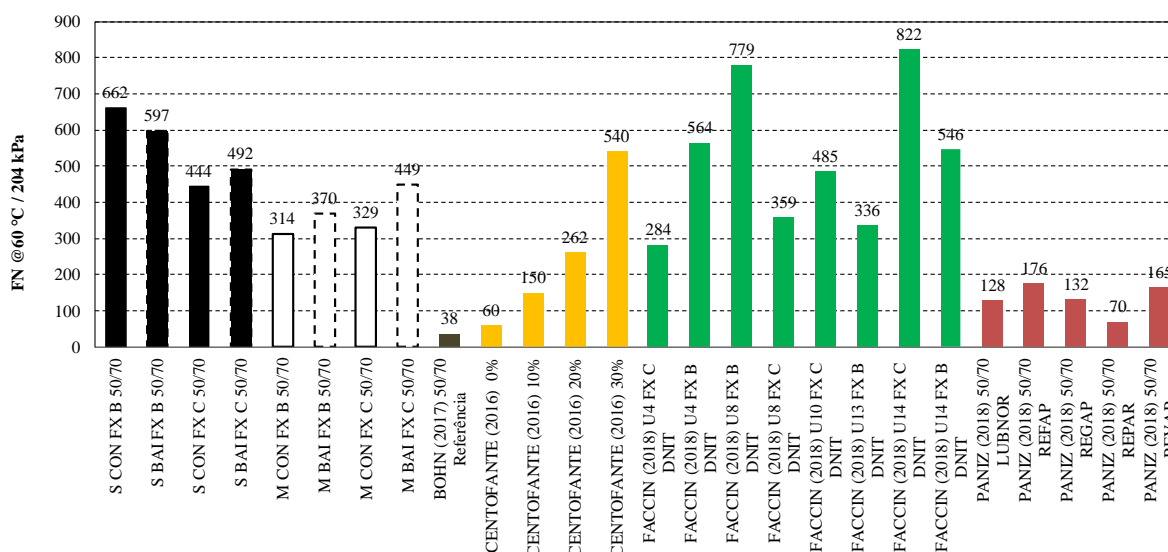
Fonte: Adaptado de Faccin (2018)

De acordo com os critérios de Nascimento (2008), as misturas com o ligante CAP 50/70 seriam adequadas para um tráfego médio de 3×10^6 a 1×10^7 ($300 < FN < 750$), enquanto as demais, 16 misturas com ligante modificado, compatíveis com um tráfego pesado de 1×10^7 a 3×10^7 ($FN > 750$). No entanto, deve-se haver um cuidado maior com a aplicação, visto que as misturas dosadas através da metodologia Marshall, quando comparadas misturas com ligante convencional, apresentam valores muito próximo do limite para tráfego médio.

Por outro lado, ao se considerar os limites sugeridos em Bastos *et al.* (2017), as misturas com ligante CAP 50/70 seriam classificadas para um tráfego pesado de 1×10^7 a 3×10^7 , e as misturas com os ligantes modificados à um nível de tráfego extremamente pesado maior que 3×10^7 ($FN > 1000$). Por fim, considerando os limites propostos por Faccin (2018) que se torna um pouco mais conservador que os demais autores, percebe-se que, com exceção da mistura S CON FX B 50/70 que se classificou para um tráfego pesado, todas as outras misturas com ligante convencional se classificam para um tráfego médio, e, ambos os ligantes modificados estão classificados à um nível de tráfego extremamente pesado ($> 3 \times 10^7$), com exceção da mistura M CON FX C 60/85 que obteve um FN de 1742 e ficaria à um nível de tráfego pesado (1×10^7 a 3×10^7).

Como já é sabido, o ligante convencional é muito suscetível às variações de tráfego e principalmente ao clima. As misturas com ligante convencional estudadas neste trabalho apresentaram comportamento que as enquadrariam em um nível de tráfego pesado, conforme foi apresentado para os critérios de Bastos *et al.* (2017), mas ao mesmo tempo comparando com misturas asfálticas produzidas no estado do Rio Grande do Sul, conforme pode ser visualizada pela Figura 87, misturas com ligante convencional podem apresentar comportamentos distintos e apresentando para o mesmo, níveis de tráfegos diferentes.

Com exceção das misturas com 10%, 20% e 30% da Centofante (2016) que têm a incorporação de material fresado, todas as outras são misturas com agregados provenientes do estado do Rio Grande do Sul com ligante CAP 50/70, sendo que os ligantes asfálticos utilizados por Paniz (2018) são de diferentes refinarias do Brasil. Percebe-se que as maiorias das misturas se enquadrariam em níveis de tráfego leve e médio para os critérios propostos pelos autores. Já para os critérios mais conservadores (Faccin, 2018 e Nascimento, 2008) apenas 3 das 26 misturas com ligante convencional se enquadrariam para um nível de tráfego pesado.

Figura 87 – Comparativo de misturas asfálticas com CAP 50/70 para *Flow Number*

Ressalta-se que, o intuito não é a condenação da utilização do ligante convencional, mas sim, que à luz da boa técnica com emprego de materiais convencionalmente utilizados em obras viárias, podem-se adquirir distintos comportamentos para um mesmo material, e sendo assim, podendo ser viabilizado para o determinado fim que se espera. O que se percebe é que para tráfegos pesados, os ligantes asfálticos modificados são mais viáveis tecnicamente para obtenção de FN acima de 600 ciclos.

De modo a se entender a influência das características das misturas, ligantes asfálticos utilizados e arranjos granulométricos no comportamento mecânico para o parâmetro *Flow Number*, buscou-se primeiramente por meio de uma regressão linear múltipla, para avaliar quais são as variáveis independentes mais relevantes para a deformação permanente, sendo que, o modelo não vem a ser o objetivo da regressão, mas sim o entendimento das variáveis significativas. E em seguida, são apresentadas de forma gráfica as principais correlações com os resultados do *Flow Number*.

Para a realização da regressão linear múltipla, fez-se uso do software IBM SPSS para a seleção das variáveis independentes através do método de variância ANOVA (Analysis of Variance) para verificar a influência das variáveis independentes, como a quantidade elevada de variáveis independentes e dependente (48 observações). O software já pré-seleciona as variáveis, ou seja, exclui as variáveis que não tem nenhuma relação/pouca significância, fazendo com que o modelo gerado fique melhor ajustado. Cabe observar que foram consideradas apenas as variáveis que são estatisticamente significativas ao nível de 5% de significância (95% de confiança).

Entrou-se no sistema com a variável dependente *Flow Number* e com as variáveis independentes, como: fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/4, passante na peneira 3/8, passante na peneira #4 e o passante na peneira #200), e fração do ligante asfáltico (PG de alta temperatura, teor de ligante de projeto, $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ na temperatura de 19°C, $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ do ligante virgem, $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ após RTFOT, MSCR (Jnr @3,2kPa/kPa⁻¹), penetração e ponto de amolecimento).

Uma vez que após o uso do software, fixou-se para todos os parâmetros as variáveis independentes: fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD), e do ligante asfáltico (PG de alta temperatura, teor de ligante, MSCR (Jnr @3,2kPa/kPa⁻¹) e o ponto de amolecimento).

O modelo apresentou um R² ajustado de 0,95, indicando ter um bom ajuste da reta, ou seja, 95% modelo de regressão linear múltipla é capaz de explicar as variabilidades dos dados. As únicas variáveis que apresentaram significância ($\rho < 0,05$) foram o PG de alta temperatura, o teor de ligante, o MSCR (Jnr @3,2kPa/kPa⁻¹) e o ponto de amolecimento, evidenciando dessa forma, conforme foi demonstrado nos resultados de *Flow Number*, que o ligante asfáltico é a principal característica a influenciar o parâmetro FN. As variáveis referentes aos agregados apresentaram significância de $\rho = 0,50$, demonstrando então, que estas variáveis independentes não têm significância estatística para os resultados de *FN*.

4.3.2.1 Correlação do FN em função dos parâmetros dos ligantes asfálticos

No momento em que se analisa os ensaios de caracterização reológica dos ligantes asfálticos com o comportamento apresentado através do ensaio de deformação permanente, percebe-se uma coerência com os resultados.

Como o exemplo de DSR pós RTFOT, permite ter um indicativo do comportamento do material perante a deformação permanente através da relação $|G^*|/\text{sen} \varphi$, mesmo este parâmetro não apresentar relação estatística conforme foi apresentado, encontrou-se o maior valor da relação para o ligante HIMA, seguido pelo ligante AMP 60/85 e CAP 50/70, indicando uma maior recuperação elástica dos ligantes modificados na temperatura do ensaio.

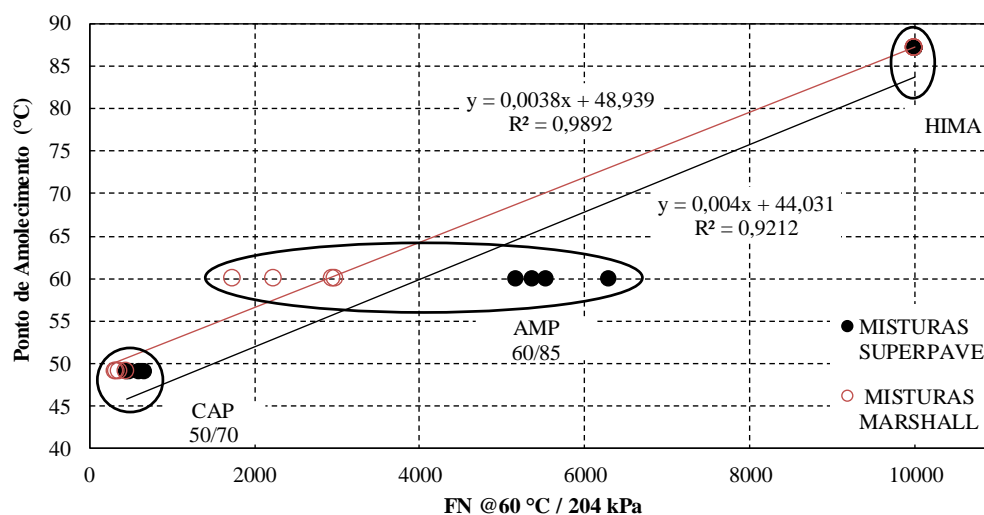
As correlações com a caracterização reológica dos ligantes asfálticos podem ser relacionadas ainda com: Ponto de Amolecimento, Teor de Ligante de Projeto, PG de alta temperatura e com Jnr obtido no ensaio *MSCR*. E estão demonstradas a seguir, para algumas das correlações não se adicionou as misturas com o ligante HIMA, pois acaba de não se perceber

o efeito devido que tais misturas não obtiveram *FN* até 10000 ciclos e nem os 5% da deformação.

Na Figura 88 estão apresentadas as correlações dos *FNs* das misturas com o Ponto de Amolecimento dos ligantes asfálticos. Percebe-se que os R^2 obtidos indicam forte correlação do Ponto de Amolecimento (PA) com a resistência à deformação permanente, tanto para as misturas dosadas na metodologia SUPERPAVE ($R^2 = 0,92$) e Marshall ($R^2 = 0,98$).

Conforme aumenta o PA do ligante asfáltico utilizado na mistura tem-se um aumento no *FN*. De certa forma, os ligantes asfálticos que obtiverem maior consistência, ou seja, uma maior resistência à penetração e como consequência vai obter um Performance Grade (PG) mais elevado, tendem a gerar misturas asfálticas mais resistentes em relação à deformação permanente.

Figura 88 – Correlação do Ponto de Amolecimento dos ligantes com os *FNs*

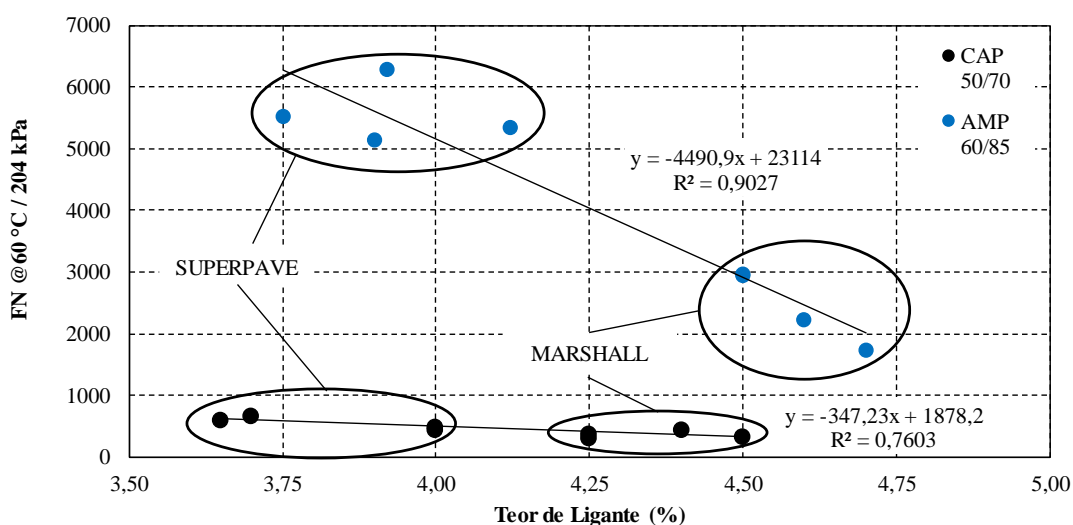


Nota-se que, para as misturas com o ligante asfáltico AMP 60/85 para com um mesmo PA o efeito do teor de ligante foi determinante para o resultado do *FN*, em média para todas as misturas com ligante AMP 60/85, a redução no teor de ligante aumentou o *FN* destas misturas em 125%. Já para as misturas com o ligante asfáltico CAP 50/70 este aumento no *FN* devido à redução no teor de ligante asfáltico ficou em média 50,41%.

Como nas misturas Marshall o teor de ligante é superior as misturas SUPERPAVE, essa maior quantidade de ligante asfáltico reduz o atrito entre os agregados, resultando numa maior susceptibilidade de desenvolver a deformação permanente ao aumentar-se o teor de ligante, podendo ser mais grave em climas quentes.

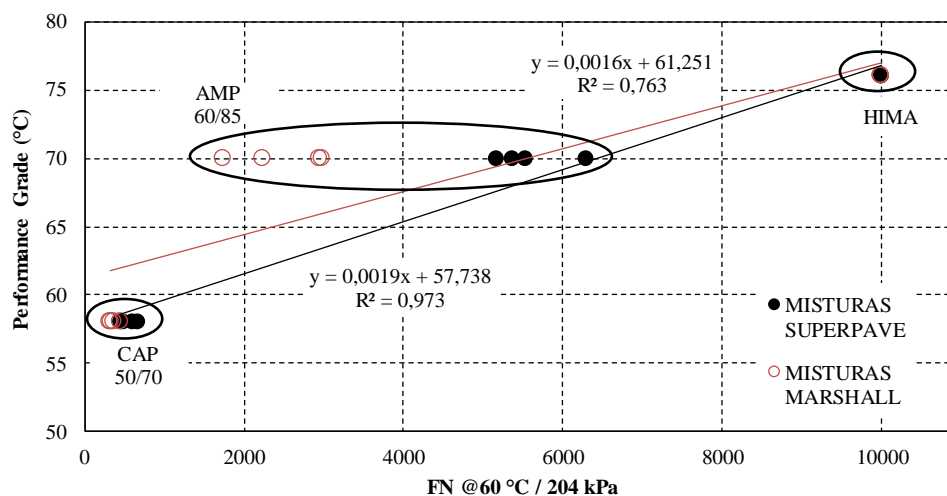
A correlação *FN versus* Teor de Ligante de projeto, disposto na Figura 89, apresenta bons R^2 (AMP 60/85 $R^2=0,90$ e CAP 50/70 $R^2=0,76$) e demonstra uma maior susceptibilidade das misturas com ligante AMP 60/85 em relação à variação no teor de ligante. A modificação de 0,1% no teor de ligante das misturas com CAP 50/70 resulta em uma variação de aproximadamente 35 ciclos no *FN*, enquanto nas misturas com o ligante AMP 60/85 a variação é de 412 ciclos.

Figura 89 – Correlação entre o Teor de Ligante de projeto (%) e *FN* obtido nas misturas asfálticas



Além disso, é possível relacionar o parâmetro reológico J_{nr} obtido no ensaio MSCR e o PG de alta temperatura dos ligantes asfálticos com a deformação permanente. O PG de alta temperatura representa a temperatura mais alta em que o ligante asfáltico tem propriedades físicas para obter resistência perante à deformação permanente, determinado pelo parâmetro $|G^*|/\sin \varphi$ (obtido através do DSR). Ainda, o PG permite estimar esta propensão do ligante asfáltico à resistência da deformação permanente de forma mais mecânica e menos empírica que nos parâmetros de ponto de amolecimento e penetração.

A Figura 90 demonstra a correlação entre os PG's de alta temperatura com os *FN*'s obtidos nas misturas asfálticas. Nota-se que os R^2 obtidos indicam forte correlação do PG com a resistência à deformação permanente, uma vez que, para as misturas dosadas através da metodologia SUPERPAVE o R^2 foi de 0,97, e para as misturas dosadas pelo Marshall o R^2 foi de 0,76.

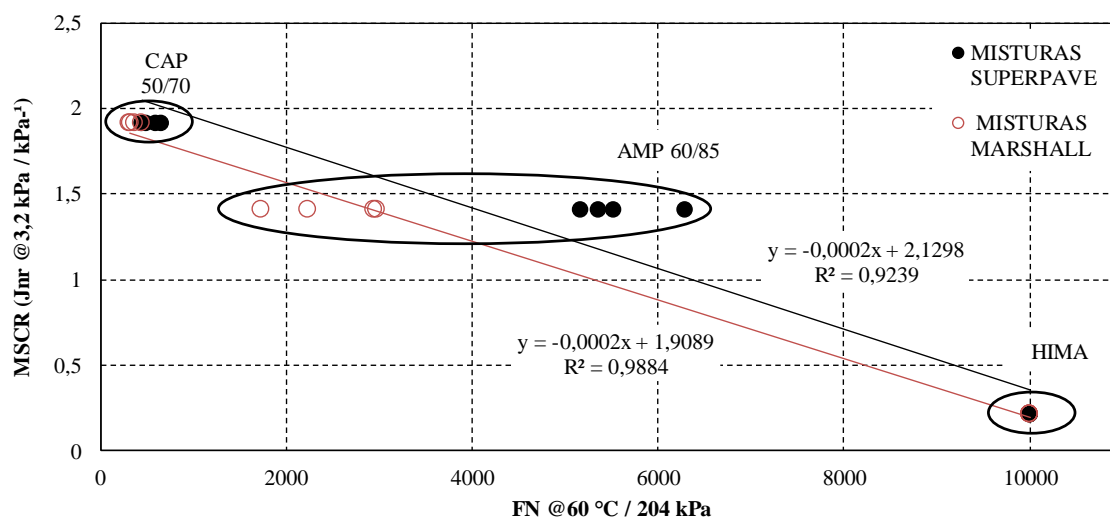
Figura 90 – Correlação do PG de alta temperatura dos ligantes asfálticos com os *FNs*

Conforme o esperado, à medida que aumenta o PG do ligante asfáltico utilizado na mistura tem-se um maior valor de *FN*. Assim as especificações para o PG são projetadas especificamente para atender a parâmetros de desempenho de misturas asfálticas como trincamento por fadiga e a deformação permanente.

Ao se elevar o PG em 12°C, ou seja, a simples troca do ligante convencional (CAP 50/70) pelo ligante modificado AMP 60/85 nas misturas asfálticas, tem-se para as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE um aumento em média dos FN de 920%, enquanto que para as misturas dosadas pela metodologia Marshall ficou em média 578% maior. Já ao se substituir os ligantes modificados, AMP 60/85 com o HIMA nas misturas asfálticas, no qual a diferente entre os PG's é de 6°C, tem-se um aumento no valor do FN em média de 78,89% para as misturas dosadas no SUPERPAVE, e um aumento de 304% para as misturas dosadas na metodologia Marshall.

Por outro lado, o parâmetro *Jnr* determina qual o nível de tráfego suportado pelo ligante, sendo que este parâmetro apresenta uma correlação com a resistência ao tráfego e com o desempenho do ligante muito maior do que outros parâmetros empíricos, como, por exemplo, a recuperação elástica.

Na Figura 91 está a relação entre *Jnr* dos ligantes asfálticos com o FN das misturas estudadas e nota-se a boa correlação, sendo que para as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE o R^2 foi de 0,92 e para as misturas dosadas pela metodologia Marshall, o R^2 foi igual a 0,99. A boa correlação do *Jnr* e o *FN* também foi identificada em estudos como D'Angelo (2009) (R^2 de 0,75 a 0,93) e Domingos *et al.* (2017) ($R^2 = 0,74$).

Figura 91 – Correlação do parâmetro Jnr dos ligantes asfálticos com os FN_s 

O valor de Jnr do ligante HIMA o classifica como *Extreme* (tráfego extra pesado) com tráfego permanente e maior que 3×10^7 e velocidade menor que 20 km/h, enquanto que os ligantes AMP 60/85 e CAP 50/70 recebe uma classificação *High* (tráfego pesado) com tráfego lento ou de 1×10^7 a 3×10^7 e com velocidade de 20 a 70 km/h (Bahia, 2014; AASHTO M332, 2014).

A classificação *High* (tráfego pesado) do ligante CAP 50/70 está em desacordo com o nível de tráfego sugerido por Nascimento (2008) e Faccin (2018) e de acordo os níveis de tráfego sugerido por Bastos *et al.* (2017). Entretanto, a classificação *High* (tráfego pesado) do ligante AMP 60/85 não está de acordo com o tráfego extremamente pesado de Bastos *et al.* (2017) e Faccin (2018), conforme os resultados obtidos nesta pesquisa.

4.3.2.2 Correlação do FN em função dos parâmetros do agregado

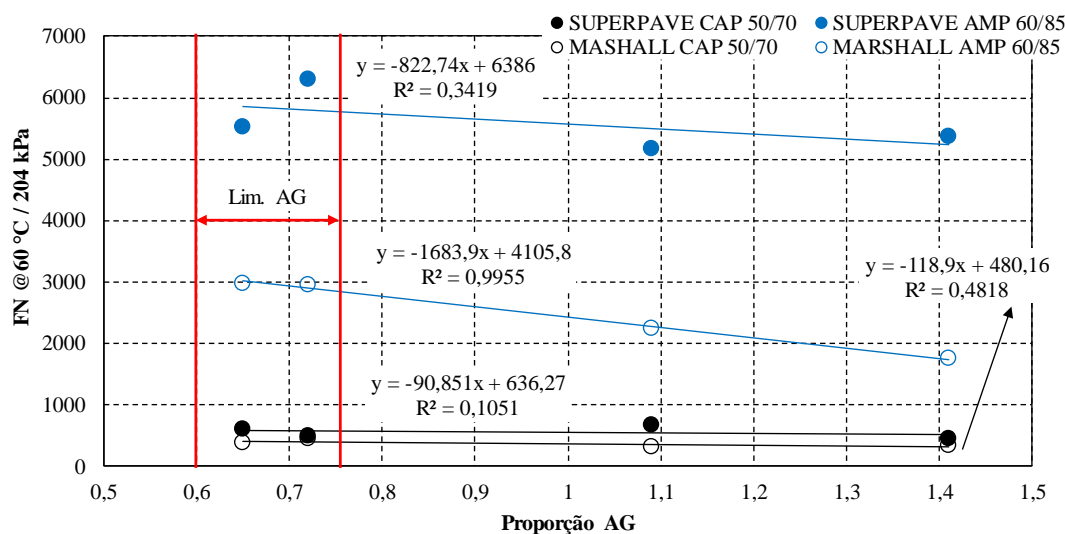
A análise com foco na granulometria indica que o ajuste granulométrico proposto pelo método Bailey aumentou de 7% a 69% o FN médio das misturas, exceto a S BAI FX B 50/70 com decréscimo de 10%. Nas misturas Marshall, cujos teores são mais elevados que nas misturas SUPERPAVE, o ganho de resistência com o método foi mais significativo. Em teores mais elevados a mistura é mais suscetível a deformar-se, sendo que a resistência aumenta à medida que o esqueleto mineral fornece um maior intertravamento.

Alguns autores (Fred, 1967; Roberts *et al.*, 1996) comentam que a granulometria se torna como a mais importante propriedade, pois interage com as outras propriedades, tais como: rigidez, trabalhabilidade, resistência à fadiga e a deformação permanente. A granulometria, de

certa forma, é responsável principalmente pelo intertravamento dos agregados, ou seja, há quantidade certa de agregados miúdos para ocuparem os espaços vazios deixados pelos agregados graúdos, dentro das quantidades corretas para cada fração.

Entretanto, apesar do ganho de resistência proporcionado pelo método Bailey nos resultados de FN, não se encontrou uma boa correlação entre a proporção AG e o FN das misturas, apresentado na Figura 92. A proporção AG é o fator mais importante para a seleção da mistura, pois avalia a compactação da porção graúda e os vazios resultantes desse arranjo, e então os valores da proporção AG abaixo do especificado indicam, dentro do método Bailey de seleção, que as misturas estarão sujeitas a segregação, e que, valores acima que a fração de agregado graúdo estão desbalanceados e as partículas que não são consideradas agregado graúdo tendem a controlar o esqueleto mineral.

Figura 92 – Correlação da Proporção AG das granulometrias e o FN obtido nas misturas asfálticas



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

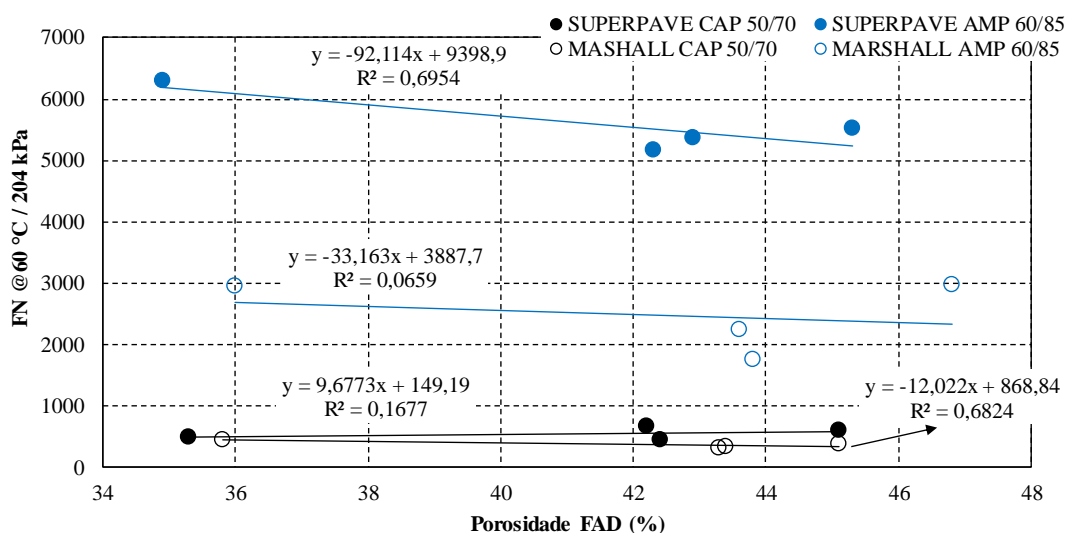
Conforme esperado, as curvas de tendência indicam que um aumento da proporção AG reduz o valor do FN, pois as misturas com a proporção AG acima do especificado apresentam os agregados graúdos dispersos na estrutura, sem um contato granular. Percebe-se que a redução ficou mais acentuada para as misturas com ligante AMP 60/85, mais especificamente com as misturas dosadas através da metodologia Marshall. Já para as misturas com o ligante CAP 50/70 esta redução é muito pequena e apresentaram as equações com os menores R^2 . Novamente não se nota este efeito nas misturas com ligante HIMA, nas quais não obtiveram FN até 10000 ciclos e nem os 5% da deformação.

Além da correlação do método Bailey, também se analisou a relação dos resultados obtidos pelas misturas asfálticas no ensaio FN com a porosidade FAD. A porosidade é uma medida adimensional definida como a proporção relativa entre o volume de vazios e volume total de determinado material. Entretanto, a porosidade, que é o parâmetro de avaliação do método, só pode ser calculada após o processo de dosagem, diferentemente do método Bailey, que é realizado para se pressupor o comportamento da mistura com base na granulometria e análise dos parâmetros do método.

A porosidade FAD inferior a 48% indica que a composição granulométrica tem grande potencial de resistência à deformação permanente, e para porosidades FAD superiores a 52%, espera-se uma baixa resistência à deformação permanente.

Nota-se pela Figura 93, que apresenta a correlação entre o FN e a porosidade FAD das misturas separadas por método de dosagem e tipo de ligante asfáltico, que para todas as misturas asfálticas estudadas as porosidades FAD são menores que 48%, indicando que os tamanhos de agregados os quais compõem a FAD das misturas formam um esqueleto mineral resistente à deformação permanente. Visualiza-se ainda que em quase em todas as correlações, à medida que há um aumento na porosidade reduz-se o FN das misturas, corroborando com o que comenta a literatura.

Figura 93 – Correlação com a Porosidade FAD e os FN's obtidos nas misturas asfálticas



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

Analisando os valores de FN de Nascimento (2008), Bastos *et al.* (2015), Centofante (2016) e Ferreira *et al.* (2016), percebe-se que os FN's das 24 misturas asfálticas desta pesquisa

foram iguais ou superiores aos encontrados nos estudos citados anteriormente, indicando coerência com os resultados obtidos. Entretanto, tem-se misturas com porosidades semelhantes e valores de FN distintos, não sendo sensível ao se comparar os comportamentos entre as misturas aqui estudadas com diferentes granulometrias e ligantes asfálticos.

Pela Figura 93 percebe-se que para as misturas SUPERPAVE com ligante AMP 60/85 e para as Marshall com ligante CAP 50/70, apresentam bons valores de R^2 , semelhante ao encontrado em Ferreira *et al.* (2016). Entretanto, para as misturas SUPERPAVE com ligante CAP 50/70 e para as misturas Marshall com ligante AMP 60/85 os valores de R^2 foram baixos. Tal fato explica-se provavelmente por causa das 24 misturas apresentarem porosidade abaixo de 48%, e pode ter comprometido a relação, pois não abrange um espectro maior do valor de porosidade FAD.

É possível verificar, através das correlações (parâmetros dos agregados, parâmetros do ligante asfáltico e pela regressão linear múltipla), que de modo geral a principal característica que mais influenciou no parâmetro *Flow Number* é o tipo de ligante asfáltico utilizado, uma vez que, quanto maior foi a modificação do ligante asfáltico maior foi o resultado de *FN*.

Ressalta-se que tanto o método Bailey quanto o FAD, buscam propor composições granulométricas de forma sistemática e racionais compatíveis com a boa durabilidade de uma mistura asfáltica. O método Bailey mostrou-se uma ferramenta de rápida avaliação inicial ao se pressupor o comportamento da mistura com base na granulometria e análise dos parâmetros do método. A metodologia FAD também se mostrou um bom indicador quanto à deformação permanente quando se compara os resultados desta pesquisa com outros estudos da literatura, além de considerar parâmetros como densidade aparente da mistura de agregados, densidade máxima medida da mistura, teor de ligante e volume de vazios da mistura, que são propriedades influenciadas pelo agregado e ligante asfáltico.

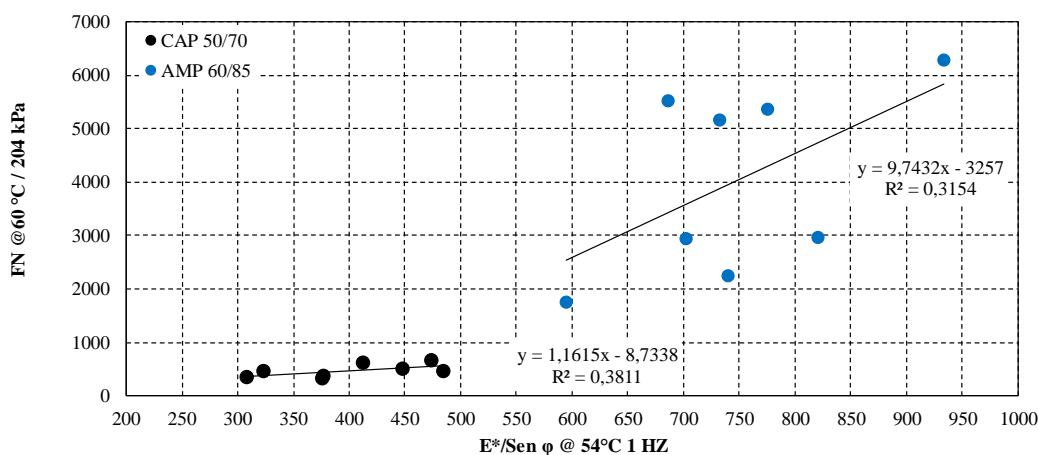
4.3.2.3 Correlação do FN em função dos parâmetros do Módulo Complexo

Por fim, de modo a validar as inferências realizadas no item 4.2.2.5 que fez referência a deformação permanente dos resultados de $|E^*|/\sin \phi$ obtido com o ensaio de Módulo Complexo, realizou-se então a correlação entre os valores de $|E^*|/\sin \phi$ com os resultados encontrados com o ensaio de *Flow Number* das misturas asfálticas.

Assim como as inferências no Módulo Complexo que usualmente são realizadas na temperatura de 54 °C e nas baixas frequências (0,01Hz a 1Hz), tentou-se realizar as correlações com os resultados obtidos no *FN*, conforme ilustra a Figura 94, que demonstra a correlação do

FN com os valores de $|E^*|/\text{sen } \varphi$ na temperatura de 54 °C e 1Hz. A correlação foi realizada para as outras frequências nesta mesma temperatura, mas escolheu-se demonstrar nesta frequência (1Hz) pois se mostrou a melhor correlação.

Figura 94 – Correlação *Flow Number* com relação $|E^*|/\text{sen } \varphi$ na temperatura de 54°C e 1Hz



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

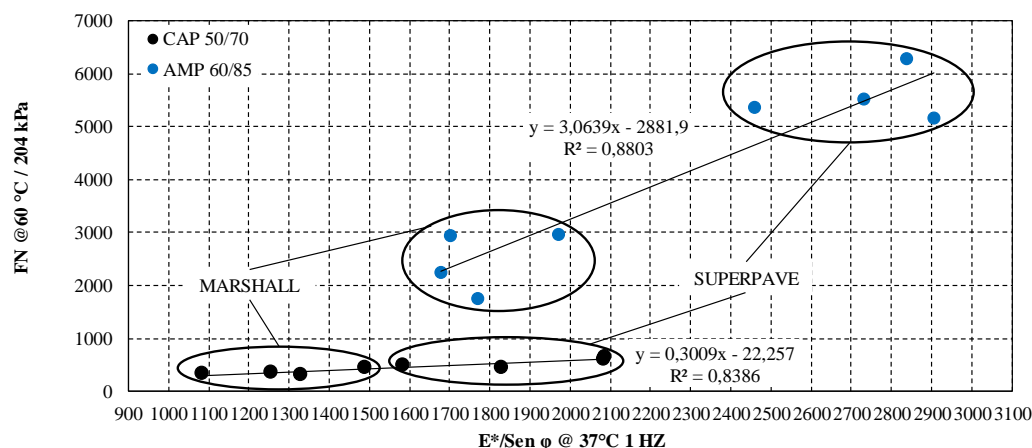
Percebe-se que assim como demonstrado na inferência no item do Módulo Complexo, não se tem uma boa correlação para o $|E^*|/\text{sen } \varphi$ e *FN* nesta temperatura, uma vez que para as misturas com ligante AMP 60/85 o R^2 ficou com 0,31 e para as misturas com ligante CAP 50/70 o R^2 é de 0,38. A baixa correlação entres estes parâmetros pode estar relacionada à dificuldade de medir o ângulo de fase nesta temperatura (queda sucessiva dos pinos). Da mesma forma que foi realizado nas inferências, utilizou-se dos valores de $|E^*|/\text{sen } \varphi$ na temperatura de 37°C para verificar a correlação.

A Figura 95 apresenta a correlação entre os resultados de *FN* e o parâmetro $|E^*|/\text{sen } \varphi$ obtidos no ensaio de Módulo Complexo na temperatura de 37°C e na frequência de 1Hz. Assim como na correlação da temperatura de 54°C, a frequência de 1Hz foi a que apresentou a melhor correlação das misturas dentre as frequências de análise da deformação permanente.

Nota-se que para a temperatura de 37°C a correlação mostrou-se mais positiva, sendo que para as misturas com ligante AMP 60/85 apresentaram um R^2 de 0,88 e para as misturas com ligante CAP 50/70 o R^2 foi de 0,83. De certa forma, se analisarmos cada ligante asfáltico em separado, percebe-se que à medida que se aumenta o valor de $|E^*|/\text{sen } \varphi$ tem-se um aumento no *Flow Number*. Entretanto, ao se considerar todas as misturas juntas, inclusive com as misturas com ligante HIMA (não obtiveram *FN* com 10000 ciclos), esta correlação não se

mostra satisfatória, pois o ranqueamento indicado pela correlação não segue o mesmo apresentado pelo ensaio de *Flow Number*.

Figura 95 – Correlação *Flow Number* com relação $|E^*|/\text{sen } \phi$ na temperatura de 37°C e 1Hz



Fonte: Adaptado de Almeida Júnior (2016)

4.3.3 Ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico

Assim como a deformação permanente, o fenômeno de fadiga na pavimentação asfáltica é uma das principais patologias que afetam estruturalmente e demandam um maior investimento para manutenção. A correta modelagem e compreensão da fadiga nos pavimentos rodoviários está em crescente evolução, e é um grande desafio, uma vez que este fenômeno é de grande complexidade.

O desempenho de materiais quanto à fadiga normalmente é caracterizado pela curva conhecida como "curva de Wöhler". A curva de Wöhler é um gráfico de magnitude de tensão ou deformação por número de ciclos (N) em escala logarítmica. De acordo com esta medida, resistência à fadiga refere-se à capacidade de um material resistir a condições de carregamento cíclico. Este vem sendo o método para caracterização das misturas asfálticas perante a resistência à fadiga, que será apresentada neste trabalho como a abordagem clássica, mesmo que o ensaio tenha sido executado na Tração Direta Uniaxial Cíclico.

Em seguida são apresentados os resultados tratados sob a abordagem do modelo S-VECD, como as curvas características de dano (C vs S) e as envoltórias de ruptura do critério de falha G^R . A abordagem contempla os dados gerados incluindo a caracterização viscoelástica linear com os resultados de módulo complexo, transformando o método em uma ferramenta de grande potencial para previsão do comportamento dos materiais.

Para a comparação das misturas e seu ranqueamento, utilizou-se conforme explicado na metodologia o Software AEMC/SISPAV com as deformações de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico, calculadas para as estruturas projetadas e obteve-se os Nf (vida de fadiga), tanto para as equações obtidas das curvas de Wöhler como para a equação propostas por Nascimento (2016), para cada mistura asfáltica estudada.

Por fim, buscou-se, assim como nos demais ensaios, devido à grande quantidade de variáveis das misturas que podem influenciar no resultado do ensaio de fadiga, a realização da regressão linear múltipla entre os valores de Nf encontrados e as variáveis independentes das misturas asfálticas estudadas. Utilizou-se ainda dos índices encontrados no ensaio instrumentado de RT, para buscar alguma correlação destes índices com os resultados apresentados no ensaio de fadiga.

4.3.3.1 Curvas de Wöhler – Abordagem Clássica

A abordagem clássica através das curvas de Wöhler no Brasil é realizada através do ensaio por compressão diametral em amostras cilíndricas de 63mm de altura e 100mm de diâmetro. O ensaio pode ser realizado tanto com TC (tensão controlada) como DC (deformação controlada), na temperatura de 25°C e uma frequência entre carregamentos de 1Hz. Ao final, são plotadas as curvas de Wöhler em função do número de ciclos pela deformação/tensão, que simboliza uma relação entre o desempenho à fadiga do material e ao tipo de sollicitação, podendo dessa forma, serem utilizadas para calcular outras deformações/tensões desejadas através da equação que representa a ligação dos pontos.

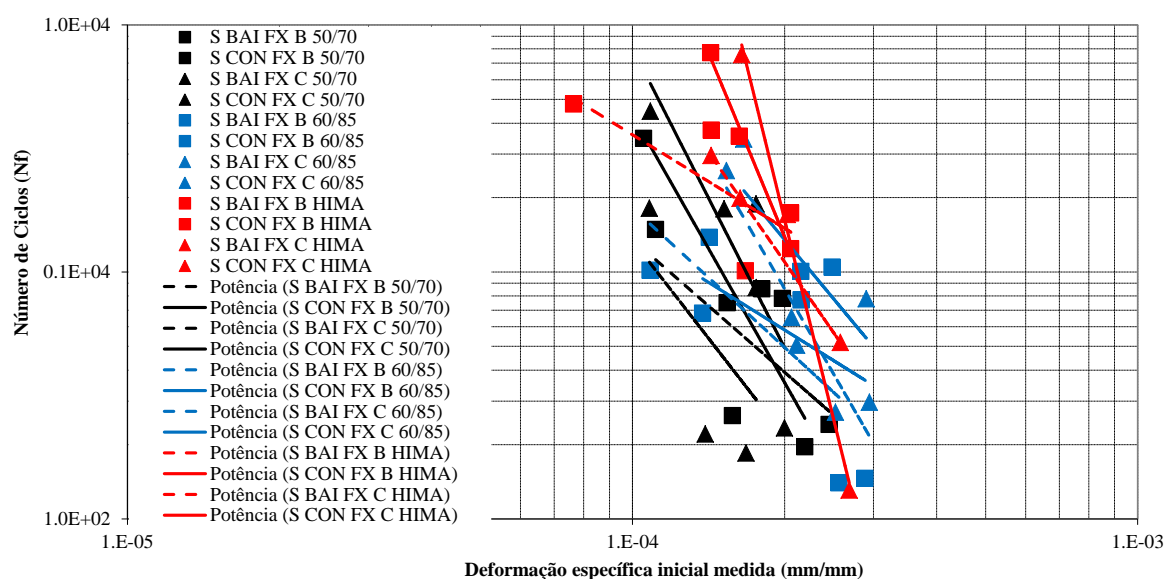
Para a montagem das curvas de Wöhler com o ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico, utilizou-se da mesma teoria que a abordagem clássica, ou seja, com a deformação inicial medida *versus* o número de ciclos até a falha (N_f), sendo que o número de ciclos em que ocorreu a falha foi pela inflexão do ângulo de fase.

Optou-se pela consideração da deformação inicial “medida” (nos ciclos iniciais, 50 ao 150), pois percebeu-se que o cálculo realizado para iniciar o ensaio, e, para efetuar o deslocamento do pistão na prensa estava um pouco defasado do que a medida dos LVDT’s nos ciclos iniciais, visto que o ensaio é realizado ao controle do atuador. Dessa forma, após o ensaio, fez-se a leitura da deformação inicial medida nestes ciclos iniciais.

As curvas de Wöhler são demonstradas nas Figuras 96, 97 e 98, separadamente por método de dosagem e em seguida plotadas todas juntas.

Na Figura 96, estão plotadas as misturas dosadas através da metodologia SUPERPAVE. De uma forma geral, ao se analisar uma curva de Wöhler, as misturas que se encontram mais ao quadrante superior direito, seriam mais resistentes ao fenômeno de fadiga, ou seja, apresentam um maior número de ciclos até a falha. Mas esta análise direta das curvas pode acarretar em conclusões equivocadas, uma vez que, as misturas apresentam diferentes valores de rigidez e, conseqüentemente distribuem as tensões de uma maneira diferente.

Figura 96 – Curvas de Wöhler para as misturas dosadas na metodologia SUPERPAVE



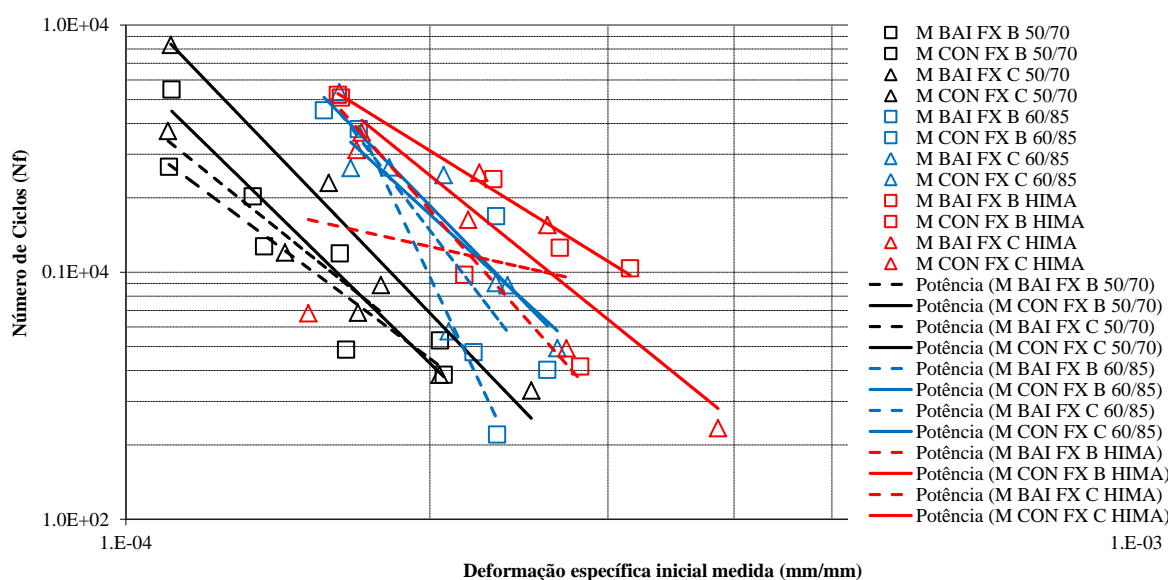
Nota-se que para as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE há uma pequena tendência de as misturas com os ligantes modificados (AMP 60/85 e HIMA), apresentarem um desempenho à fadiga superior do que as misturas com ligante convencional. Vale ressaltar que, as misturas dosadas por esse método apresentaram os menores teores de ligante de projeto, o que justifica, de certa forma, a superposição das misturas nas curvas de Wöhler.

A tendência das misturas com os ligantes modificados, AMP 60/85 e HIMA, de apresentar um maior desempenho à fadiga, é mais evidenciado nas misturas com maior teor de ligante asfáltico, como pode ser verificado através da Figura 97, na qual está plotada as misturas dosadas através da metodologia Marshall.

Verifica-se que, comparando as misturas dosadas com os ligantes asfálticos modificados, as misturas com ligante HIMA apresentam uma pequena superioridade de desempenho à fadiga em relação às misturas dosadas com o AMP 60/85. Ainda, é possível notar que as misturas com enquadramento granulométrico Convencional apresentaram desempenho

superior às misturas com enquadramento granulométrico Bailey. Já na questão das faixas granulométricas, pelas figuras apresentadas, não se verifica tendência de superioridade para nenhuma das faixas.

Figura 97 - Curvas de Wöhler para as misturas dosadas na metodologia Marshall

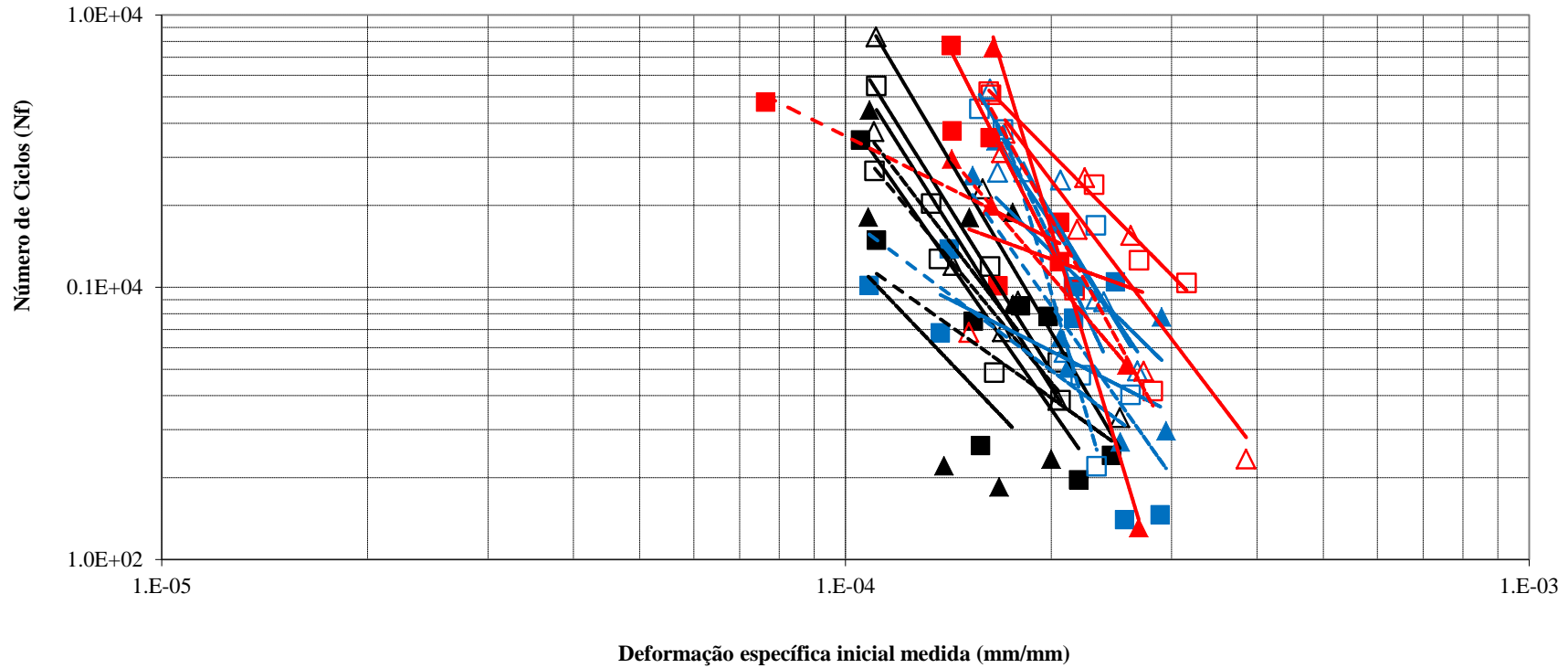


Devido a quantidade de dados plotados nas curvas, se fez a escolha de apresentar as curvas de Wöhler separadas pelo método de dosagem, e de modo a representar todas as curvas de Wöhler juntas, apresenta-se a Figura 98. As curvas de Wöhler sempre são apresentadas com as equações geradas de cada linha de tendência e juntamente com os seus R^2 , novamente, devido a quantidade de dados para plotar no gráfico, escolheu-se apresentar cada equação juntamente com o R^2 em uma tabela em separado, onde a mesma está descrita na Tabela 27.

Tabela 27 – Equações geradas pelas Curvas de Wöhler

MISTURAS	EQUAÇÃO CURVA DE WÖHLER	R^2	MISTURAS	EQUAÇÃO CURVA DE WÖHLER	R^2
S CON FX B 50/70	$N_f = 2E-10. \epsilon^{-3,601}$	0,91	M CON FX B 50/70	$N_f = 7E-12. \epsilon^{-3,991}$	0,93
S BAI FX B 50/70	$N_f = 0,001. \epsilon^{-1,785}$	0,47	M BAI FX B 50/70	$N_f = 2E-08. \epsilon^{-3,043}$	0,84
S CON FX C 50/70	$N_f = 6E-12. \epsilon^{-4,026}$	0,71	M CON FX C 50/70	$N_f = 1E-12. \epsilon^{-4,244}$	0,95
S BAI FX C 50/70	$N_f = 4E-07. \epsilon^{-2,633}$	0,28	M BAI FX C 50/70	$N_f = 3E-09. \epsilon^{-3,283}$	0,92
S CON FX B 60/85	$N_f = 0,1091. \epsilon^{-1,278}$	0,21	M CON FX B 60/85	$N_f = 6E-12. \epsilon^{-4,182}$	0,84
S BAI FX B 60/85	$N_f = 0,0006. \epsilon^{-1,877}$	0,49	M BAI FX B 60/85	$N_f = 7E-29. \epsilon^{-8,683}$	0,99
S CON FX C 60/85	$N_f = 1E-05. \epsilon^{-2,463}$	0,47	M CON FX C 60/85	$N_f = 3E-10. \epsilon^{-3,734}$	0,84
S BAI FX C 60/85	$N_f = 6E-10. \epsilon^{-3,553}$	0,92	M BAI FX C 60/85	$N_f = 3E-16. \epsilon^{-5,342}$	0,76
S CON FX B HIMA	$N_f = 7E-15. \epsilon^{-4,943}$	0,99	M CON FX B HIMA	$N_f = 1E-05. \epsilon^{-2,539}$	0,98
S BAI FX B HIMA	$N_f = 0,3352. \epsilon^{-1,257}$	0,56	M BAI FX B HIMA	$N_f = 2E-13. \epsilon^{-4,61}$	0,97
S CON FX C HIMA	$N_f = 3E-27. \epsilon^{-8,328}$	0,99	M CON FX C HIMA	$N_f = 1E-08. \epsilon^{-3,306}$	0,94
S BAI FX C HIMA	$N_f = 1E-07. \epsilon^{-2,952}$	1	M BAI FX C HIMA	$N_f = 5,4204. \epsilon^{-0,911}$	0,07

Figura 98 - Curvas de Wöhler para todas as misturas



- | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| ■ S BAI FX B 50/70 | ■ S CON FX B 50/70 | ▲ S BAI FX C 50/70 | ▲ S CON FX C 50/70 |
| □ M BAI FX B 50/70 | □ M CON FX B 50/70 | △ M BAI FX C 50/70 | △ M CON FX C 50/70 |
| ■ S BAI FX B 60/85 | ■ S CON FX B 60/85 | ▲ S BAI FX C 60/85 | ▲ S CON FX C 60/85 |
| □ M BAI FX B 60/85 | □ M CON FX B 60/85 | △ M BAI FX C 60/85 | △ M CON FX C 60/85 |
| ■ S BAI FX B HIMA | ■ S CON FX B HIMA | ▲ S BAI FX C HIMA | ▲ S CON FX C HIMA |
| □ M BAI FX B HIMA | □ M CON FX B HIMA | △ M BAI FX C HIMA | △ M CON FX C HIMA |
| - - - Potência (S BAI FX B 50/70) | — Potência (S CON FX B 50/70) | - - - Potência (S BAI FX C 50/70) | — Potência (S CON FX C 50/70) |
| - - - Potência (M BAI FX B 50/70) | — Potência (M CON FX B 50/70) | - - - Potência (M BAI FX C 50/70) | — Potência (M CON FX C 50/70) |
| - - - Potência (S BAI FX B 60/85) | — Potência (S CON FX B 60/85) | - - - Potência (S BAI FX C 60/85) | — Potência (S CON FX C 60/85) |
| - - - Potência (M BAI FX B 60/85) | — Potência (M CON FX B 60/85) | - - - Potência (M BAI FX C 60/85) | — Potência (M CON FX C 60/85) |
| - - - Potência (S BAI FX B HIMA) | — Potência (S CON FX B HIMA) | - - - Potência (S BAI FX C HIMA) | — Potência (S CON FX C HIMA) |
| - - - Potência (M BAI FX B HIMA) | — Potência (M CON FX B HIMA) | - - - Potência (M BAI FX C HIMA) | — Potência (M CON FX C HIMA) |

Ao analisar a Figura 98, percebe-se que as misturas dosadas através da metodologia Marshall apresentaram desempenho superior quanto à fadiga em relação às dosadas pela metodologia SUPERPAVE. Sabe-se que misturas com pouco teor de ligante e muito rígidas, são misturas asfálticas muito suscetíveis ao trincamento por fadiga, e que, para um melhor desempenho a este fenômeno, as misturas com teor de ligante dentro de certo limite, tendem a ter resposta ao trincamento por fadiga melhor do que as misturas asfálticas com teores de ligantes baixos. Lembrando que o excesso de ligante asfáltico pode resultar em um aumento prematuro da deformação permanente.

Com os dados brutos das curvas de Wöhler, é possível classificar/ranquear as misturas asfálticas quanto ao desempenho à fadiga, e isso se dá por meio do cálculo da área sobre a curva de fadiga em espaço log-log. É um índice denominado Fator de Área de Fadiga (FAF), e representa a área que é limitada pela curva de fadiga entre duas amplitudes de deformação.

As faixas de deformações foram escolhidas conforme especifica Nascimento (2015), entre 100 e 200 μ s. O autor comenta que este intervalo é o mais próximo das deformações encontradas na fibra inferior dos revestimentos brasileiros. De um ponto de vista simplificado, quanto maior for o valor do FAF, melhor será a vida de fadiga da mistura asfáltica, uma vez que, as maiores áreas sobre as curvas de Wöhler são as ocasionadas pelo maior número de ciclos.

Na Tabela 28 estão os valores encontrados de FAF para cada mistura e, juntamente, a classificação ordenada da melhor até a pior mistura. Fez-se uso das cores para diferenciação, principalmente dos ligantes asfálticos, para uma melhor visualização das misturas.

Através da classificação das misturas asfálticas pelo FAF das curvas de Wöhler, conclui-se que o melhor desempenho de fadiga foi obtido para as misturas com ligante asfáltico HIMA e o AMP 60/85 (materiais modificados com polímeros). Porém, existe uma exceção da mistura S CON FX C 50/70 que através da classificação FAF é a melhor mistura frente ao desempenho à fadiga, contrariando, as outras misturas como o CAP 50/70 que se encontram ao final da classificação que seriam as piores misturas para o desempenho a fadiga.

Tabela 28 – Classificação das misturas asfálticas pelo FAF das curvas de Wöhler – Abordagem Clássica

MISTURAS	FAF - Curvas de Wohler - Abordagem Clássica	CLASSIFICAÇÃO
S CON FX B 50/70	1,2532	18°
S BAI FX B 50/70	1,1654	23°
S CON FX C 50/70	2,7924	1°
S BAI FX C 50/70	1,1252	24°
S CON FX B 60/85	1,1913	22°
S BAI FX B 60/85	1,2052	21°
S CON FX C 60/85	1,3490	11°
S BAI FX C 60/85	1,3412	12°
S CON FX B HIMA	1,4669	7°
S BAI FX B HIMA	1,3137	13°
S CON FX C HIMA	1,6664	2°
S BAI FX C HIMA	1,3136	14°
M CON FX B 50/70	1,2669	17°
M BAI FX B 50/70	1,2086	20°
M CON FX C 50/70	1,3056	15°
M BAI FX C 50/70	1,2387	19°
M CON FX B 60/85	1,4680	6°
M BAI FX B 60/85	1,5865	3°
M CON FX C 60/85	1,4603	8°
M BAI FX C 60/85	1,5175	5°
M CON FX B HIMA	1,4371	9°
M BAI FX B HIMA	1,5193	4°
M CON FX C HIMA	1,4228	10°
M BAI FX C HIMA	1,2766	16°

Nascimento (2015) realizou uma classificação pela metodologia FAF para as misturas estudadas em sua tese e concluiu também que o melhor desempenho de fadiga, para as condições de deformação controlada no nível do material, foi obtido para as misturas com os ligantes asfálticos HIMA e AMP 60/85. Já as misturas com os CAP's 50/70 e 15/75, ligantes sem modificação, apresentaram os piores desempenhos quanto a fadiga.

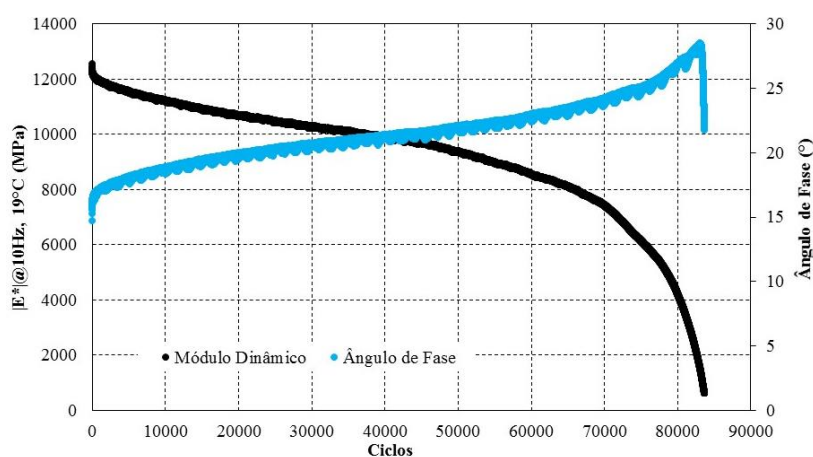
As classificações apresentadas através do FAF e pelas curvas Wöhler não levam em conta os valores de rigidez das misturas asfálticas, nem a combinação das propriedades das misturas com a estrutura do pavimento, clima e carga de tráfego. Estas variáveis podem afetar significativamente o desempenho em serviço das misturas asfálticas, especialmente porque as amostras apresentam propriedades Viscoelásticas lineares muito diferentes (valores de rigidez). Sabe-se que misturas com maiores valores de rigidez, até certo limite, tendem absorver mais tensão numa estrutura de pavimento.

4.3.3.2 Caracterização a Fadiga através do Protocolo de Análise pelo Modelo S-VECD

Para gerar as curvas características de dano e análise, foi utilizado o software Matlab, com sequência de código desenvolvida pela Universidade Federal do Ceará (UFC) para compilação dos dados brutos saídos da prensa UTM-25. O modelo S-VECD foi ajustado aos resultados em diferentes condições, variando a amplitude da deformação. Foi utilizada uma amostra para cada nível de deformação pré-determinado (cerca de 100 a 250 μ S). O procedimento utilizado para o processamento dos dados foi apresentado na metodologia, na seção que descreve o ensaio de Fadiga Tração Direta Uniaxial Cíclico.

Em um primeiro momento, devido ao software utilizado na prensa UTM-25 não finalizar o ensaio sem que o operador o finalize, torna-se de difícil compreensão o número do ciclo final que caracteriza a queda no Ângulo de Fase, definido como o critério de ruptura para o ensaio. Para isto, gerou-se as curvas de Módulo Dinâmico (E^*) e do Ângulo de Fase (δ) versus o número de ciclos para cada amostra, para então verificar o número de ciclos no pico do Ângulo de Fase determinado como o valor de N_f . Na Figura 99 está representada um exemplo do gráfico utilizado para verificação do pico de queda do Ângulo de Fase. A mistura escolhida para representar é uma das amostras utilizadas na M CON FX C 50/70.

Figura 99 - Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase versus número de ciclos de ensaio de fadiga



Percebe-se que durante o ensaio as amostras sofreram deterioração progressiva, cujo fenômeno, juntamente com a falha prematura, é considerado efeito das cargas repetidas. Especificamente, à medida em que o número de ciclos aumenta, o valor do Módulo Dinâmico diminui enquanto o valor do Ângulo de Fase aumenta até o ponto de inversão.

Para utilização desse modelo, dois parâmetros principais devem ser quantificados: a pseudo-rigidez (C), também chamada de integridade do material, e o acúmulo de dano (S). A relação entre estes parâmetros é única para um dado material, podendo ser considerada como uma propriedade fundamental. Assim, ensaios realizados em uma condição específica permitem a obtenção do comportamento do material em diversas outras condições, reduzindo o tempo de ensaios laboratoriais. Ainda, esse modelo pode ser utilizado de várias formas, porém duas valem destaque: a possibilidade de obtenção de curvas de fadiga em diferentes condições daquela ensaiada; e, propiciar informações necessárias à análise mecânica do pavimento a partir do dano contínuo viscoelástico.

Esta relação C versus S é independente de muitos dos fatores que afetam o desempenho à fadiga como temperatura e frequência, por exemplo, portanto, pode descrever o comportamento de dano a partir da realização de uma quantidade relativamente pequena de ensaios de laboratório. Para as misturas em estudo, gerou-se um ajuste (*fitting*) das amostras, por meio da equação do modelo de potência (*Power Law*) utilizada, que é do tipo: $C = 1 - C_{11} \times S^{C_{12}}$, onde C_{11} e C_{12} são as constantes de regressão. Através deste ajuste e da Curva Característica de Dano, obtêm-se os principais parâmetros do S-VECD.

Na Tabela 29 são apresentados os coeficientes C_{11} e C_{12} obtidos pelo *fitting* da curva C vs S e os coeficientes Y e Δ das envoltórias de ruptura para cada uma das misturas. As envoltórias são ajustadas por um modelo de potência (Equação 21), apresentadas no formato linear na escala logarítmica com o G^R correlacionando fortemente com o Nf.

$$G^R = Y \times N_f^\Delta \quad 21$$

O C_{11} e C_{12} são os coeficientes da curva C versus S gerados pelo *fitting*, o Y e o Δ são os coeficientes do critério de ruptura G^R versus Nf (G^R é a taxa de variação da média da energia de pseudo-deformação com respeito ao número de ciclos). De posse desses parâmetros, é possível então a utilização de soluções analíticas e sistemas computacionais como o FLEXPAVE ou LVCED para a determinação da vida de fadiga (Nf) de estruturas de pavimentos considerando a velocidade do tráfego e as variações sazonais e diárias de temperatura.

Tabela 29 - Coeficientes C_{11} , C_{12} , Y e Δ para cada mistura

Mistura	Fitting curvas $C \times S$		G^r vs N_f	
	C_{11}	C_{12}	Y	Δ
S CON FX B 50/70	1,84E-04	0,70148	2,00E+07	-1,364
S BAI FX B 50/70	1,08E-04	0,75158	2,00E+09	-1,968
S CON FX C 50/70	1,19E-04	0,74404	5,00E+06	-1,276
S BAI FX C 50/70	1,67E-04	0,73667	4,00E+07	-1,508
S CON FX B 60/85	2,40E-04	0,66400	2,00E+08	-1,674
S BAI FX B 60/85	2,06E-04	0,69369	4,70E+04	-0,818
S CON FX C 60/85	1,75E-04	0,67922	2,00E+09	-1,857
S BAI FX C 60/85	1,46E-04	0,70003	2,00E+07	-1,318
S CON FX B HIMA	2,56E-04	0,66336	2,59E+05	-0,926
S BAI FX B HIMA	2,60E-04	0,68962	4,00E+09	-1,904
S CON FX C HIMA	4,37E-04	0,61421	2,00E+06	-1,189
S BAI FX C HIMA	3,18E-04	0,64731	9,00E+06	-1,324
M CON FX B 50/70	9,39E-05	0,77116	2,00E+07	-1,446
M BAI FX B 50/70	1,58E-04	0,71937	3,00E+07	-1,403
M CON FX C 50/70	1,69E-04	0,70627	8,00E+06	-1,270
M BAI FX C 50/70	1,35E-04	0,73230	2,00E+06	-1,090
M CON FX B 60/85	3,02E-04	0,63163	4,00E+07	-1,366
M BAI FX B 60/85	4,02E-04	0,61098	2,00E+07	-1,340
M CON FX C 60/85	3,48E-04	0,62758	3,00E+06	-1,097
M BAI FX C 60/85	2,79E-04	0,64204	5,00E+07	-1,389
M CON FX B HIMA	7,09E-04	0,57078	2,00E+09	-1,795
M BAI FX B HIMA	3,18E-04	0,64920	1,00E+06	-1,085
M CON FX C HIMA	1,07E-03	0,52765	6,00E+06	-1,391
M BAI FX C HIMA	1,51E-03	0,51738	2,00E+06	-1,145

Na Figura 100, está um exemplo da mistura S CON FX B HIMA do conjunto de curvas de cada mistura ajustado pelo *fitting* para obtenção da curva característica de dano da mistura. Os demais *fitting* estão na íntegra no Apêndice C deste trabalho.

As demais curvas características de dano são apresentadas com as funções já ajustadas, separou-se primeiramente através dos métodos de dosagem e por fim é apresentada todas as curvas plotas juntas. A Figura 101 apresenta as curvas características de dano para as misturas dosadas através da metodologia SUPERPAVE.

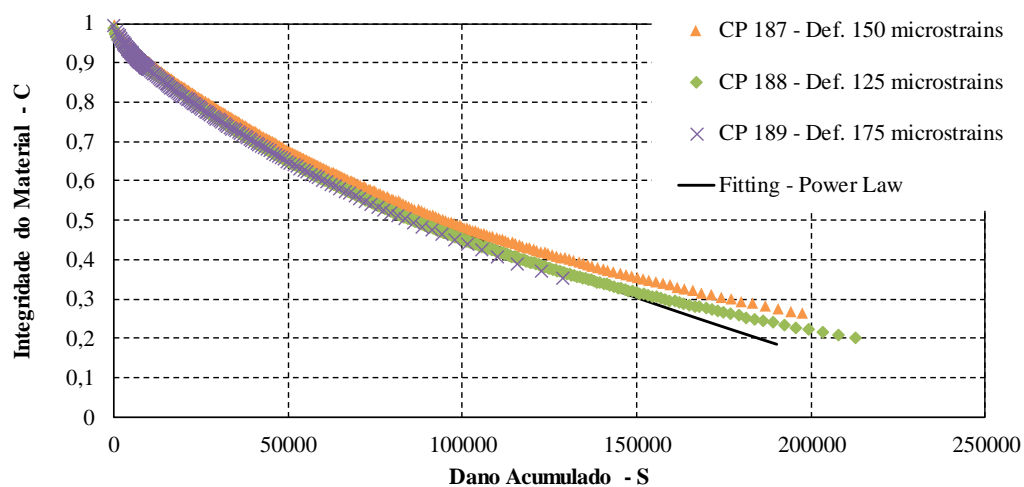
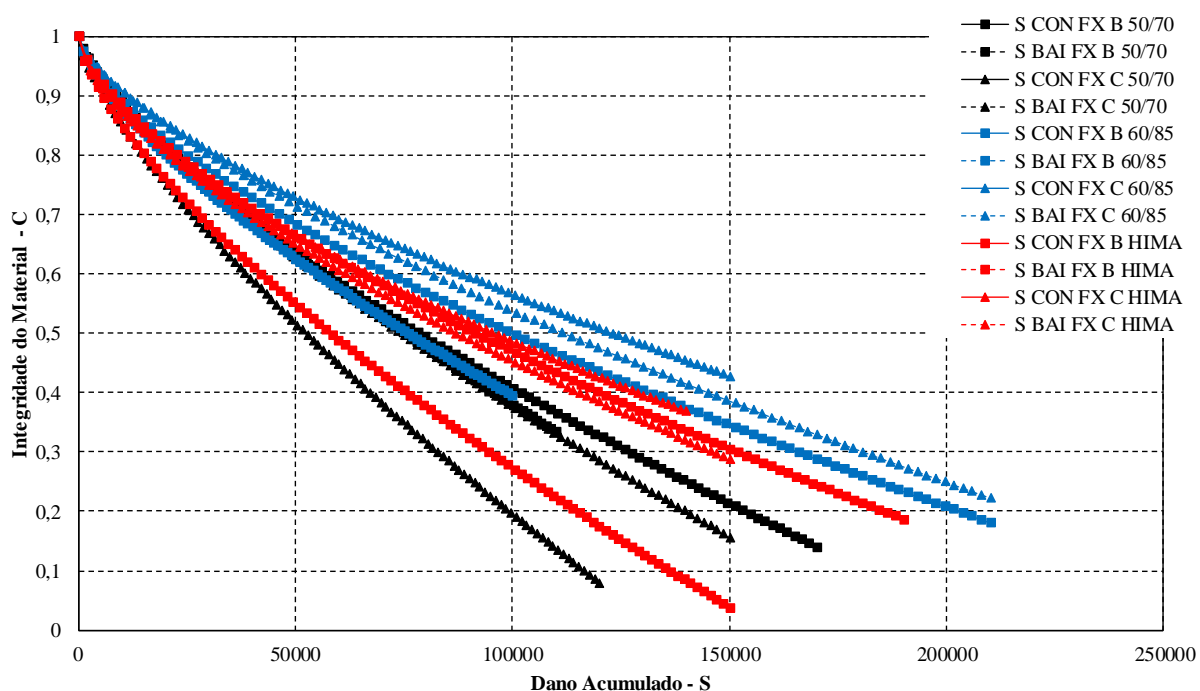
Figura 100 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S CON FX B HIMA

Figura 101 – Curvas C versus S para as misturas dosadas na metodologia SUPERPAVE



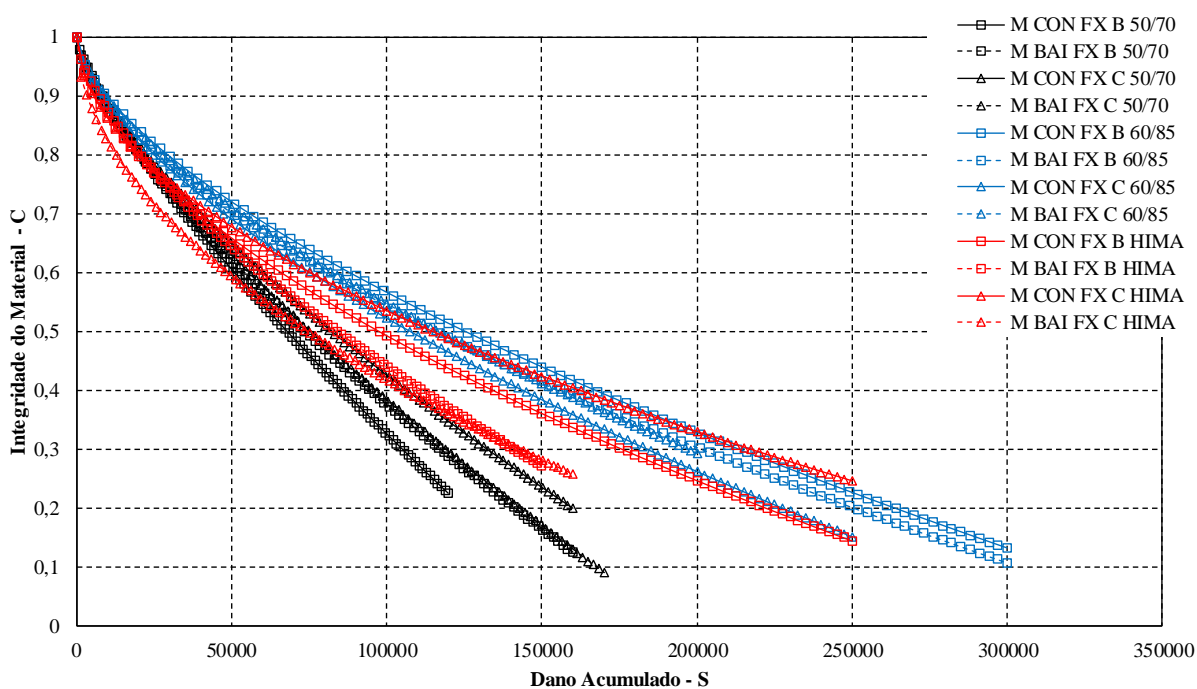
Como as curvas características de dano são únicas para cada material e descrevem o comportamento das misturas, o desempenho à fadiga é melhor analisado com simulações sob condições reais de pavimentos, o que será demonstrado no próximo item. Mas, de certa forma algumas observações podem ser feitas quanto a evolução do dano e a integridade dos materiais.

Percebe-se pela Figura 101 que as misturas com ligante convencional (cor preta) apresentam um nível de dano menor que as misturas com os ligantes modificados, com a

exceção das misturas S BAI FX B HIMA e S BAI FX B 60/85 que apresentam um nível de dano semelhante as misturas com ligante convencional. Inclusive a mistura S BAI FX B 60/85 rompeu com uma integridade maior, entorno de 0,4. O mesmo acontece para a mistura S CON FX C 60/85 que finalizam com um nível de integridade de 0,4, mas em contrapartida, demonstrou maior tolerância a danificação.

Esta peculiaridade das misturas com ligantes modificados apresentarem comportamento semelhante aos das misturas com ligante convencional também foi verificado em algumas misturas dosadas através da metodologia Marshall, na Figura 102, sendo elas M BAI FX C HIMA e M BAI FX B HIMA. Conforme foi relatado no item 3.4.3.3.1, onde são comentados os problemas na execução do ensaio, percebe-se que as misturas com a elevada quantidade de agregados graúdos, devido ao método de enquadramento Bailey, podem estar ligadas a um comportamento com alta rigidez, que conseqüentemente necessitavam de grandes deslocamentos do atuador da prensa para atingir um nível de deformação imposto, o que causou uma ruptura de caráter frágil. Isto pode estar ligado a uma solicitação maior de tensões nas amostras, que acabam sofrendo um nível maior de fratura em relação as demais misturas.

Figura 102 - Curvas C versus S para as misturas dosadas na metodologia Marshall

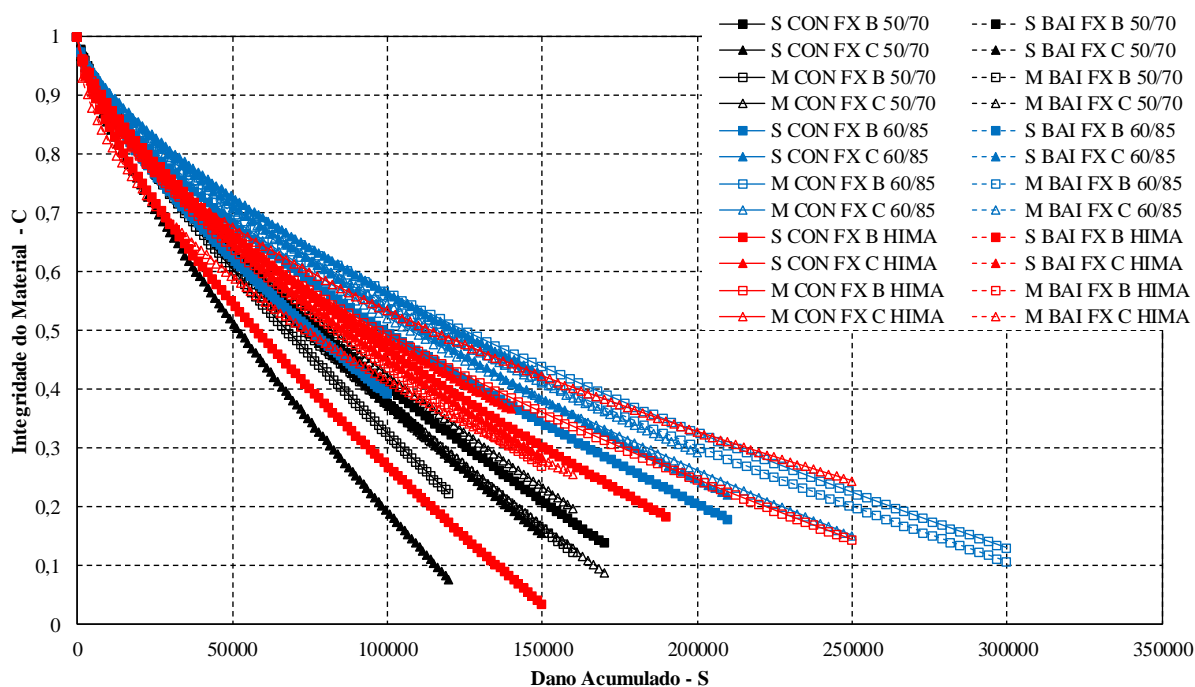


Nota-se através das misturas dosadas pela metodologia Marshall que, por consequência do método, apresentam maior teor de ligante de projeto e, ao se comparar as curvas das misturas

com os ligantes asfálticos distintos, ficam mais evidentes as diferenças no comportamento. Ou seja, misturas com ligantes convencionais são menos tolerantes ao acúmulo de dano, enquanto as misturas com asfaltos modificados atingem a ruptura com menor nível de integridade e por este motivo são mais tolerantes ao acúmulo de dano.

Para demonstrar as curvas características de dano plotadas todas juntas, é apresentado a Figura 103.

Figura 103 – Curvas C versus S para todas as misturas



Constata-se que tanto as curvas geradas para as misturas com ligante convencional, dosadas pela metodologia SUPERPAVE como as moldadas pela metodologia Marshall, tendem a apresentar uma maior perda de integridade do material quando se analisa um mesmo nível de dano acumulado. As concavidades das curvas tendem a apresentar a taxa de evolução da integridade pelo dano acumulado, ou seja, as misturas com ligante convencional não apresentam tal concavidade da curva, resultando assim numa taxa constante de evolução do dano. O caso é visualizado de forma contrária para as misturas com os ligantes modificados (AMP 60/85 e HIMA), que apresentam uma concavidade nas curvas maiores e, por consequência, tendem a apresentar uma taxa de perda menor de integridade e uma resistência maior ao dano acumulado.

Juntamente com as curvas características de dano, gerou-se as envoltórias de ruptura G^R versus N_f , que assim como as curvas C versus S são únicas para cada material e torna-se como uma propriedade fundamental do material na resistência ao dano, sendo ainda, independente da temperatura e do modo de carregamento (SABOURI *et al.* 2014). Podem ser analisadas da mesma forma que as curvas de Wöhler, de modo que misturas que tendem a ter um desempenho à fadiga melhor, que apresentam envoltórias localizadas mais acima e à direita, além de menores inclinações.

Nas Figuras 104, 105 e 106 estão apresentadas as envoltórias de ruptura G^R versus N_f . Primeiro estão plotadas as misturas dosadas através da metodologia SUPERPAVE, em seguida as misturas dosadas pela metodologia Marshall e, por fim, todas as misturas plotadas juntas. Devido a quantidade de dados apresentados em cada figura, fez-se uso da Tabela 30 para apresentar os dados do modelo gerado com as curvas juntamente com o R^2 de cada mistura.

Figura 104 – Envoltórias de ruptura G^R vs N_f para as misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE

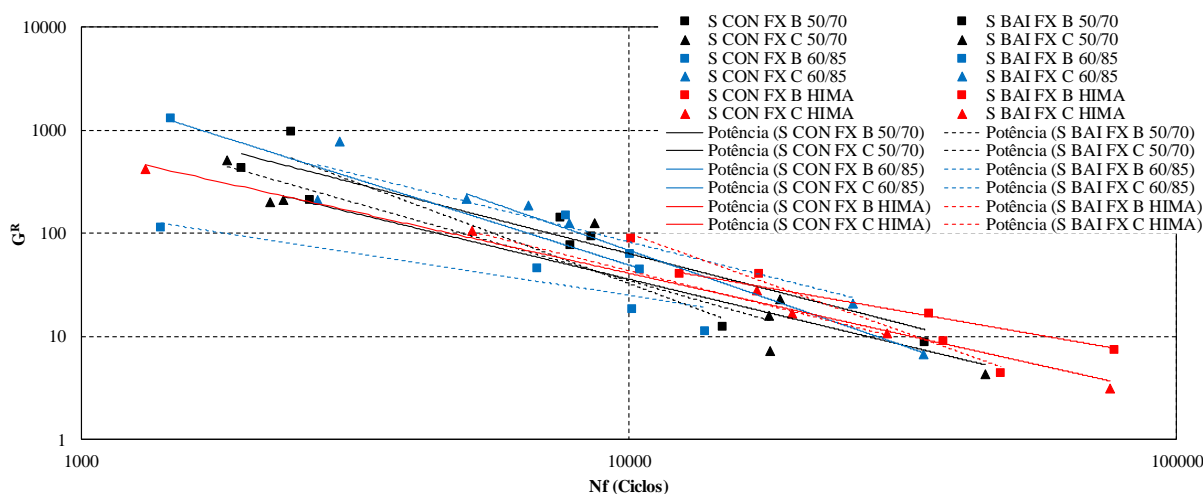
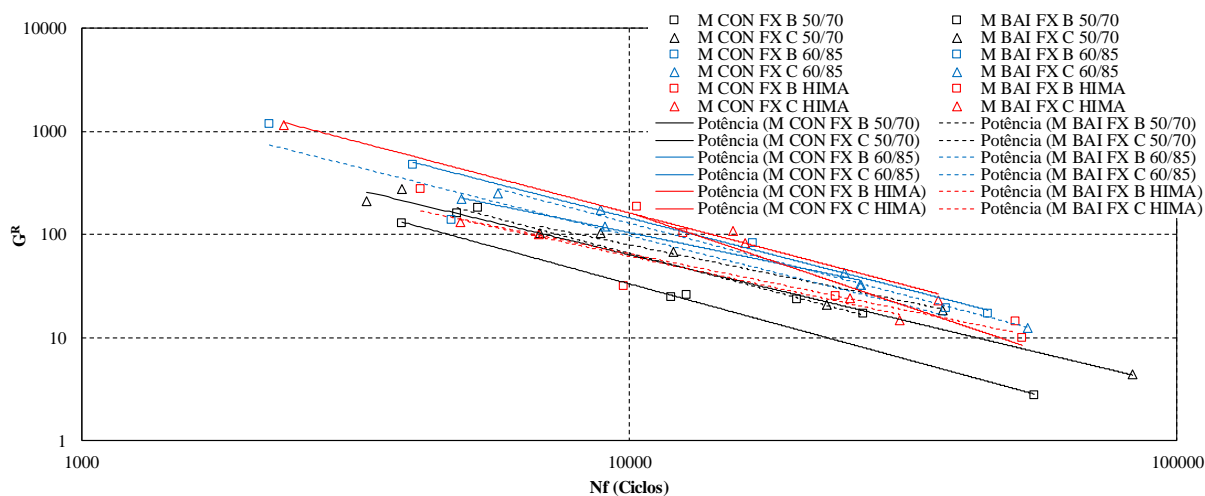
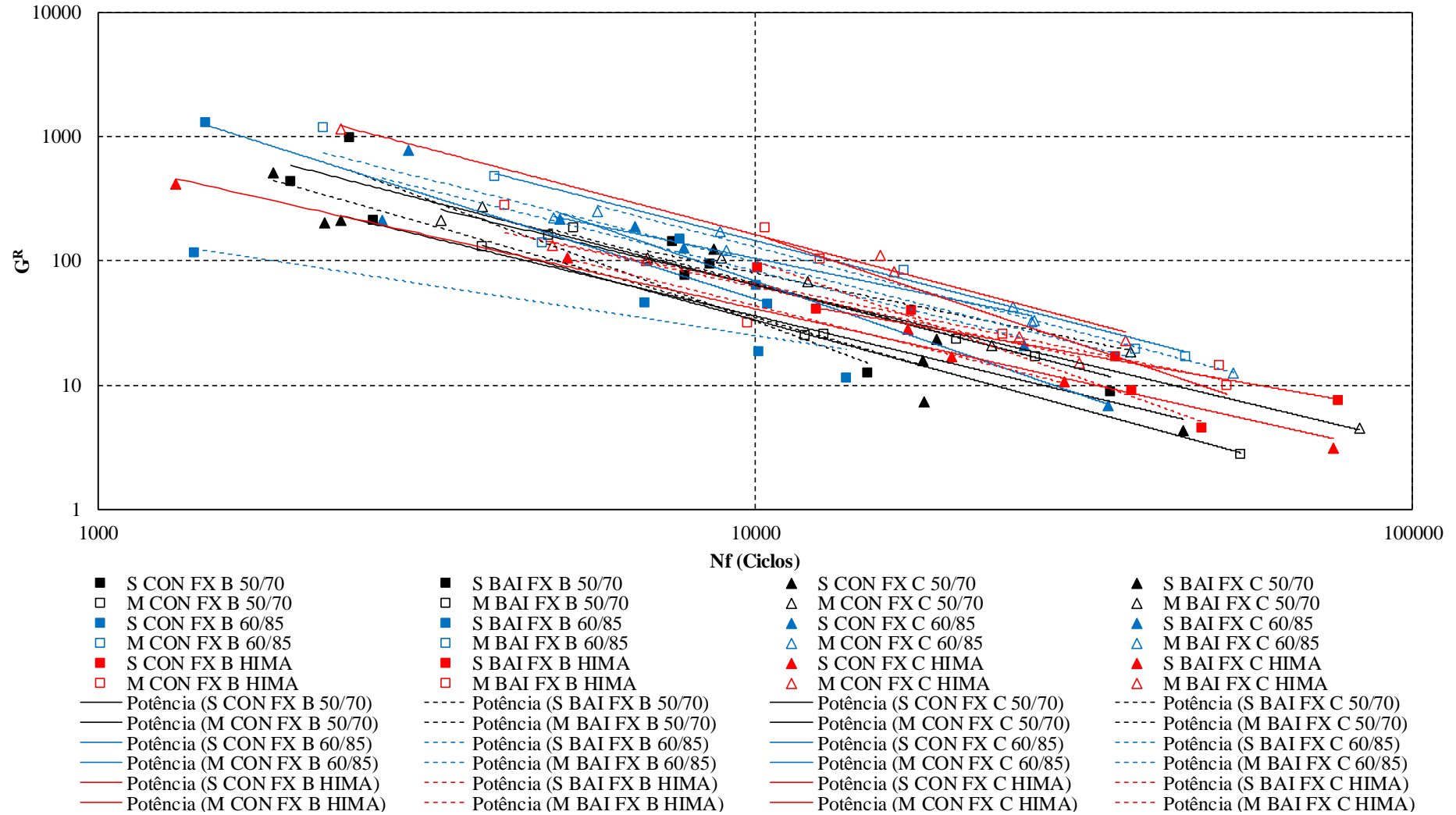


Figura 105 – Envoltórias de ruptura G^R vs N_f para as misturas dosadas pela metodologia MarshallTabela 30 – Equações geradas pelas Curvas da Envoltórias de ruptura G^R vs N_f para todas as misturas asfálticas

MISTURAS	EQUAÇÃO CURVA DE G^R	R^2	MISTURAS	EQUAÇÃO CURVA DE G^R	R^2
S CON FX B 50/70	$G^r = 2E+07.N_f^{-1.364}$	0,954	M CON FX B 50/70	$G^r = 2E+07.N_f^{-1.446}$	0,999
S BAI FX B 50/70	$G^r = 2E+09.N_f^{-1.968}$	0,890	M BAI FX B 50/70	$G^r = 3E+07.N_f^{-1.403}$	0,993
S CON FX C 50/70	$G^r = 5E+06.N_f^{-1.276}$	0,976	M CON FX C 50/70	$G^r = 8E+06.N_f^{-1.27}$	0,991
S BAI FX C 50/70	$G^r = 4E+07.N_f^{-1.508}$	0,815	M BAI FX C 50/70	$G^r = 2E+06.N_f^{-1.09}$	0,980
S CON FX B 60/85	$G^r = 2E+08.N_f^{-1.674}$	0,871	M CON FX B 60/85	$G^r = 4E+07.N_f^{-1.366}$	0,993
S BAI FX B 60/85	$G^r = 4,7E+04.N_f^{-0.818}$	0,642	M BAI FX B 60/85	$G^r = 2E+07.N_f^{-1.34}$	0,921
S CON FX C 60/85	$G^r = 2E+09.N_f^{-1.847}$	0,995	M CON FX C 60/85	$G^r = 3E+06.N_f^{-1.097}$	0,990
S BAI FX C 60/85	$G^r = 2E+07.N_f^{-1.318}$	0,836	M BAI FX C 60/85	$G^r = 5E+07.N_f^{-1.389}$	0,996
S CON FX B HIMA	$G^r = 2,59E+05.N_f^{-0.926}$	0,996	M CON FX B HIMA	$G^r = 2E+09.N_f^{-1.795}$	0,970
S BAI FX B HIMA	$G^r = 4E+09.N_f^{-1.904}$	0,990	M BAI FX B HIMA	$G^r = 1E+06.N_f^{-1.085}$	0,814
S CON FX C HIMA	$G^r = 2E+06.N_f^{-1.189}$	0,991	M CON FX C HIMA	$G^r = 6E+07.N_f^{-1.391}$	0,991
S BAI FX C HIMA	$G^r = 9E+06.N_f^{-1.324}$	0,999	M BAI FX C HIMA	$G^r = 2E+06.N_f^{-1.145}$	0,990

Figura 106 – Envolvórias de ruptura G^R vs N_f para todas as misturas asfálticas



Os valores de R^2 encontrados nas envoltórias demonstram uma pequena variabilidade experimental, uma vez que o menor R^2 foi encontrado para a mistura S BAI FX B 60/85 ($R^2 = 0,64$), sendo esta uma das misturas que apresentaram comportamento distinto na curva característica de dano.

Percebe-se ainda um agrupamento das envoltórias de ruptura para as diferentes misturas utilizada neste trabalho, indicando assim que grande parte das misturas apresenta uma taxa de dissipação de energia de pseudo deformação muito próxima. Com exceção das misturas já identificadas com comportamento distinto nas curvas características de dano, que tendem a apresentar problemas no desempenho à fadiga, as misturas com os ligantes modificados (AMP 60/85 e HIMA) apresentam uma superioridade nas envoltórias de ruptura, ou seja, para um mesmo valor de G^R estas misturas apresentam valores de N_f superiores quando comparadas com as misturas dosadas com o ligante convencional.

Ressalta-se que apenas as misturas com estes comportamentos específicos podem ser analisadas de modo superficial, visto que a maioria das misturas tendem a apresentar comportamentos semelhantes e uma análise superficial pode indicar um desempenho de forma duvidosa.

Em posse das curvas C versus S , das envoltórias de ruptura e principalmente dos parâmetros obtidos com tais curvas, é possível compreender e prever de forma mais sistemática o comportamento das misturas em situações diferentes das ensaiadas, como por exemplo a previsão do dano na simulação de um pavimento em serviço com reais de clima e tráfego.

Para ranquear/classificar as misturas sem que fosse realizado a simulação de um pavimento em serviço, para a caracterização a fadiga pelo método S-VECD, fez-se uso também do índice denominado Fator de Área de Fadiga (FAF), que representa a área que é limitada pela curva de fadiga entre duas amplitudes de deformação.

Para esta análise, os dados obtidos pela caracterização a fadiga pelo método S-VECD, foram utilizados na equação proposta de simulação de ciclos de ruptura desenvolvida por Nascimento (2016). A equação abrange os parâmetros obtidas nas curvas características de dano e das envoltórias de ruptura G^R , e ainda os dados da caracterização viscoelásticas obtido no ensaio de Módulo Complexo. O número de ciclos (N_f) encontrado com a equação pode ser considerado o mais próximo da realidade, quando comparado com os N_f 's encontrados com as curvas de Wöhler pela abordagem clássica.

Com a rotina de cálculo de N_f pelas equações de Nascimento (2016), têm-se os valores de N_f através da equação para cada amostra. Com esses valores montou-se uma curva de Wöhler (N_f versus deformações iniciais medidas) de cada amostra, conforme demonstra a

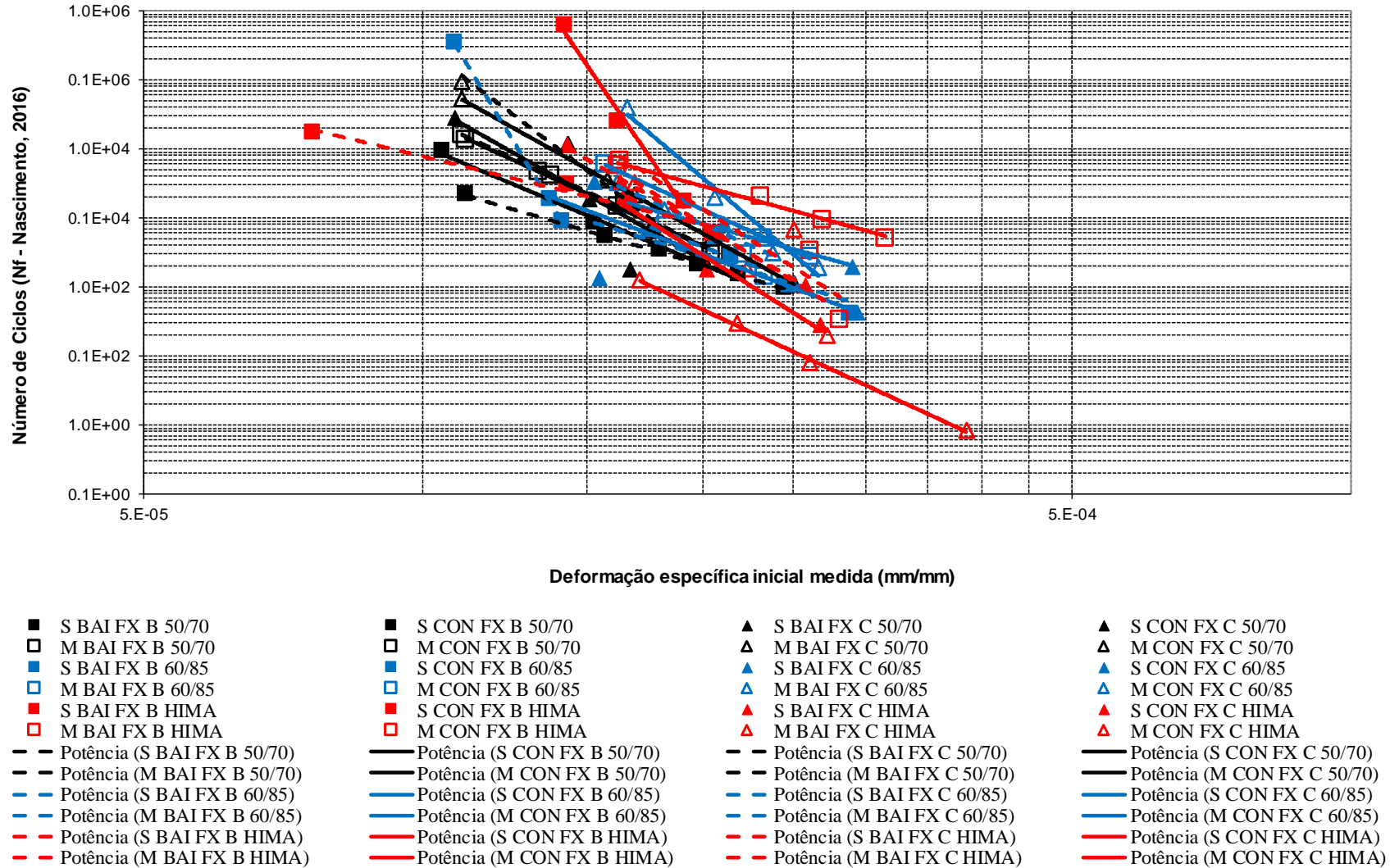
Figura 107, e então aplicou-se o FAF para cada curva gerada das misturas. As faixas de deformações foram as mesmas utilizadas nas curvas de Wöhler (Abordagem Clássica), conforme especifica Nascimento (2015), entre 100 e 200 μ s.

Na Tabela 31 estão descritas as equações e os seus R^2 geradas da Figura 107 de cada mistura. Nota-se que os R^2 são maiores do que os R^2 obtidos pelas curvas de Wöhler pela abordagem clássica, uma vez que estas curvas de Wöhler obtidas pela equação de Nascimento (2016) são geradas levando em consideração todos os parâmetros do S-VECD.

Tabela 31 – Equações geradas pelas Curvas de Nf versus deformação inicial medida para todas as misturas asfálticas

MISTURAS	CURVA DE WÖHLER PELA EQUAÇÃO DE NASCIMENTO, 2016	R^2	MISTURAS	CURVA DE WÖHLER PELA EQUAÇÃO DE NASCIMENTO, 2016	R^2
S CON FX B 50/70	$Nf = 2E-18.\varepsilon^{-5,675}$	0,991	M CON FX B 50/70	$Nf = 1E-19.\varepsilon^{-6,11}$	0,999
S BAI FX B 50/70	$Nf = 6E-12.\varepsilon^{-3,932}$	0,999	M BAI FX B 50/70	$Nf = 8E-20.\varepsilon^{-6,142}$	0,992
S CON FX C 50/70	$Nf = 2E-25.\varepsilon^{-7,61}$	0,998	M CON FX C 50/70	$Nf = 1E-24.\varepsilon^{-7,495}$	1,000
S BAI FX C 50/70	$Nf = 1E-17.\varepsilon^{-5,414}$	0,962	M BAI FX C 50/70	$Nf = 6E-35.\varepsilon^{-10,17}$	0,960
S CON FX B 60/85	$Nf = 6E-16.\varepsilon^{-5,049}$	0,989	M CON FX B 60/85	$Nf = 3E-19.\varepsilon^{-6,113}$	0,999
S BAI FX B 60/85	$Nf = 1E-82.\varepsilon^{-22,3}$	1,000	M BAI FX B 60/85	$Nf = 6E-16.\varepsilon^{-5,089}$	0,907
S CON FX C 60/85	$Nf = 1E-10.\varepsilon^{-3,731}$	0,979	M CON FX C 60/85	$Nf = 4E-38.\varepsilon^{-11,34}$	0,982
S BAI FX C 60/85	$Nf = 1E-12.\varepsilon^{-4,131}$	0,454	M BAI FX C 60/85	$Nf = 4E-19.\varepsilon^{-6,019}$	0,991
S CON FX B HIMA	$Nf = 8E-70.\varepsilon^{-19,7}$	0,987	M CON FX B HIMA	$Nf = 8E-10.\varepsilon^{-3,664}$	0,983
S BAI FX B HIMA	$Nf = 7E-09.\varepsilon^{-3,267}$	0,981	M BAI FX B HIMA	$Nf = 3E-28.\varepsilon^{-8,576}$	0,898
S CON FX C HIMA	$Nf = 8E-29.\varepsilon^{-8,532}$	0,975	M CON FX C HIMA	$Nf = 5E-21.\varepsilon^{-6,216}$	0,998
S BAI FX C HIMA	$Nf = 1E-25.\varepsilon^{-7,799}$	0,998	M BAI FX C HIMA	$Nf = 5E-28.\varepsilon^{-8,447}$	0,666

Figura 107 – Curvas de Wöhler geradas pelos Nf's calculados pela equação de Nascimento (2016)



Com as curvas de Wöhler geradas pelos Nf's calculados pela equação de Nascimento (2016), aplicou-se o fator de área de fadiga e tem-se então a classificação das misturas seguindo a nova abordagem. Na Tabela 32 está a classificação e a comparação dos FAF's para o modelo com o uso dos parâmetros do S-VECD, e para fins de comparação estão os FAF's calculados para as curvas de Wöhler pela abordagem Clássica.

Tabela 32 – Classificação e comparação dos FAF para o modelo com o uso do S-VECD e pelas curvas de Wöhler para os dados brutos de ensaio

MISTURAS	FAF - Curva de Wöhler pela Equação de Nascimento, 2016	CLASSIFICAÇÃO	MISTURAS	FAF - Curvas de Wöhler (Abordagem Clássica)	CLASSIFICAÇÃO
S CON FX B 50/70	1,2483	20°	S CON FX B 50/70	1,2532	18°
S BAI FX B 50/70	1,1783	21°	S BAI FX B 50/70	1,1654	23°
S CON FX C 50/70	1,3834	15°	S CON FX C 50/70	2,7924	1°
S BAI FX C 50/70	1,1563	24°	S BAI FX C 50/70	1,1252	24°
S CON FX B 60/85	1,2686	19°	S CON FX B 60/85	1,1913	22°
S BAI FX B 60/85	1,1570	23°	S BAI FX B 60/85	1,2052	21°
S CON FX C 60/85	1,3132	18°	S CON FX C 60/85	1,3490	11°
S BAI FX C 60/85	1,1747	22°	S BAI FX C 60/85	1,3412	12°
S CON FX B HIMA	2,0283	3°	S CON FX B HIMA	1,4669	7°
S BAI FX B HIMA	1,3310	17°	S BAI FX B HIMA	1,3137	13°
S CON FX C HIMA	1,4290	14°	S CON FX C HIMA	1,6664	2°
S BAI FX C HIMA	1,5118	13°	S BAI FX C HIMA	1,3136	14°
M CON FX B 50/70	1,6376	11°	M CON FX B 50/70	1,2669	17°
M BAI FX B 50/70	1,6470	10°	M BAI FX B 50/70	1,2086	20°
M CON FX C 50/70	1,8002	6°	M CON FX C 50/70	1,3056	15°
M BAI FX C 50/70	1,9441	5°	M BAI FX C 50/70	1,2387	19°
M CON FX B 60/85	1,7848	7°	M CON FX B 60/85	1,4680	6°
M BAI FX B 60/85	1,5455	12°	M BAI FX B 60/85	1,5865	3°
M CON FX C 60/85	2,3968	1°	M CON FX C 60/85	1,4603	8°
M BAI FX C 60/85	1,7093	8°	M BAI FX C 60/85	1,5175	5°
M CON FX B HIMA	1,6735	9°	M CON FX B HIMA	1,4371	9°
M BAI FX B HIMA	2,0413	2°	M BAI FX B HIMA	1,5193	4°
M CON FX C HIMA	1,3736	16°	M CON FX C HIMA	1,4228	10°
M BAI FX C HIMA	1,9528	4°	M BAI FX C HIMA	1,2766	16°

Através das classificações apresentadas, percebe-se a influência do tipo e principalmente do teor de ligante, visto que para o FAF obtido com as curvas de Wöhler pela a equação do Nascimento (2016), as misturas com ambos os ligantes modificados e dosadas através da metodologia Marshall tomam a parte superior da classificação, indicando dessa forma um melhor desempenho frente a fadiga. A mesma situação é encontrada para a classificação do FAF para as curvas de Wöhler pela abordagem clássica, mas não sendo exatamente as mesmas misturas e com a exceção da mistura S CON FX C 50/70.

Diferentemente do FAF para as curvas Wöhler (abordagem clássica), que a maioria das misturas com ligante asfáltico convencional habitam a parte inferior da classificação, e dessa forma, apresentam pior desempenho quanto à fadiga, para a classificação do FAF pelas curvas geradas pela equação de Nascimento (2016), estas misturas se intercalam pelo centro da

classificação e entre as misturas com os ligantes modificados. Fato este, também encontrado por Schuster (2018) em sua dissertação de mestrado, que verificou na mesma metodologia de Fator de Área de Fadiga que para a classificação de FAF pelas curvas geradas pela equação de Nascimento (2016), as misturas com ligante asfáltico convencional (CAP 50/70) se intercalam com as misturas com ligante modificado e também apresentam indicativos de melhor desempenho. Entretanto, o autor constatou que a maioria das misturas com o ligante convencional também se apresentam nas posições inferiores, indicando que o tipo de ligante é significativo no desempenho à fadiga.

Quanto aos métodos de enquadramento granulométrico (Bailey e Convencional), não é possível verificar uma tendência de que algum dos métodos venham a apresentar uma superioridade sobre outro, fato também comprovado para as Faixas Granulométricas (Faixa B e Faixa C).

Verifica-se nesse sentido o quão complexo é o fenômeno de fadiga em misturas asfálticas, e enfatiza a dificuldade de prever o seu comportamento sem a análise correta aplicada em uma estrutura de pavimento. Dentro de um único ensaio é extremamente complexo simular todas as variações de condições existentes em uma estrutura de pavimento real, devido a ampla variedade de tipos de eixos rodoviários, cargas, intervalo entre carregamentos, velocidade dos veículos e condições climáticas às quais uma mistura asfáltica é exposta durante sua vida útil. Assim, uma caracterização e modelagem do comportamento tentando abranger o máximo possível das variedades de campo, se torna de fundamental importância um modelo mecânico apropriado.

4.3.3.3 Avaliação da Vida de Fadiga pelas Deformações de Estruturas de Pavimentos

Por fim, de modo a avaliar o comportamento das misturas em uma estrutura de pavimento, submetidas ao carregamento do tráfego, a ferramenta utilizada foi o software AEMC-SISPAV, considerando as deformações de tração no fundo do revestimento. Empregaram-se as três estruturas típicas descritas na metodologia, variando apenas as características da camada de revestimento, de forma a isolar apenas o efeito desta análise.

As deformações de tração nas estruturas dos pavimentos foram analisadas na fibra inferior do revestimento asfáltico, e foram feitas em três posições distintas: no eixo de simetria (es), bordo da roda (br) e centro da roda (cr), os resultados estão na Tabela 33. O valor escolhido dentre os três pontos analisados foi o que teve o maior valor negativo (maior tensão de tração σ_t) e, para todas as misturas simuladas, os maiores valores negativos de tensão foram

encontrados no ponto imediatamente abaixo da roda (cr). Ressalta-se que, nas versões mais recentes do programa MeDiNa, os 110 pontos de análise na camada asfáltica foram reduzidos para apenas 20 pontos. Nesta nova filosofia, são selecionados 10 pontos na superfície e 10 pontos na fibra inferior da camada asfáltica para as análises referentes ao trincamento por fadiga, mas para a realização do trabalho fez-se uso da metodologia anterior a versão do MeDiNa.

Tabela 33 – Resultados de ϵ_t (μS) no fundo do revestimento simulando o pavimento no AEMC-Sispav

MISTURAS	DEF. ESPEC. DE TRAÇÃO - ϵ_t (μS)			MISTURAS	DEF. ESPEC. DE TRAÇÃO - ϵ_t (μS)		
	5cm	10cm	15cm		5cm	10cm	15cm
S CON FX B 50/70	247,16	124,87	73,13	M CON FX B 50/70	281,13	147,73	87,71
S BAI FX B 50/70	247,16	124,87	73,13	M BAI FX B 50/70	256,89	131,36	77,24
S CON FX C 50/70	275,78	144,19	85,43	M CON FX C 50/70	268,75	139,43	82,38
S BAI FX C 50/70	255,53	130,45	76,66	M BAI FX C 50/70	248,92	126,04	73,87
S CON FX B 60/85	255,55	130,46	76,66	M CON FX B 60/85	266,34	137,77	81,32
S BAI FX B 60/85	258,75	132,61	78,03	M BAI FX B 60/85	249,12	126,18	73,95
S CON FX C 60/85	266,02	137,55	81,18	M CON FX C 60/85	255,01	130,10	76,43
S BAI FX C 60/85	240,36	120,42	70,32	M BAI FX C 60/85	240,01	120,19	70,18
S CON FX B HIMA	285,05	150,34	89,40	M CON FX B HIMA	316,68	171,90	103,48
S BAI FX B HIMA	281,05	147,68	87,68	M BAI FX B HIMA	303,52	162,83	97,52
S CON FX C HIMA	289,33	153,21	91,26	M CON FX C HIMA	280,52	147,32	87,45
S BAI FX C HIMA	299,09	159,81	95,55	M BAI FX C HIMA	319,67	173,99	104,85

Ao se analisar, de forma simples a deformação de tração mostrada na tabela anterior, nota-se que as misturas com o ligante altamente modificado HIMA apresentam as maiores deformações quando comparadas as demais misturas utilizadas neste trabalho. Fato este que se justifica pela baixa rigidez que estas misturas obtiveram para os ensaios de MR e Módulo Complexo, fazendo com que estas deformações fossem maiores que as demais misturas. Porém, deve-se ter um cuidado nesta análise simples, visto que, devida a sua alta modificação por polímero, possa absorver as tensões sem que haja um trincamento precoce da camada asfáltica.

Em posse das deformações de tração obtidas para cada mistura nas estruturas definidas nas simulações dos pavimentos propostos, foram aplicadas as equações geradas das curvas de Wöhler, tanto na abordagem clássica como nas curvas geradas através da equação de Nascimento (2016), e encontrados os N_f 's para cada mistura. Desta forma, obtiveram-se então para as três estruturas simuladas os dois N_f 's obtidos de formas diferentes.

Nas Tabelas 34, 35 e 36 estão as classificações obtidas com as equações nas três estruturas simuladas.

Tabela 34 – Resultados de Nf utilizando as equações das curvas geradas para a estrutura de 5cm

Nf - CURVAS DE WÖHLER (ABORDAGEM CLÁSSICA) - PAVIMENTO DE 5 cm			Nf - CURVAS DE WÖHLER PELA EQUAÇÃO DE NASCIMENTO (2016) - PAVIMENTO DE 5 cm		
MISTURAS	CLASSIFICAÇÃO/Nf		MISTURAS	CLASSIFICAÇÃO/Nf	
S CON FX B 50/70	17°	1,95E+03	S CON FX B 50/70	12°	5,90E+02
S BAI FX B 50/70	13°	2,75E+03	S BAI FX B 50/70	8°	9,15E+02
S CON FX C 50/70	21°	1,28E+03	S CON FX C 50/70	19°	2,45E+02
S BAI FX C 50/70	22°	1,15E+03	S BAI FX C 50/70	17°	2,82E+02
S CON FX B 60/85	10°	4,26E+03	S CON FX B 60/85	11°	8,26E+02
S BAI FX B 60/85	12°	3,24E+03	S BAI FX B 60/85	24°	9,83E-03
S CON FX C 60/85	6°	6,39E+03	S CON FX C 60/85	5°	2,18E+03
S BAI FX C 60/85	9°	4,33E+03	S BAI FX C 60/85	10°	8,93E+02
S CON FX B HIMA	15°	2,34E+03	S CON FX B HIMA	23°	5,51E+00
S BAI FX B HIMA	1°	9,75E+03	S BAI FX B HIMA	2°	2,80E+03
S CON FX C HIMA	24°	8,84E+02	S CON FX C HIMA	21°	9,36E+01
S BAI FX C HIMA	14°	2,53E+03	S BAI FX C HIMA	16°	3,06E+02
M CON FX B 50/70	23°	1,04E+03	M CON FX B 50/70	14°	4,98E+02
M BAI FX B 50/70	18°	1,68E+03	M BAI FX B 50/70	9°	9,00E+02
M CON FX C 50/70	19°	1,43E+03	M CON FX C 50/70	13°	5,78E+02
M BAI FX C 50/70	16°	2,04E+03	M BAI FX C 50/70	18°	2,69E+02
M CON FX B 60/85	8°	5,33E+03	M CON FX B 60/85	6°	2,13E+03
M BAI FX B 60/85	20°	1,36E+03	M BAI FX B 60/85	7°	1,31E+03
M CON FX C 60/85	3°	7,85E+03	M CON FX C 60/85	4°	2,25E+03
M BAI FX C 60/85	5°	6,52E+03	M BAI FX C 60/85	3°	2,45E+03
M CON FX B HIMA	4°	7,67E+03	M CON FX B HIMA	1°	5,31E+03
M BAI FX B HIMA	11°	3,30E+03	M BAI FX B HIMA	15°	4,43E+02
M CON FX C HIMA	7°	5,53E+03	M CON FX C HIMA	22°	6,00E+01
M BAI FX C HIMA	2°	8,28E+03	M BAI FX C HIMA	20°	1,67E+02

Tabela 35 - Resultados de Nf utilizando as equações das curvas geradas para a estrutura de 10cm

Nf - CURVAS DE WÖHLER (ABORDAGEM CLÁSSICA) - PAVIMENTO DE 10 cm			Nf - CURVAS DE WÖHLER PELA EQUAÇÃO DE NASCIMENTO (2016) - PAVIMENTO DE 10 cm		
MISTURAS	CLASSIFICAÇÃO/Nf		MISTURAS	CLASSIFICAÇÃO/Nf	
S CON FX B 50/70	13°	2,28E+04	S CON FX B 50/70	15°	2,84E+04
S BAI FX B 50/70	23°	9,29E+03	S BAI FX B 50/70	22°	1,34E+04
S CON FX C 50/70	16°	1,75E+04	S CON FX C 50/70	12°	3,40E+04
S BAI FX C 50/70	24°	6,76E+03	S BAI FX C 50/70	23°	1,07E+04
S CON FX B 60/85	22°	1,01E+04	S CON FX B 60/85	18°	2,46E+04
S BAI FX B 60/85	21°	1,14E+04	S BAI FX B 60/85	13°	2,93E+04
S CON FX C 60/85	11°	3,24E+04	S CON FX C 60/85	16°	2,55E+04
S BAI FX C 60/85	8°	5,05E+04	S BAI FX C 60/85	21°	1,55E+04
S CON FX B HIMA	7°	5,52E+04	S CON FX B HIMA	2°	1,64E+06
S BAI FX B HIMA	14°	2,19E+04	S BAI FX B HIMA	19°	2,29E+04
S CON FX C HIMA	3°	1,76E+05	S CON FX C HIMA	20°	1,97E+04
S BAI FX C HIMA	17°	1,61E+04	S BAI FX C HIMA	11°	4,06E+04
M CON FX B 50/70	19°	1,36E+04	M CON FX B 50/70	17°	2,54E+04
M BAI FX B 50/70	20°	1,30E+04	M BAI FX B 50/70	8°	5,54E+04
M CON FX C 50/70	12°	2,31E+04	M CON FX C 50/70	7°	7,91E+04
M BAI FX C 50/70	15°	1,90E+04	M BAI FX C 50/70	3°	2,73E+05
M CON FX B 60/85	5°	8,40E+04	M CON FX B 60/85	5°	1,20E+05
M BAI FX B 60/85	1°	5,02E+05	M BAI FX B 60/85	10°	4,17E+04
M CON FX C 60/85	4°	9,69E+04	M CON FX C 60/85	1°	4,64E+06
M BAI FX C 60/85	2°	2,62E+05	M BAI FX C 60/85	4°	1,57E+05
M CON FX B HIMA	10°	3,62E+04	M CON FX B HIMA	9°	4,98E+04
M BAI FX B HIMA	6°	5,82E+04	M BAI FX B HIMA	6°	9,23E+04
M CON FX C HIMA	9°	4,65E+04	M CON FX C HIMA	24°	3,29E+03
M BAI FX C HIMA	18°	1,44E+04	M BAI FX C HIMA	14°	2,85E+04

Tabela 36 - Resultados de Nf utilizando as equações das curvas geradas para a estrutura de 15cm

Nf - CURVAS DE WÖHLER (ABORDAGEM CLÁSSICA) - PAVIMENTO DE 15 cm			Nf - CURVAS DE WÖHLER PELA EQUAÇÃO DE NASCIMENTO (2016) - PAVIMENTO DE 15 cm		
MISTURAS	CLASSIFICAÇÃO/Nf		MISTURAS	CLASSIFICAÇÃO/Nf	
S CON FX B 50/70	11°	1,56E+05	S CON FX B 50/70	16°	5,92E+05
S BAI FX B 50/70	22°	2,41E+04	S BAI FX B 50/70	23°	1,10E+05
S CON FX C 50/70	12°	1,44E+05	S CON FX C 50/70	11°	1,83E+06
S BAI FX C 50/70	21°	2,74E+04	S BAI FX C 50/70	19°	1,91E+05
S CON FX B 60/85	24°	1,98E+04	S CON FX B 60/85	17°	3,60E+05
S BAI FX B 60/85	20°	3,08E+04	S BAI FX B 60/85	2°	4,00E+09
S CON FX C 60/85	14°	1,19E+05	S CON FX C 60/85	20°	1,83E+05
S BAI FX C 60/85	8°	3,42E+05	S BAI FX C 60/85	21°	1,43E+05
S CON FX B HIMA	5°	7,20E+05	S CON FX B HIMA	1°	4,59E+10
S BAI FX B HIMA	19°	4,22E+04	S BAI FX B HIMA	22°	1,26E+05
S CON FX C HIMA	2°	1,32E+07	S CON FX C HIMA	12°	1,58E+06
S BAI FX C HIMA	17°	7,35E+04	S BAI FX C HIMA	9°	2,24E+06
M CON FX B 50/70	16°	1,09E+05	M CON FX B 50/70	15°	6,14E+05
M BAI FX B 50/70	18°	6,52E+04	M BAI FX B 50/70	13°	1,45E+06
M CON FX C 50/70	10°	2,15E+05	M CON FX C 50/70	6°	4,08E+06
M BAI FX C 50/70	15°	1,10E+05	M BAI FX C 50/70	4°	6,25E+07
M CON FX B 60/85	4°	7,61E+05	M CON FX B 60/85	8°	3,01E+06
M BAI FX B 60/85	1°	5,19E+07	M BAI FX B 60/85	14°	6,33E+05
M CON FX C 60/85	6°	7,06E+05	M CON FX C 60/85	3°	1,93E+09
M BAI FX C 60/85	3°	4,64E+06	M BAI FX C 60/85	7°	4,02E+06
M CON FX B HIMA	13°	1,31E+05	M CON FX B HIMA	18°	3,20E+05
M BAI FX B HIMA	7°	6,18E+05	M BAI FX B HIMA	5°	7,49E+06
M CON FX C HIMA	9°	2,61E+05	M CON FX C HIMA	24°	8,41E+04
M BAI FX C HIMA	23°	2,29E+04	M BAI FX C HIMA	10°	2,06E+06

Como se esperava, à medida que se aumenta a espessura do revestimento asfáltico existe um aumento na vida de fadiga (Nf), tanto para as curvas de Wöhler pela abordagem clássica como para as curvas geradas pela equação de Nascimento (2016), uma vez que com o aumento da espessura, há um aumento do nível de dissipação da tensão que será transmitida para a próxima camada e uma redução na deformação específica de tração.

Percebe-se que o tipo de ligante e o teor do mesmo influenciam diretamente na vida de fadiga, principalmente para a camada mais esbelta, pois para esta espessura os ligantes modificados por polímero se apresentam nas primeiras colocações da classificação das misturas, tanto para o ranking das curvas de Wöhler pela abordagem clássica como para as curvas pela equação de Nascimento (2016). Para todas as estruturas percebe-se uma tendência das misturas dosadas através da metodologia Marshall ocuparem as primeiras posições, com poucas exceções das misturas S CON FX C HIMA, S BAI FX B HIMA, S CON FX B HIMA, S CON FX C 60/85, S BAI FX C 60/85 e S BAI FX B 50/70 que flutuam entre os rankings das estruturas, e mas mesmo assim são as misturas com os ligantes modificados que tendem a ser melhores.

À medida que se aumenta a espessura da camada de revestimento, principalmente para os N_f 's gerados pela equação de Nascimento (2016), começam a aparecer algumas misturas com o ligante convencional, como por exemplo, a estrutura com espessura de revestimento de 10cm, onde das 10 primeiras colocações, três são das misturas dosadas na metodologia Marshall com o CAP 50/70. Lembrando que a equação proposta por Nascimento (2016) abrange os parâmetros das curvas C vs S , as envoltórias de ruptura G^R e os dados da caracterização viscoelástica obtidos nos resultados dos ensaios.

O trincamento por fadiga é uma das mais comuns manifestações de mau desempenho e principalmente de ruptura de um pavimento. Estas trincas podem iniciar através das forças cisalhantes na superfície do pavimento ou das tensões de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico. Mais uma vez, percebe-se a complexidade de tal manifestação e a necessidade da caracterização das misturas asfálticas sob as condições peculiares de tráfego, estrutura e condições ambientais a que cada material estará sujeito durante a sua vida útil.

4.3.3.3.1 Correlações dos valores de N_f 's com os principais parâmetros das misturas

A metodologia de Regressão Linear Múltipla realizada para todos os ensaios, também foi aplicada aos resultados encontrados através das simulações das deformações de tração nas estruturas. Entrou-se com os dados no software IBM SPSS para a seleção das variáveis independentes, como a quantidade elevada de variáveis independentes e dependente (48 observações). O programa já pré-seleciona as variáveis, ou seja, exclui as variáveis que não tem nenhuma relação/pouca significância, fazendo com que o modelo gerado fique melhor ajustado.

Realizou-se para a fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/4, passante na peneira 3/8, passante na peneira #4 e o passante na peneira #200), e para a fração do ligante asfáltico (PG de alta temperatura, teor de ligante de projeto, $|G^*|_{sen(\delta)}$ na temperatura de 19°C, $|G^*|_{sen(\delta)}$ do ligante virgem, $|G^*|_{sen(\delta)}$ após RTFOT, penetração e ponto de amolecimento).

Após a análise obteve-se então resultados para a fração dos agregados (proporção AG, porosidade FAD, passante na peneira 3/8 e o passante na peneira #200) e para a fração do ligante asfáltico (PG de alta temperatura, teor de ligante de projeto e o ponto de amolecimento). Com estas variáveis independentes então gerou-se um modelo para cada N_f calculado (Curvas de Wöhler pela abordagem clássica e pela Equação de Nascimento (2016)) e para cada estrutura simulada no AEMC-Sispav.

Na Tabela 37 estão apresentados os R^2 encontrados para cada Regressão, juntamente com a variáveis estatisticamente significativas ao nível de 5% (95% de confiança), parâmetro de confiança estatística mais utilizado para confiabilidade de dados.

Tabela 37 - Relação dos R^2 para os modelos gerados com os resultados de Nf

ESTRUTURA	MÉTODO DE CALCULO	R^2 Ajustado	Variáveis significantes (valor-P < 5%)
Revestimento Asfáltico de 5cm	Nf - CURVAS DE WOHLER (Abordagem Clássica)	0,40	PG de alta Temperatura
	Nf - CURVAS DE WÖHLER PELA EQUAÇÃO DE NASCIMENTO (2016)	0,28	-
Revestimento Asfáltico de 10cm	Nf - CURVAS DE WOHLER (Abordagem Clássica)	0,34	PG de alta Temperatura e Ponto de Amolecimento
	Nf - CURVAS DE WÖHLER PELA EQUAÇÃO DE NASCIMENTO (2016)	0,17	-
Revestimento Asfáltico de 15cm	Nf - CURVAS DE WOHLER (Abordagem Clássica)	0,26	-
	Nf - CURVAS DE WÖHLER PELA EQUAÇÃO DE NASCIMENTO (2016)	0,28	-

Percebe-se que para os resultados obtidos através da simulação do pavimento no AEMC-SISPAV, não é possível estabelecer qualquer correlação direta quando se analisa os resultados de vida de fadiga (Nf) para as equações geradas nas curvas. Provavelmente as características de rigidez das misturas não são capazes por si só de explicar nem de exibir tendências sutis quanto vida de fadiga para este método de avaliação.

Devido à baixa correlação adquirida modelos com variáveis estatisticamente significativas ao nível de 5% (95% de confiança), tentou-se buscar por meio de modelos preditivos com variáveis a nível de 25 % de significância (75% de confiança) gerar modelo de previsão da vida de fadiga e estabelecer a importância de cada variável no modelo gerado. Porém, visto que estatística a níveis altos de significância não são boas ferramentas para a análises confiáveis do caso, também, não se obteve correlação significativa a este nível.

A justificativa para a baixa correlação pode estar atrelada aos resultados serem obtidos através de simulações, diferentemente das correlações realizadas para os demais ensaios que utilizaram os dados brutos adquiridos com os resultados dos ensaios, e desta forma, pode-se atrelar a um provável erro cumulativo nos dados estatísticos.

Buscou-se ainda uma correlação com os indicadores do desempenho de misturas asfálticas, obtidos através do ensaio de Resistência à Tração. Muitos estudos investigam estes

parâmetros adicionais, buscando indicadores do desempenho de misturas asfálticas perante o fenômeno de Fadiga, e nesse sentido, a correlação dos parâmetros com os resultados das misturas no ensaio de fadiga, visando analisar a viabilidade de utilização tanto do RT quanto dos índices correlatos para se obter uma inferência de fadiga em misturas asfálticas.

Para a realização das correlações, utilizou-se um modelo indicativo do comportamento das misturas asfálticas frente a resistência a fadiga, fazendo uso de correlação dos indicadores com os Nf's simulados para as estruturas. A tentativa da correlação se deu pelo confronto um por um dos indicadores com os Nf's, pois se entende que não se pode realizar uma regressão linear múltipla dos indicadores com os resultados de vida de fadiga.

Nas Tabelas 38, 39 e 40 estão demonstrados os R² obtidos por meio da regressão direta dos indicadores de desempenho de misturas asfálticas com os referidos Nf's de cada estrutura rodada no AEMC-Sispav.

Tabela 38 - Relação de R² para resultados dos indicadores de desempenho e dos Nf's do pavimento de 5cm

Variável Experimental	Relação de R ²	
	Nf - CURVAS DE WÖHLER (ABORDAGEM CLÁSSICA) - PAVIMENTO DE 15 cm	Nf -CURVAS DE WÖHLER PELA EQUAÇÃO DE NASCIMENTO (2016) - PAVIMENTO DE 15 cm
RT	0,0056	0,0141
Tenacidade	0,0040	0,0037
Energia Máxima	0,0006	0,0148
Energia Total	0,0224	0,0052
Índice de Tenacidade	0,0408	0,0193
Índice de Flexibilidade	0,0531	0,0096

Tabela 39 - Relação de R² para resultados dos indicadores de desempenho e dos Nf's do pavimento de 10cm

Variável Experimental	Relação de R ²	
	Nf - CURVAS DE WÖHLER (ABORDAGEM CLÁSSICA) - PAVIMENTO DE 10 cm	Nf -CURVAS DE WÖHLER PELA EQUAÇÃO DE NASCIMENTO (2016) - PAVIMENTO DE 10 cm
RT	0,0124	0,0021
Tenacidade	0,0241	0,0007
Energia Máxima	0,0393	0,0002
Energia Total	0,0345	0,0016
Índice de Tenacidade	0,0057	0,0034
Índice de Flexibilidade	0,0492	0,0234

Tabela 40 - Relação de R² para resultados dos indicadores de desempenho e dos Nf's do pavimento de 15cm

Variável Experimental	Relação de R ²	
	Nf - CURVAS DE WÖHLER (ABORDAGEM CLÁSSICA) - PAVIMENTO DE 15 cm	Nf -CURVAS DE WÖHLER PELA EQUAÇÃO DE NASCIMENTO (2016) - PAVIMENTO DE 15 cm
RT	0,0056	0,0141
Tenacidade	0,0040	0,0037
Energia Máxima	0,0006	0,0148
Energia Total	0,0224	0,0052
Índice de Tenacidade	0,0408	0,0193
Índice de Flexibilidade	0,0531	0,0096

De maneira geral, percebe-se que assim como as correlações com os parâmetros das misturas asfálticas, estas correlações com os indicadores de desempenho também não apresentam ligações diretas para nenhum dos casos. Todas as correlações estão apresentadas com um nível de 5% de confiança, mas na tentativa de encontrar as correlações, também foram rodadas as regressões com nível de confiança de 25%, sendo que os R² encontrados foram de pior qualidade do que os apresentados nas tabelas acima.

Paniz (2018) em sua dissertação de mestrado, avaliou cinco diferentes misturas com ligante convencional CAP 50/70 e uma com CAP 30/45 e buscou avaliar a correlação destes indicadores encontrados no ensaio de RT com os resultados de fadiga na tração-compressão. A autora também concluiu que não é possível encontrar alguma relação entre os resultados encontrados no ensaio de RT com os resultados de fadiga.

Schuster (2018) avaliou os resultados destes indicadores em 24 misturas produzidas no estado do Rio Grande do Sul com os resultados de dano simulados no FlexPAVE 1.0 com os resultados obtidos no ensaio de fadiga na tração-compressão. Diferentemente de Paniz (2018), Schuster (2018) realizou as 24 misturas com diversos CAP's (modificados e convencionais) e ainda com misturas mornas e concluiu que estes indicadores de desempenho não apresentam resultados significativos com o dano. O autor reforça ainda, que os índices não são apropriados para serem utilizados como indicadores de resistência à fadiga em concretos asfálticos.

Esta busca por indicadores que tentam apresentar ao projetista do meio rodoviário indícios do comportamento das misturas asfálticas frente ao fenômeno de fadiga em campo reforça a complexidade da caracterização correta nos ensaios de fadiga frente ao comportamento das misturas asfálticas. Nesse sentido, é verdadeira a significância do uso da mecânica do dano contínuo unida ao comportamento viscoelástico, com posterior simulação em estrutura como imprescindíveis. Em contrapartida a análise dos dados experimentais com

uma abordagem mais simplista, também se faz necessária no ponto de vista da prática da engenharia, testar bons indicadores só trariam vantagem do ponto de vista prático.

Na busca por um indicador de fadiga, realizou-se, por fim, a correlação entre os valores de FAF encontrados com as curvas de Wöhler pela equação de Nascimento (2016), que ao contrário dos valores de FAF obtido pelas curvas de Wöhler pela abordagem clássica, são valores sensíveis às condições de ensaio e se alteram à medida que as condições de ensaio mudam, com os valores de Nf encontrados com as curvas geradas também da equação de Nascimento (2016) nas simulações das estruturas no AEMC-SISPAV.

A escolha pelos resultados obtidos com as curvas de Wöhler pela equação de Nascimento (2016), tanto de FAF, quanto Nf's foi feita, pois a simulação de ruptura usando a equação de Nascimento (2016) leva em conta a rigidez e o critério de ruptura G^R . Em sua dissertação de mestrado, Schuster (2018) correlacionou as 24 misturas produzidas, os valores de dano em 120 meses e os parâmetros FAF gerados pela simulação do G^R com a equação de Nascimento (2016). O autor concluiu que a correlação entre o FAF e o dano em 120 meses para os dados obtidos junto a simulação do G^R apresenta uma correlação coerente, e demonstra que a equação de Nascimento (2016) é satisfatória na classificação de misturas quanto a resistência à fadiga, quando comparada ao dano simulado no FlexPAVE.

Nas Figuras 108, 109 e 110 estão demonstradas graficamente as correlações entre os parâmetros FAF geradas pela simulação do G^R com a equação de Nascimento (2016) e os Nf's gerados pela mesma equação em cada uma das espessuras de revestimento asfáltico simulado no AEMC-SISPAV.

Figura 108 – Correlação entre o parâmetro FAF e o Nf pelas simulações de G^R na estrutura de 5cm

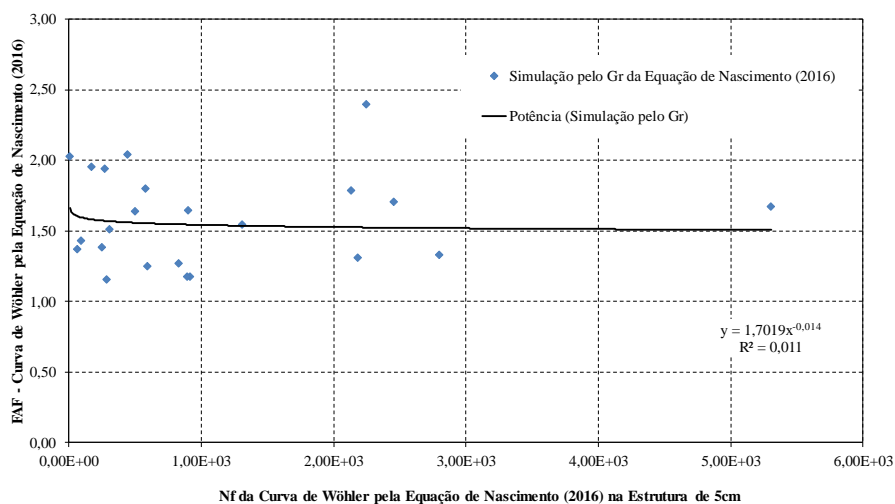


Figura 109 – Correlação entre o parâmetro FAF e o Nf pelas simulações de G^R na estrutura de 10cm

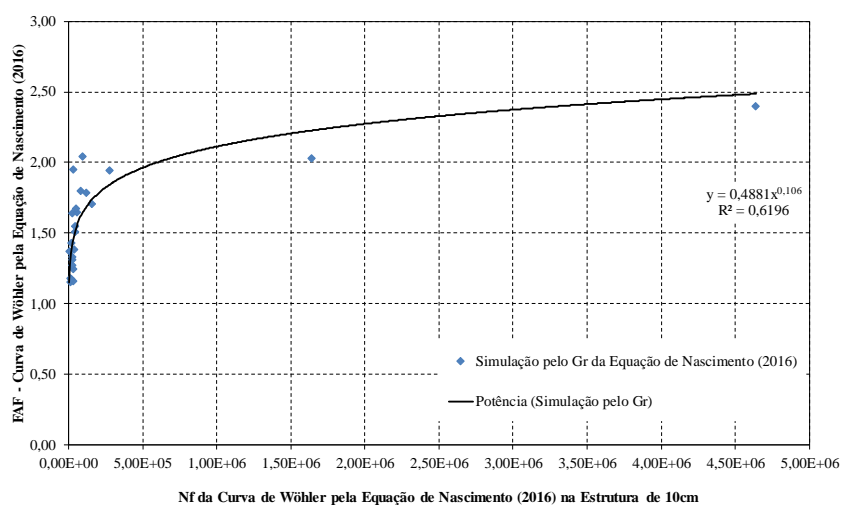
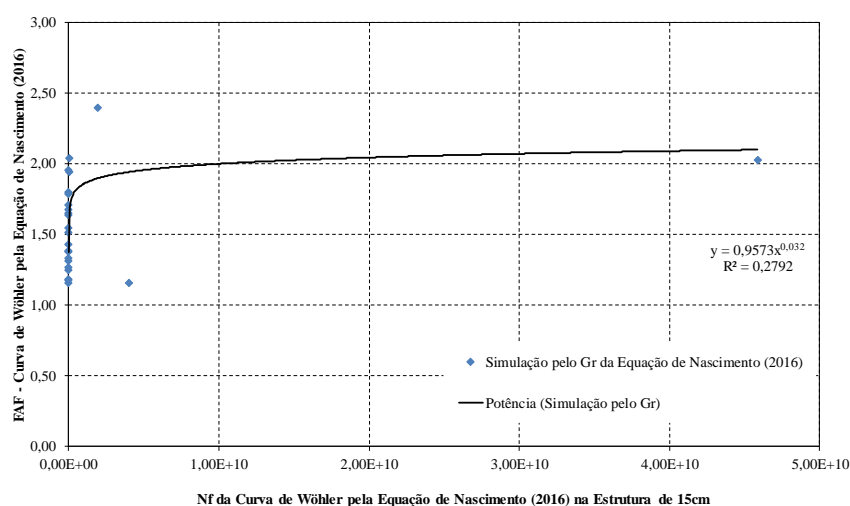


Figura 110 – Correlação entre o parâmetro FAF e o Nf pelas simulações de G^R na estrutura de 15cm



Através das figuras apresentadas, nota-se que para a estrutura com 5 cm de revestimento asfáltico, a correlação entre o FAF e o Nf para dados obtidos junto a simulação do G^R não apresenta uma boa correlação, pois apresenta para o modelo de potência um R^2 de 0,011. O mesmo acontece para a estrutura com 15 cm de revestimento asfáltico, que apresentou um R^2 de 0,2792.

Em contrapartida, para a estrutura com 10cm de revestimento asfáltico a correlação entre o FAF e o Nf apresenta uma boa resposta, apresentando um R^2 de 0,6196 para o modelo de potência atribuído. Dessa forma, pode-se demonstrar que os dados obtidos através da equação de Nascimento (2016), que vem a simular um ensaio dito como perfeito, com os dados

advindos do S-VECD e os dados de rigidez atribuídos, um bom indicador para o desempenho de misturas asfálticas em campo.

Ressalta-se novamente, devido a quantidade de correlações inadequadas apresentadas neste item, a complexidade de caracterização do fenômeno de fadiga. Assim, fica evidente a necessidade de uma melhor avaliação da simulação de estruturas com a aquisição de dados de tráfego, e principalmente de clima, atribuídos os dados obtidos pelo S-VECD e da caracterização LVE, para dessa forma, apresentar qual estrutura e materiais terão o melhor desempenho à fadiga.

4.3.4 Classificação das Misturas Asfálticas pela Deformação Permanente e Fadiga

Da mesma forma que a fadiga, a deformação permanente é um dos principais defeitos que ocorrem nos pavimentos brasileiros. Os afundamentos de trilha de roda é a forma mais comum de deformação permanente e pode ter diversas causas, como o enfraquecimento da camada de binder e a repetição de tensões aplicadas ao subleito, sub-base ou base, com contribuição relativa de cada uma dessas camadas para a deformação total. Outro tipo de afundamento por trilha de roda resulta na acumulação de deformação nas camadas asfálticas. Este tipo de afundamento é causado por misturas que possuem pequena resistência ao cisalhamento, insuficiente para resistir à passagem das cargas repetidas

Já o trincamento por fadiga é descrito como um processo de deterioração estrutural que um material sofre quando submetido a um estado de tensões e de extensões repetidas, resultando no aparecimento de fissuras no material que evoluem para trincas ou ruptura completa, após um número suficiente de cargas repetidas, resultando no aparecimento de fissuras no material que evoluem para trincas ou ruptura completa, após um número suficiente de repetições de carregamento.

Como pode ser visto na apresentação dos resultados, a análise destes defeitos é uma tarefa complexa, uma vez que, para ambas propriedades dos materiais, as condições ambientais e a estrutura são fatores que afetam diretamente nestes defeitos. Visando uma melhor compreensão dos resultados obtidos para ambos ensaios (deformação permanente e fadiga), utilizaram-se os resultados de cada um deles em separado para a estrutura simulada com espessura de revestimento com 10 cm e com os resultados de FAF, ambos obtidos através da simulação da equação de Nascimento (2008), para a avaliação do comportamento frente aos dois fenômenos das misturas estudadas.

Nas Figuras 111 e 112 estão plotados os resultados de fadiga versus os resultados de FN, adicionando os valores dos limites propostos por Faccin (2018) e Nascimento (2008) para FN. Para fadiga ainda não existem valores que limitem o tráfego para os resultados de FAF e Nf obtidos pela simulação da equação de Nascimento (2008).

Figura 111 - Quadro de classificação de desempenho frente à fadiga e à deformação permanente para os resultados de FAF simulados pelas Curvas de Wöhler geradas da Equação de Nascimento (2016)

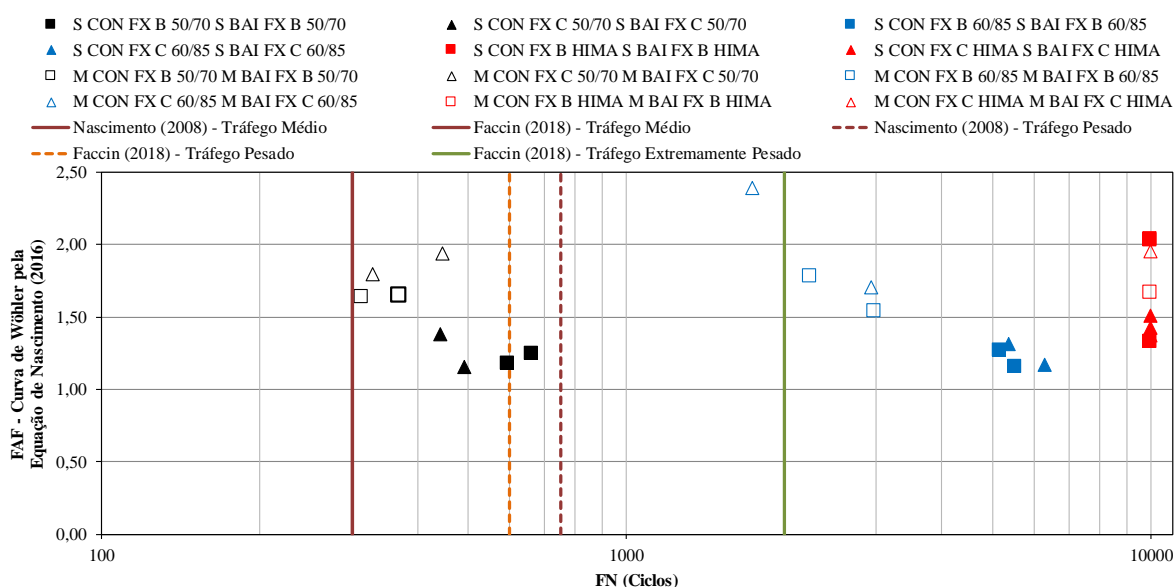
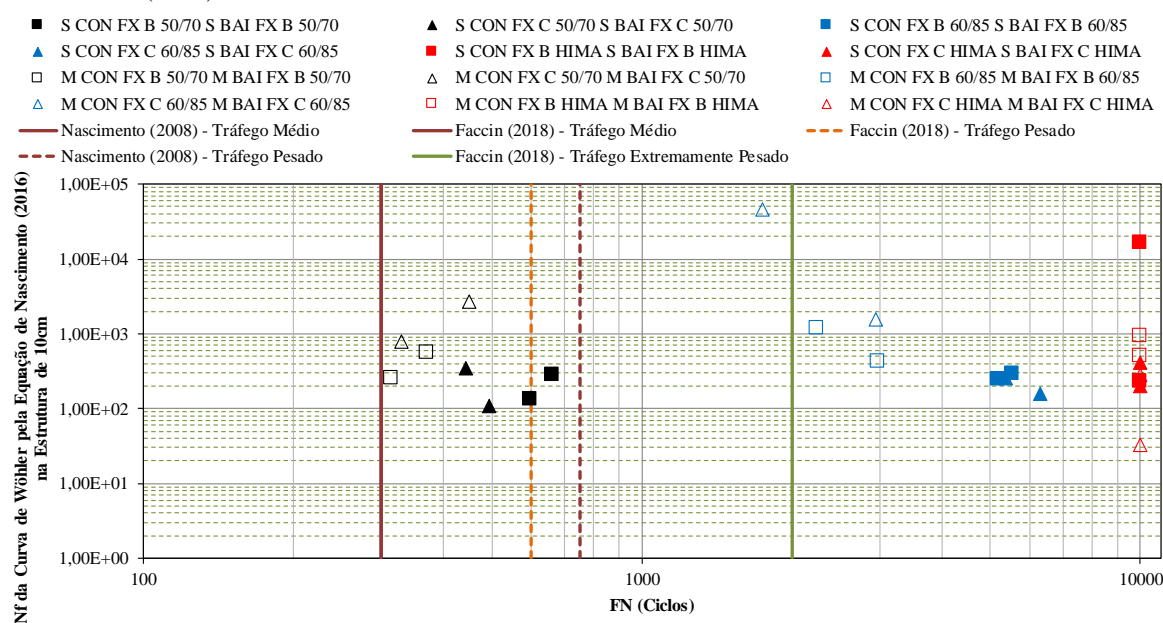


Figura 112 – Quadro de classificação de desempenho frente à fadiga e à deformação permanente para os resultados de Nf simulados na estrutura de 10cm pela Curvas de Wöhler geradas da Equação de Nascimento (2016)



Ao se analisar os dois gráficos apresentados, percebe-se que os FAF's simulados através da equação de Nascimento (2008) se apresentam como um bom indicador de vida de fadiga, uma vez que os comportamentos foram semelhantes se comparar com o gráfico da Figura 112 que apresenta os Nf's obtidos através da simulação da estrutura.

De uma maneira geral, para as duas figuras, as misturas localizadas à direita são misturas com maior resistência à deformação permanente, e os maiores valores de FAF e Nf serão as misturas com maiores resistências à fadiga.

Para um método de seleção de misturas asfálticas utilizando os gráficos apresentados, seria interessante primeiro o projetista escolher as misturas para o tráfego desejado, pelos valores de FN. Pois, desta forma, parece interessante estabelecer o FN primeiro, pois a deformação permanente pode estar ligada fortemente a mistura asfáltica utilizada, uma vez que, valores baixos de FN para um tipo de tráfego não coerente pode levar ao defeito precocemente, e dessa forma as misturas já devem ser excluídas no processo de seleção. Então após a seleção da mistura para a deformação permanente, escolher-se-ia as misturas para resistência à fadiga, uma vez que este fenômeno é dependente das questões de misturas e diretamente ligado à estrutura do pavimento e a espessura da camada de revestimento.

É possível verificar que para deformação permanente a influência do tipo de ligante asfáltico e do teor utilizado se torna imprescindível para a melhora das misturas asfálticas frente a este fenômeno. Para as misturas com ligante convencional CAP 50/70 e AMP 60/85, percebe-se que a redução no teor de ligante apresenta melhores valores de FN. Em contrapartida, a fadiga tende a diminuir o FAF e o Nf da simulação da estrutura. Sabe-se que os baixos teores de asfalto comprometem a durabilidade do material em termos de fadiga e envelhecimento precoce, em contrapartida para a deformação permanente o elevado teor de asfalto podem acarretar problemas de estabilidade, pois ao aumentar a espessura do filme asfáltico entorno do agregado provocando a redução no atrito entre os grãos e lubrificando mais o contato grão a grão, dessa forma a mistura asfáltica deve ter o teor de ligante em quantidade suficiente para garantir as ligações entre os agregados e principalmente compatível com a boa durabilidade.

Em ambos os gráficos (Figuras 111 e 112) há três grandes grupos de misturas. Primeiro, as misturas com ligante convencional CAP 50/70, que foram as misturas que apresentaram os menores valores de FN e, através das classificações de Nascimento (2008) e Faccin (2018) encontram-se para um tráfego médio. Em segundo, estão as misturas com ligante modificado por polímero AMP 60/85, que embora se apresentem com valores intermediários, estão localizados na classificação de Nascimento (2008) como de tráfego pesado. Já, para a classificação de Faccin (2018), estas mesmas misturas se classificam para um tráfego

extremamente pesado, com a exceção da mistura M CON FX C 60/85 que fica com a classificação de tráfego pesado. Para o terceiro grupo estão as misturas com ligante altamente modificado HIMA, que não atingiram FN conforme especificação, sendo assim, se classificariam para os tráfegos pesados de Nascimento (2008) e extremamente pesado de Faccin (2018), estando ainda em conformidade com o ensaio realizado para caracterização do ligante asfáltico HIMA, onde no ensaio de MSCR e o parâmetro Jnr ($Jnr=0,21$ ($76^{\circ}C$)) o classifica para um tráfego extremamente pesado.

Na deformação permanente, é nítido que o aumento na modificação do ligante asfáltico traz melhorias mais evidentes que o tipo de granulometria e faixa granulométrica, uma vez que comparando uma mesma mistura é possível obter uma classificação de tráfego médio até extremamente pesado com a simples troca de ligante asfáltico utilizado.

Em contrapartida, frente ao fenômeno da fadiga, esta tarefa é mais complexa, ficando mais evidente com os gráficos apresentados acima, conforme pode ser visualizado nas Figuras 111 e 112, que uma mistura com ligante convencional CAP 50/70 pode apresentar os mesmos valores de FAF e Nf que as misturas realizadas com os ligantes modificados (AMP 60/85 e HIMA). Sabe-se que os asfaltos modificados com polímero apresentam bons resultados em campo, e que a modificação do ligante asfáltico tem grande influência na vida de fadiga das misturas asfálticas. Kim, Khosla e Kim (1991) demonstram que misturas asfálticas com ligantes modificados apresentam rigidez menor e por consequência se apresentam com uma maior resistência à fadiga.

Dessa forma, ressalta-se que para uma análise completa e precisa da resistência à fadiga de misturas asfálticas, com ligantes convencionais e com ligantes modificados, se torna imprescindível a necessidade de uma avaliação conjunta das curvas C vs S e das envoltórias de ruptura com as características de rigidez dos materiais, aplicadas então em uma estrutura de pavimento, simulando situações próximas os reais de clima e tráfego.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo estão apresentadas as conclusões finais do trabalho, baseadas nas discussões acerca dos resultados apresentados no capítulo anterior. São apresentadas ainda algumas recomendações/sugestões para pesquisas futuras visando uma compreensão frente aos mesmos objetivos deste trabalho.

5.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como intuito contribuir para a implementação e disseminação do novo ensaio de Fadiga à Tração Direta Uniaxial Cíclico e a implantação do protocolo de cálculo do modelo *Simplified -Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD). Ao mesmo tempo visou estudar o comportamento de misturas asfálticas quanto a influência do tipo de ligante asfáltico utilizado, do método de dosagem e do arranjo granulométrico quanto as suas propriedades viscoelásticas, deformação permanente e dano por fadiga.

Os objetivos deste trabalho foram alcançados, visto que, a partir do controle das respostas mecânicas da prensa e do material ensaiado, não foram constatadas disfunções do sistema que acarretassem possíveis alterações das leituras de ensaio, evidenciando a eficácia das peças confeccionadas. Já com os dados obtidos, e baseando-se no ferramental do modelo S-VECD, foi possível estabelecer curvas características de dano (C versus S) satisfatórias e que, independentemente da condição do teste, determina-se um conjunto de propriedades e parâmetros que permitem a obtenção do comportamento em diversas outras condições de tempo de carregamento (frequência) ou temperatura, a partir de simulação.

Para verificação do comportamento das 24 misturas asfálticas confeccionadas com ligantes asfálticos convencional, modificado e altamente modificado, algumas etapas metodológicas e de análise dos resultados precisaram ser realizadas até estabelecer uma classificação da vida de fadiga. Então as conclusões quanto aos processos serão apresentadas pontualmente, divididas como foram apresentadas na metodologia e na apresentação dos resultados.

Quanto aos processos metodológicos:

I. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

- As misturas Marshall apresentaram teores de ligante superior às misturas SUPERPAVE, nas quais, o menor aumento no teor foi de 0,4 % e o maior de 1,2 %. Destaca-se que os

teores de ligante obtidos na dosagem SUPERPAVE não atendem ao teor mínimo requerido de 4,5% para camada de rolamento da norma DNIT 031 (2006);

- Com relação ao tipo de ligante utilizado, houve um aumento no teor de ligante de projeto com o a modificação do ligante;
- Os parâmetros de densificação obtidos na compactação pelo CGS, o CDI e TDI, demonstraram que com a exceção da mistura S CON FX B 50/70, que obteve valor de CDI abaixo do limite proposto por Nascimento (2008) para tráfego médio, todas as outras ficaram acima do valor mínimo, já com relação ao TDI todas as misturas ficaram a cima do limite proposto por Nascimento (2008) para tráfego pesado;
- As porosidades FAD apresentaram valores menores que 48, indicando que os tamanhos de agregados os quais compõem a FAD das misturas formam um esqueleto mineral resistente à deformação permanente.

II. PROPRIEDADES DE DEFORMABILIDADE

- A regressão linear múltipla mostrou a predominância das variáveis independentes da fração do ligante asfáltico para os resultados de MR, mas à medida que houve o aumento da temperatura algumas variáveis independentes da fração dos agregados tiveram significância nos resultados;
- Para os resultados de MR a 10°C as misturas dosadas com o CAP 50/70 e com o Compaflex AMP 60/85, percebe-se a influência dos dois métodos de dosagem, as misturas dosadas pelo método Marshall apresentaram maior rigidez em relação as misturas dosadas pelo método SUPERPAVE, sendo o contrário para as misturas confeccionadas com o ligante HIMA;
- Elevando a temperatura de ensaio do MR para 25°C o comportamento das misturas é alterado em comparação com as misturas executadas à temperatura de 10°C. As misturas com menor teor de ligante, misturas dosadas através do método SUPERPAVE, apresentaram nas três frequências de carregamento executadas, uma maior rigidez do que as misturas dosadas através da metodologia Marshall;
- Já para 35°C as misturas dosadas com os ligantes asfálticos modificados (HIMA e AMP 60/85) apresentam uma rigidez superior no ensaio de MR que as misturas dosadas com o ligante asfáltico convencional; O aumento da temperatura, o esqueleto mineral vem apresentar uma certa importância, uma vez que o ligante asfáltico com o aumento de

temperatura vem a ser menos viscoso, porém mesmo assim o tipo de ligante acabou influenciando mais que a granulometria;

- A regressão linear múltipla para o ensaio de Módulo Complexo mostrou que o PG de alta temperatura e o ponto de amolecimento apresentam relação estatística com o módulo dinâmico;
- As misturas dosadas pela metodologia SUPERPAVE, em especial as misturas com ligantes modificados (AMP 60/85 e HIMA), foram as que apresentaram os menores valores de E1 e E2;
- Considerando o mesmo ligante asfáltico utilizado, observa-se sobreposição das curvas mestras das misturas asfálticas dosadas pelas metodologias Marshall e SUPERPAVE. Os menores valores de módulo dinâmico foram para as misturas com ligante asfáltico HIMA;
- Com relação aos ângulos de fase as misturas dosadas através da metodologia SUPERPAVE, que, conseqüentemente, apresentam menor teor de ligante e menores valores, tendem a um comportamento mais elástico quando comparadas com as mesmas misturas com o mesmo ligante asfáltico.

III. PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA

- No ensaio de RT o modelo da regressão linear múltipla apresentou um R^2 ajustado de 0,70, sendo que as variáveis que influenciam significativamente no resulta é o PG de alta temperatura e o $|G^*|/\sin(\delta)$ do ligante virgem;
- O aumento na quantidade de ligante modificado aumentou a coesão da mistura para o ensaio de RT, já para o ligante convencional o efeito foi contrário, o aumento do teor de ligante reduziu o atrito da mistura, visto que os esqueletos minerais são os mesmos;
- Para o ensaio de FN o modelo da regressão linear múltipla apresentou um R^2 ajustado de 0,95, e as únicas variáveis que apresentaram significância ($p < 0,05$) foram o PG de alta temperatura, o teor de ligante, o MSCR (Jnr @3,2kPa/kPa-1) e o ponto de amolecimento;
- Nos resultados de FN a influência significativa do tipo e teor do ligante asfáltico é perceptível. Quanto maior foi a quantidade de modificação no ligante asfáltico por polímero SBS maior o FN das misturas, uma vez que o ligante AMP 60/85 apresenta uma modificação de 4,5% de polímero SBS e o ligante HIMA uma modificação de 7,5% de SBS. Esta influência está relacionada a decorrência da melhor absorção dos esforços

e da maior recuperação elástica que as modificações conferem ao concreto asfáltico. Por outro lado, quando se houve um aumento no teor de ligante asfáltico devido a diferença entre os métodos de dosagem, por impacto e amassamento, para as misturas asfálticas com ligante AMP 60/85 e o CAP 50/70 aconteceu uma redução do FN das misturas;

- Pela classificação das misturas asfálticas pelo FAF das curvas de Wöhler, conclui-se que o melhor desempenho de fadiga foi obtido para as misturas com ligante asfáltico HIMA e o AMP 60/85 (materiais modificados com polímeros). Porém existe uma exceção da mistura S CON FX C 50/70 que através da classificação FAF é a melhor mistura frente ao desempenho à fadiga, contrariando, as outras misturas com o CAP 50/70 que se encontram ao final da classificação que seriam as piores misturas para o desempenho a fadiga. As classificações apresentadas através do FAF e pelas curvas Wöhler não levam em conta os valores de rigidez das misturas asfálticas, e nem a combinação das propriedades das misturas com estrutura do pavimento, clima e carga de tráfego. Estas variáveis podem afetar significativamente o desempenho em serviço das misturas asfálticas, especialmente porque as amostras apresentam propriedades Linear Viscoelásticas muito diferentes (valores de rigidez);
- As curvas geradas de C versus S para as misturas com ligante convencional, tanto para as dosadas pela metodologia SUPERPAVE como as pelo Marshall, tendem a apresentar uma maior perda de integridade do material quando se analisa um mesmo nível de dano acumulado.
- Através das classificações de FAF (Nascimento, 2016 e Abordagem Clássica), percebe-se a influência do tipo e principalmente do teor de ligante, visto que para o FAF com a equação do Nascimento (2016) as misturas com ambos os ligantes modificados, e dosadas através da metodologia Marshall tomam a parte superior da classificação. A mesma situação é encontrada para a classificação do FAF para as curvas pela abordagem clássica, mas não sendo exatamente as mesmas misturas e com a exceção da mistura S CON FX C 50/70;
- Como se esperava à medida que se aumenta a espessura do revestimento asfáltico existe um aumento na vida de fadiga (N_f), tanto para as curvas de Wöhler pela abordagem clássica como para as curvas pela equação de Nascimento (2016), uma vez que com o aumento da espessura, há um aumento do nível de dissipação da tensão que será transmitida para a próxima camada e uma redução na deformação específica de tração;

- Na classificação das misturas frente a deformação permanente e a fadiga, é nítido que na deformação permanente a modificação do ligante asfáltico acarreta melhorias mais evidentes que o tipo de granulometria e faixa granulométrica, uma vez que comparando uma mesma mistura é possível obter uma classificação de tráfego médio até extremamente pesado com a simples troca de ligante asfáltico utilizado. Mas em contrapartida, frente ao fenômeno a fadiga esta tarefa é mais complexa, pois uma mistura com ligante convencional CAP 50/70 pode vir apresentar os mesmos valores de FAF e Nf que as misturas realizadas com os ligantes modificados (AMP 60/85 e HIMA).

Além de contribuir com a disseminação de um novo ensaio, mais prático e eficiente e com a importante avaliação do dano por fadiga, espera-se que, em breve, o novo método de dimensionamento em vigor possa assumir tais teorias, fornecendo mais ferramentas aos projetistas e possibilitando projetos mais assertivos e seguros.

Ressalta-se que para uma análise completa e da resistência à fadiga de misturas asfálticas, com ligantes convencionais e com ligantes modificados, se torna imprescindível a necessidade de uma avaliação conjunta das curvas C vs S e das envoltórias de ruptura com as características de rigidez dos materiais, aplicadas então em uma estrutura de pavimento, simulando situações próximas os reais de clima e tráfego.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

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

- Utilizar o software FlexPAVE e o LVECD para a caracterização de dano por fadiga em um verdadeiro cenário para as misturas estudadas, aplicando funções de transferência entre dano simulado e verificando a correspondência com a área trincada;
- Caracterizar e avaliar a reologia quanto ao dano por fadiga nos ligantes asfálticos das misturas para a verificação das correlações entre o desempenho do ligante e o desempenho da mistura;
- Implementar o protocolo de ensaio de *healing* em misturas asfálticas, para avaliar nas mesmas misturas ainda disponíveis para moldagem o potencial de recuperação de integridade em testes parciais de fadiga;
- Verificar o comportamento das misturas asfálticas utilizadas com outras fontes de agregados minerais com diferentes formações geológicas;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION. AASHTO TP 31-94. **Standard Method of Test for Determination of the Resilient Modulus of Bituminous Mixtures by Indirect Tension**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.

_____. AASHTO T 79-12. **Determining the Dynamic Modulus and *Flow Number* for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.

_____. 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 209-05, **Standard Method of Test for Maximum Specific Gravity of Bituminous Paving Mixtures**, American Association of State Highway and Transportation, Washington, D. C.

_____. AASHTO T321-07. **Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending**. Washington, DC.

_____. AASHTO T 342- 11, **Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012. NBR 6296: **Produtos betuminosos semissólidos — Determinação da massa específica e densidade relativa**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 6560: **Materiais Betuminosos - Determinação do Ponto de Amolecimento - Método do Anel e Bola**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 6576: **Materiais Asfálticos - Determinação da Penetração**. Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 11341: **Derivados de petróleo - Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 15184: **Materiais Betuminosos - Determinação da Viscosidade em Temperaturas Elevadas Usando um Viscosímetro Rotacional**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. NBR 15619: **Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 16018: **Misturas Asfálticas – Determinação da Rigidez por Compressão Diametral sob Carga Repetida**. Rio de Janeiro, 2012.

ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem**. Dissertação de mestrado.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 3497-03. **Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures**. American Society for Testing and Materials, USA.

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

_____. ASTM D 2872-2012 (E 2013). **Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)**. American Society for Testing and Materials. ASTM.

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

_____. 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 6926-04. **Standard Practice Preparation of Bituminous Specimens Using Marshall Apparatus**. American Society for Testing and Materials, USA.

_____. 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 7405-10A. **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.

_____. ASTM D7460-08. **Standard Test Method for Determining Fatigue of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending**., Philadelphia, USA, 2008.

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., SOARES, J. B., CASTELO BRANCO, V. T. F. **Interpreting fatigue tests in hot mix asphalt (HMA) using concepts from viscoelasticity and damage mechanics**. Revista Transportes, v23, n° 2, p 85-94, Rio de Janeiro-RJ, 2015.

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. (2014) **Performance de Asfaltos Modificados com Polímeros**. Anais do 21º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, RJ. Apresentação em PowerPoint.

BAHIA, H.U.; FAHEEM, A. **Using the Superpave Gyrotory Compactor to Estimate Rutting Resistance of Hot-Mix Asphalt**. Transportation Research Board. Nº: E-C124 - Practical Approaches to Hot-Mix Asphalt Design and Production Quality Control Testing. Dezembro, 2007.

BASTOS, J. B. S.; J. B. Soares; L. A. H. Nascimento (2017) **Critérios Para os Resultados do Ensaio Uniaxial de Carga Repetida de Misturas Asfálticas em Laboratório a partir do desempenho em Campo**. Transportes, v. 25, n. 2, p. 19-40.

BASTOS, J. B. D. (2016) **Considerações Sobre a Deformação Permanente de Pavimentos Asfálticos no Dimensionamento Mecânico-Empírico**. 200p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

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

BARBOZA JR, V. S. **Efeito Deletério da Água em Misturas Asfálticas com Adição de Ligante Modificado com Polímero e de Cal**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 221 p., 2018.

BARNES, H.A. **Thixotropy – a review**, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. Volume 70, Issues 1–2, Pp 1-33, 1997.

BARROS, L. BRITO, L. CERATTI, J. **Desempenho quanto à deformação permanente de misturas asfálticas com diferentes ligantes**. XVIII CILA – Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Bariloche, Patagonia, Argentina, 2015.

BENNERT, T.; MARTIN, J.V. **Polyphosphoric Acid in Combination with Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer: Laboratory Mixture Evaluation. Polyphosphoric Acid Modification of Asphalt Binders: A Workshop**. Transportation Research Board, 2012.

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

BOCK, A., L. **Efeitos da Incorporação de Cal Hidratada em Concretos Asfálticos Elaborados com Ligante Convencional e Modificado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

BOCK, A. L., HARTMANN, D. A., BUDNY, J., CERATTI, J. A. P., SPECHT, L. P. **Estudo Laboratorial Sobre os Efeitos de Diferentes Formas de Adição de Cal a Concreto Asfáltico**. Teoria e Prática na Engenharia Civil (Online)., v.09, p.60 - 69, 2009.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales.** 2014. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

BOHN, K. A. **Utilização de material fresado em misturas asfálticas mornas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2016.

BRUXEL, D. F. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaios laboratoriais e de análise de desempenho.** 2015. 129 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2015.

BUDNY, J. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas.** 2012. 155 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

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

BRITO, L.A.T.; CERATTI, J.A.P.; VICTORINO, D.R. **Indicadores do desempenho de misturas asfálticas determinados através do ensaio de compressão diametral.** Revista TRANSPORTES, v. XVI, n. 1, p. 36-44, Junho 2008.

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente.** 2016. 152 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2016.

CASTELO BRANCO, V. T. F. **A Unified Method for the Analysis of Nonlinear Viscoelasticity and Fatigue Cracking of Asphalt Mixtures Using the Dynamic Mechanical Analyzer.** Tese (doutorado). Texas A&M University, College Station, TX, Estados Unidos. 2008.

CERATTI, J. A. P. **Estudo do Comportamento a Fadiga de Solos Estabilizados com Cimento para Utilização em Pavimentos.** Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 1991.

COLPO, G. B. **Análise de Fadiga de Misturas Asfálticas Através do Ensaio de Flexão em Viga Quatro Pontos.** Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2014.

CORTÉ, J. F.; BROSSEAUD, Y.; SIMONCELLI, J. P.; CAROFF, G. **Investigation of Rutting of Asphalt Surface Layers: Influence of Binder and Axle Loading Configuration.** Transportation Research Record. No. 1436. p. 28-37. 1994.

COUTINHO, R. P. REUBER, A. F. CASTELO BRANCO, V. T. F. SOARES, J. B. **Identificação do comportamento viscoelástico não-linear e do dano em misturas asfálticas utilizando testes de varredura de tensão.** Revista Transportes. v19, No 3. P 35-41. 2011.

CHRISTENSEN, R. M. **Theory of Viscoelasticity**. Dover Publications, Inc, 2nd Ed. New York, USA, 364 pg, 2003.

D'Angelo, J. A. (2009) **The Relationship of the MSCR test to rutting**. Road Materials and Pavement Design, v. 10, supl.1, p. 61-62.

DANIEL, J. S. e KIM, Y. R. **Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic Continuum Damage Model**. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, v. 71, p. 619–650, 2002.

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

DI BENEDETTO H.; DE LA ROCHE, C.; FRANCKEN, L. **Fatigue of Bituminous Mixtures: Different Approaches and RILEM Interlaboratory Tests**. Proceedings of the Fifth RILEM Symposium on Mechanical Tests for Bituminous Mixes. Rotterdam, Netherlands, 1997.

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. & DE LA ROCHE, C. **State of the Art on Stiffness Modulus and Fatigue of Bituminous Mixtures**. RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. Brussels, Belgium, 1998.

DI BENEDETTO, H. NGUYEN, Q.T. SAUZÉAT, C. **Nonlinearity, heating, fatigue and thixotropy during cyclic loading of asphalt mixtures**, Road Materials Pavement. Dez. 12 pp 129–158, 2011.

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

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.

DNER, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Pesquisa de asfaltos modificados por polímeros – Relatório Final Tomo I e II**. Rio de Janeiro/RJ, 1998.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA E RODAGEM. DNER-ME 035/98: **Agregados – Determinação da abrasão Los Angeles**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. DNER-ME 043/95: **Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall**. Rio de Janeiro, 1995, 11p.

_____. DNER-ME 054/97: **Equivalente de areia**. Rio de Janeiro, 1997.

_____. DNER-ME 081/98: **Determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo**. 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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES - DNIT. DNIT 005/2003 – TER: **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. DNIT 031/2006 - ES: **Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. DNIT – ME 135/2010: **Pavimentação asfáltica – Mistura asfálticas - Determinação do módulo de resiliência - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2010, 6p. Origem: DNER-ME 133/1994.

_____. DNIT – ME 136/2010: **Pavimentação asfáltica – Mistura asfálticas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2010, 6p.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. **Comportamento de Fluência-Recuperação de Ligantes Asfálticos Modificados com Copolímero SBR e Ácido Polifosfórico**. TRANSPORTES, v. 23, n. 2, p. 56-64, 2015.

DOMINGOS, M. D. I.; A. L. Faxina; L. L. B. Bernucci (2017) **Characterization of the Rutting Potential of Modified Asphalt Binders and Its Correlation With the Mixture's Rut Resistance**. Construction and Building Materials, v. 144, p. 207-213.

FACCIN, C. **Concretos Asfálticos em Utilização no Rio Grande do Sul: Comportamento Mecânico e Desempenho em Campo quanto à Deformação Permanente**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 222 p., 2018.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, FHWA. **Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis**. Federal Highway Administration, FHWA-SA-95-003. Lexington, KY, USA. 1994.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION, FHWA. **Superpave Binder Specification**. 115p. Washington, D.C. www.tfhr.gov/. 2002.

FERREIRA, J. L. S., BASTOS, J. B. S., SOARES, J. B. **Validação da metodologia de faixa de agregados dominantes para avaliação e especificação da granulometria de misturas asfálticas densas**. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Ouro Preto, 2015.

FERREIRA, J. L. S.; SOARES, J. B.; BASTOS, J. B. S. (2016) **Método de Seleção Granulométrica com Foco na Resistência à Deformação permanente**. TRANSPORTES, v. 24, n. 2, p. 46-52.

FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers**. John Wiley, Nova York, 1980.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Universidade Federal de Santa Catarina. 545 p., 2009.

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.

FRED, N. Finn. **Factors involved in the design of asphaltic pavement surfaces**. National Cooperative Highway Research Program – NCHRP, Report 39, National Academy Press, Washington, 1967

FREIRE, R. A. COUTINHO, R. P. CASTELO BRANCO, V. T. F. Uso do s-vecd para construção de curvas características de dano de misturas asfálticas finas usando ensaios de varredura linear de amplitudes de deformação. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Ouro Preto, 2015.

FRITZEN, M. A. **Avaliação de Soluções de Reforço de Pavimentos Asfálticos com Simulador de Tráfego na Rodovia Rio Teresópolis**. Tese M. Sc., UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2005.

GONTIJO, P. R. A. **A Fadiga de Misturas Betuminosas – Condição Essencial no Dimensionamento Racional de Pavimentos Flexíveis**. In: XV Reunião Annual de Pavimentação, ABPv, Anais vol. 15, p.1-55. Belo Horizonte, MG, 1980.

GREENE, J.; CHUN, S.; CHOUBANE, B. **Enhanced gradation guidelines to improve asphalt mixture performance**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2456. DOI: 10.3141/2456-01. Washington, D.C., 2014.

HINTZ, C. **Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue**. Tese (Doutorado), University of Wisconsin – Madison, Madison, WI, 2012.

HOU, T., B. S. UNDERWOOD, KIM, Y. R. **Fatigue Performance prediction of North Carolina mixtures using the simplified viscoelastic continuum damage model**. In: Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 79, pp. 35-80, 2010.

HUANG, B.; SHU, X.; LI, O. **Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements**. Cement and Concrete Research, v. 35, 2005.

HUANG. W.; TANG, N. **Characterizing SBS Modified Asphalt With Sulfur Using Multiple Stress Creep Recovery Test**. Construction and Building Materials, v. 93, p. 514-521, 2015.

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

KANDHAL, P. S.; COOLEY, L. A. Jr. **Accelerated laboratory rutting tests: evaluation of the asphalt pavement analyzer**. National Cooperative Highway Research Program – Report n 508, 2003.

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

KIM, S. **Identification and assessment of the dominant aggregate size range (DASR) of asphalt mixture**. Dissertation (Doctor of Philosophy). University of Florida, Gainesville, 2006.

KIM, Y.R., KHOSLA, N.O. & KIM, N. **Effect of temperature and mixture variables on fatigue life predicted by diametral fatigue testing**. Transportation Research Record 1317. Washington D.C., USA. Pg 128-138, 1991.

LEITE, L.F.M. **Estudos de prepare e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1999.

LITTLE, D.N.; EPPS, J.A.; SEBAALY, P.E. **The benefits of hydrated Lime in hot mix asphalt**. Report for National Lime Association, 2006. 80p.

LITTLE, D. N.; EPPS, J. **The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt**. Report for National Lime Association, 2001.

LITTLE, D. N.; PETERSEN, J. C. **Unique Effects of Hydrated Lime on the Performance Related Properties of Asphalt Cements: Physical and Chemical Interactions Revisited**. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 17(2), 207-218, 2005.

MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends**. Tese (doutorado) - Ecole doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie Civil, Acoustique Spécialité : Génie Civil. 2014.

MARQUES, G. L. O., RAMIRO, T. T., MOTTA, L. M. G. **Influência dos Índices de Energia de Densificação nos Valores de Módulo de Resiliência de Misturas Asfálticas**. In: XV Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto, 2009, Lisboa. XV Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto. Braga - Portugal : Barbosa & Xavier, Lda., 2009. v. 1. p. 395-404.

MARTINS, A. T. **Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos**. Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE/ Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro-RJ. 2014.

MEDINA, J. **Mecânica dos pavimentos**. 1. ed. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1997.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 2ª ed. Rio de Janeiro. 2005. Editora UFRJ.

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

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

MENDES, L. de O. **A utilização do método bailey para a seleção de agregados em misturas asfálticas.** 131f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) – Universidade de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

MENSCH, N. G. **Análise Viscoelástica de Misturas Asfálticas Quentes e Mornas.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, RS, 2017.

MOHAMMAD, L. N., ABADIE, C., GOKMEN, R., and PUPPALA, A. J. **Mechanistic Evaluation of Hydrated Lime in Hot-Mix Asphalt Mixtures.** Transportation Research Record, 1723, 26- 36, 2000.

MOMM, L. **Comportamento Viscoelástico do Concreto Asfáltico.** 33^a Reunião Anual de Pavimentação, ABPv, Florianópolis, p. 471–487, 2001.

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.

MONISMITH, C. L. & DEACON, J. A. **Fatigue of Asphalt Paving Mixture.** Proc. Of the American Society of Civil Engineers, Transportation Engineering Journal, Vol. 95, N° Te , USA, 1969.

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

MOTTA, L.M.G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas.** Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

MOTTA, L. M. G.; PINTO, S. **O uso de ensaios estáticos na definição de parâmetros de comportamento das misturas asfálticas.** 12^o Encontro de Asfalto, Instituto Brasileiro do Petróleo. Rio de Janeiro, 1994

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda misturas asfálticas em pisa e em laboratório.** 2010. 299f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2010.

MEWIS, J. WAGNER, N.J. **Thixotropy.** Advances in Colloid and Interface Science. Volumes 147–148, March–June, Pp 214-227. 2009.

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

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. **Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente**. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2008.

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**. Submetido ao 21º Encontro de Asfalto do IBP. 2014.

NUÑEZ, J. Y. M. **Caracterização à Fadiga de Ligantes Asfálticos Modificados Envelhecidos a Curto e Longo Prazo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

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

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.

PAIS, J.C. Consideração da Propagação de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis. Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Guimarães, Portugal, 1999.

PANIZ, E. **Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil**. 2018. 156 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2018.

PARK, S. W. e KIM, Y. R. Analysis of Layered Viscoelastic System with Transient Temperatures. Journal of Engineering Mechanics, v. 124, n. 2, p. 223–231, 1998.

PAVEMENT TECHNOLOGY INC. Industrial Drive NE. Covington, Ga – EUA, 2016
Disponível em: <
<http://nebula.wsimg.com/438626d1f0815d06465e17fa735a9d10?AccessKeyId=8DA934D797F126E79C38&disposition=0&alloworigin=1>> Acesso em 31 de Maio de 2016.

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

ROSSATO, F. P. **Avaliação do fenômeno de adiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS 2015.

PINTO, S. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Betuminosas e Aplicação na Avaliação Estrutural de Pavimentos**. Tese (doutorado). COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 1991.

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.

PREUSSLER, E. S. PINTO, S. MEDINA, J. **Determinação da vida de fadiga de concretos asfálticos brasileiros e aplicação no dimensionamento de reforço de pavimentos**. Anais da 16ª Reunião Anual de Pavimentação da ABPv, Recife-Pe, 1981.

PUTMAN, B. J.; AMIRKHANDIAN, S. N. **Utilization of Waste Fibers in Stone Matrix Asphalt Mixtures**. Journal of Resources, Conservation, and Recycling, v. 24, Issue 3, 2004.

READ, J. M. COLLOP, A. C. **Practical fatigue characterization of bituminous paving mixtures**. Journal of the association of asphalt paving. V66. P 74-101. St. Paul, 1997.

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. et al. **Hot mix asphalt materials, mixture, design and construction**. 2 ed. Lanham, Maryland, Napa Education Foundation. 1996.

SÁ, M. F. P. **Estudo da deformação permanente das misturas betuminosas através de ensaios estáticos e dinâmicos**. Tese M. Sc., UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 1996.

SABOURI, M. A., KIM, Y. R. **Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2447, 117–125, 2014.

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.

SCHAPERLY, R.A. **On the Characterization of Nonlinear Viscoelastic Materials**. Polymer Engineering and Science, v. 9, p. 295–310, 1969.

SCHAPERLY, R. A. "On viscoelastic deformation and failure behavior of composite materials with distributed flaws." Advances in Aerospace Structures and Materials, Aerospace Structures and Materials, 01, S. S. Wang and W. J. Renton, eds., 5-20. 1981.

SCHAPERLY, R. A. **A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure**. J. Mech. Phys. Solids, Vol. 38, pp. 215-253, 1990.

SCHUSTER, S. L. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Misturas Asfálticas Aplicadas em Campo por Meio da Teoria Viscoelástica de Dano Contínuo**. Dissertação de Mestrado,

Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 270 p., 2018.

SOARES, J. B.; SOUZA, F. V. **Considerações sobre módulo resiliente e módulo dinâmico em misturas asfálticas com base na teoria da viscoelasticidade.** XII Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, Quito, 2003.

SOARES, J. B. e SOUZA, F. V. **Verificação do Comportamento Viscoelástico Linear em Misturas Asfálticas.** 16º Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro-RJ, 2002.

SPECHT, L. P.; BABADOPULOS, L. F de A. L.; Di BENEDETTO, H.; SAUZÉAT, C.; SOARES, J. B. **Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes.** Construction and Building Materials. Vol. 149. Pp 648–658. 2017.

SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus.** 2004. 279f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

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 (nº 13), p. 59, 1985.

SCHUSTER, S. L. **Estudo Do Comportamento À Fadiga De Misturas Asfálticas Aplicadas Em Campo Por Meio Da Teoria Viscoelástica De Dano Contínuo.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 270 p., 2018.

SKOK, E., JOHSON, E., TURK., **Asphalt Pavement Analyzer (APA) Evaluation.** In: Report, Department of Civil Engineering, University Minnesota, USA, 2002.

SUMERAJ, J. High Temperature Characteristics of Modified Asphalt Binders. University of Illinois at Urbana-Champaign. Illinois. United States of America. 2016. Disponível em: http://www.il-asphalt.org/files/1114/8234/8048/Jacob_Sumeraj_2016_UoI.pdf. Acesso em 3 set. 2017.

TANGELLA, S. C. S. R. CRAUS, J. DEACOM, J. A. MONISMITH, C. L. **Summary report n fatigue response of asphalt mixtures.** SHRP. TM-UCB-A-003A-89-3. Berkeley, 1990.

TAYEBALI, A. A. DEACOM, J. A. COPLANTZ, J. S. FIN, F. N. MONISMITH, C. L. **Fatigue responses of asphalt-aggregate mixes.** Strategic Highway Research Program. 1994.

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

TONIAL I.A. *et al.* **Características de fadiga e Resiliência de Concretos Asfálticos Brasileiros.** In: 33º Reunião Anual de Pavimentação, Florianópolis, SC, 2001.

UNDERWOOD, B. S. **Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete**. Tese (Doutorado), North Carolina State University – Raleigh, North Carolina, 2011.

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. S., KIM, Y. R., GUDDATI, M. N. **Characterization and performance prediction of ALF mixtures using a viscoelastoplastic continuum damage model**. In: Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 75, pp. 577-636, 2006.

VAVRIK, W. R. **Asphalt mixture design concepts to develop aggregate interlock**. Dissertation (Doctor of Philosophy). University of Illinois, 2000.

WIDYATMOKO, I. **Some practical aspects of performance related testing of bituminous materials**. Proceeding of the European Symposium on Performance of Bituminous and Hydraulic Materials in Pavement – Nottingham, p. 99-104, 2002.

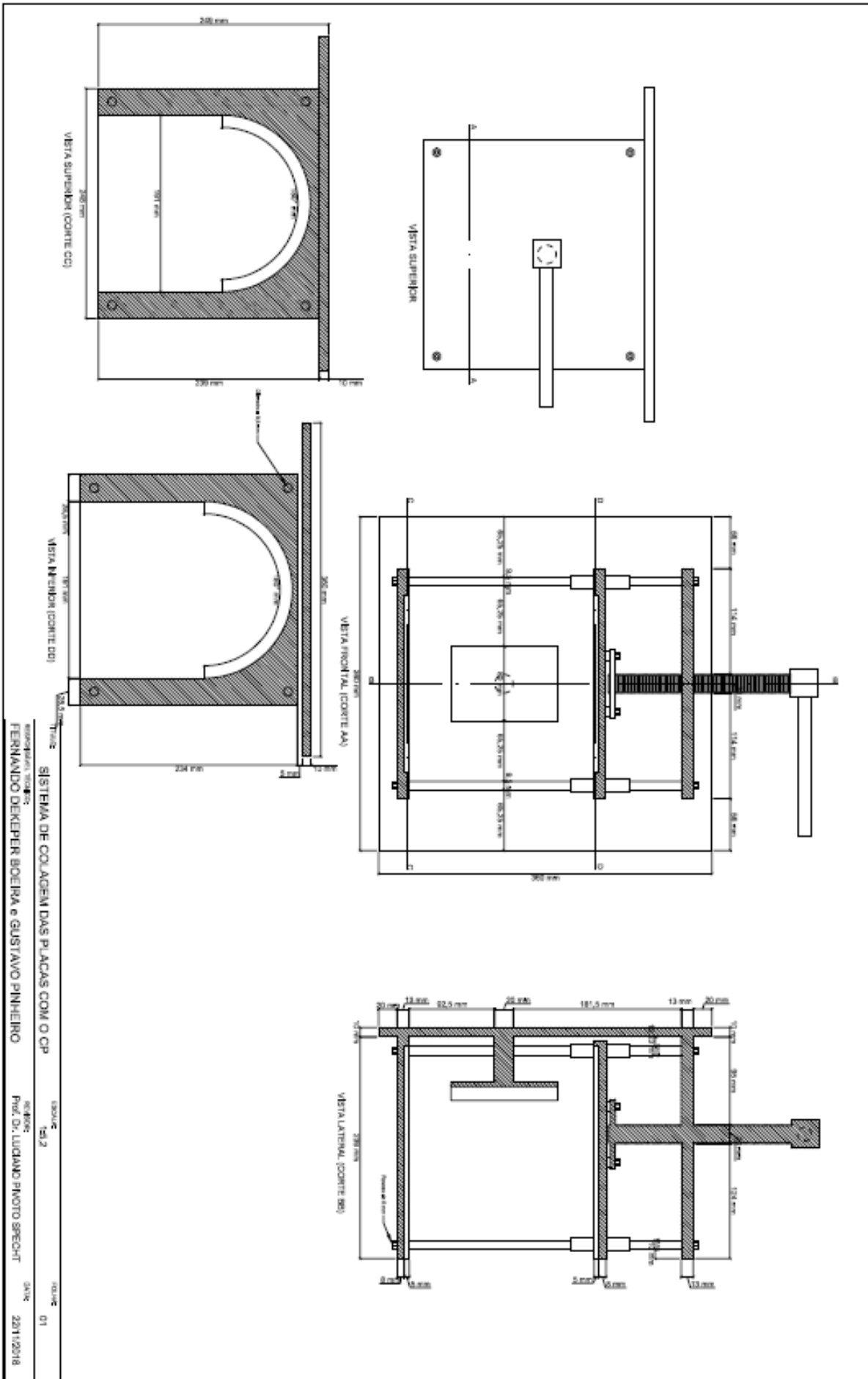
WILLIAMS, M. L., LANDEL, R. F., & FERRY, J. D. **The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids**. Journal of the American Chemical Society, 77(14), 3701–3707, 1955.

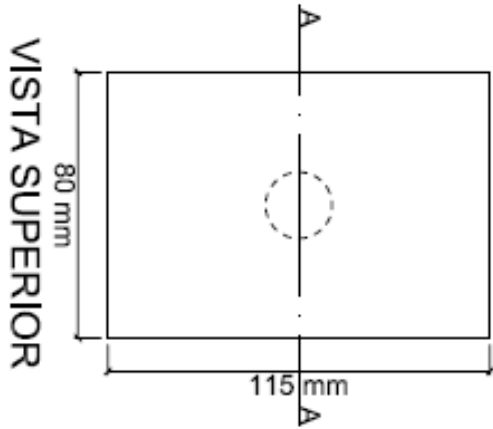
WITCZAK, M. W.; KALOUSH, K. E; PELLINEN, T. K.; EL-BASYOUNY, M.; VON et al. **Simple performance test for Superpave mix design**, National Cooperative Highway Research Program –NCHRP Report 465, Washington, D. C., EUA. 2002.

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.

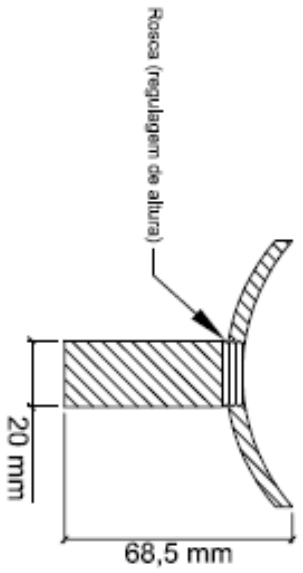
YODER, E. J. & WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. John Wiley & Sons, Inc. New York, Second Edition, 1975.

APÊNDICE A – AS BUILT DOS PROJETOS DAS PEÇAS ADAPTADAS

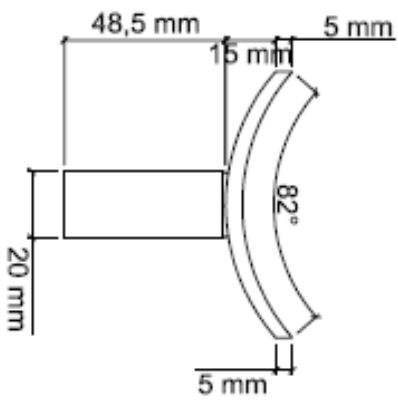




VISTA FRONTAL (CORTE AA)

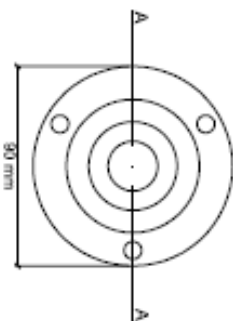


VISTA FRONTAL

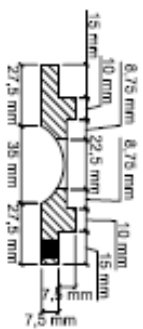


<p>● TÍTULO</p> <p>SUPORTE PARA ALINHAMENTO DO CP</p> <p>responsável técnico</p> <p>fernando dekeper boeira e gustavo pinheiro</p>	<p>● ESCALA</p> <p>1:2</p>	<p>● FOLHA</p> <p>02</p>
<p>Proj. de: LUDJANO PIWOTO SPECHT</p>		
<p>DATA: 20/11/2018</p>		

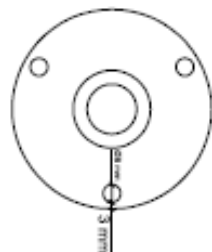
SUPORTE SUPERIOR DA RÓTULA



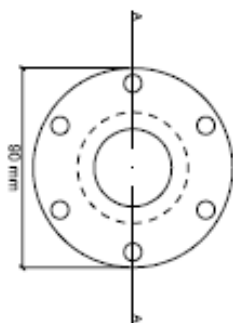
VISTA SUPERIOR



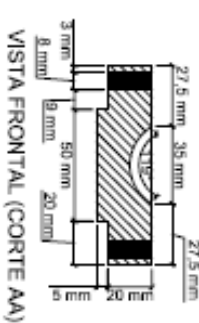
VISTA FRONTAL (CORTE AA)



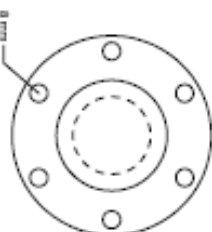
VISTA INFERIOR



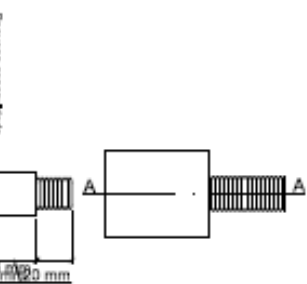
VISTA SUPERIOR



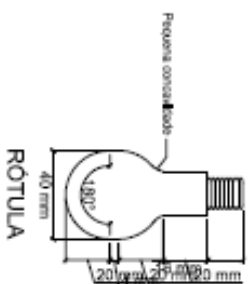
VISTA FRONTAL (CORTE AA)



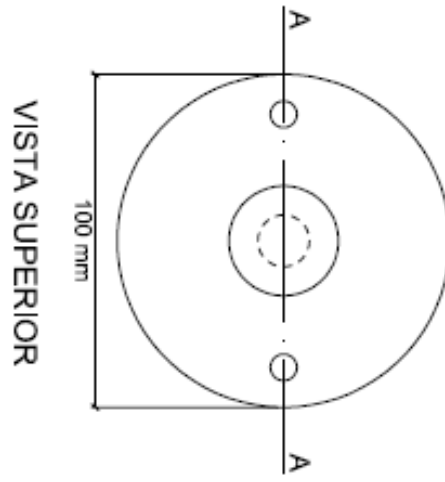
VISTA INFERIOR



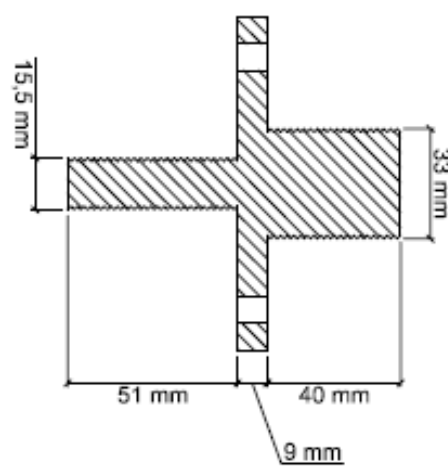
VISTA LATERAL (CORTE AA)



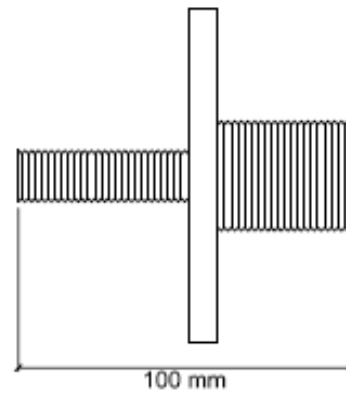
RÓTULA



VISTA SUPERIOR



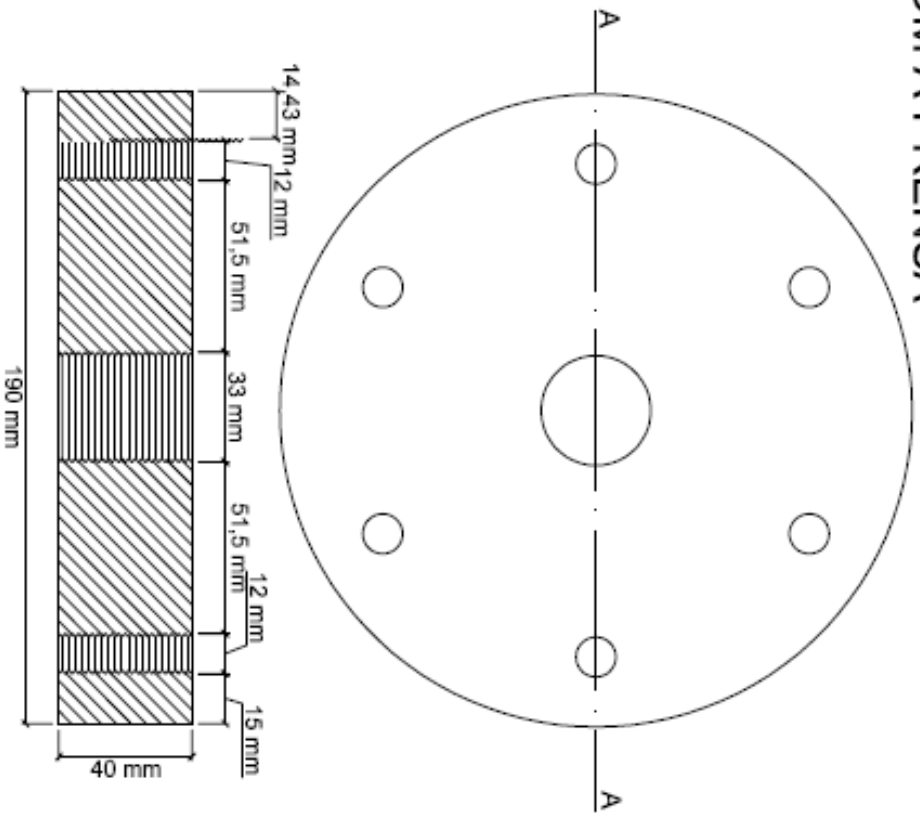
VISTA FRONTAL (CORTE AA)



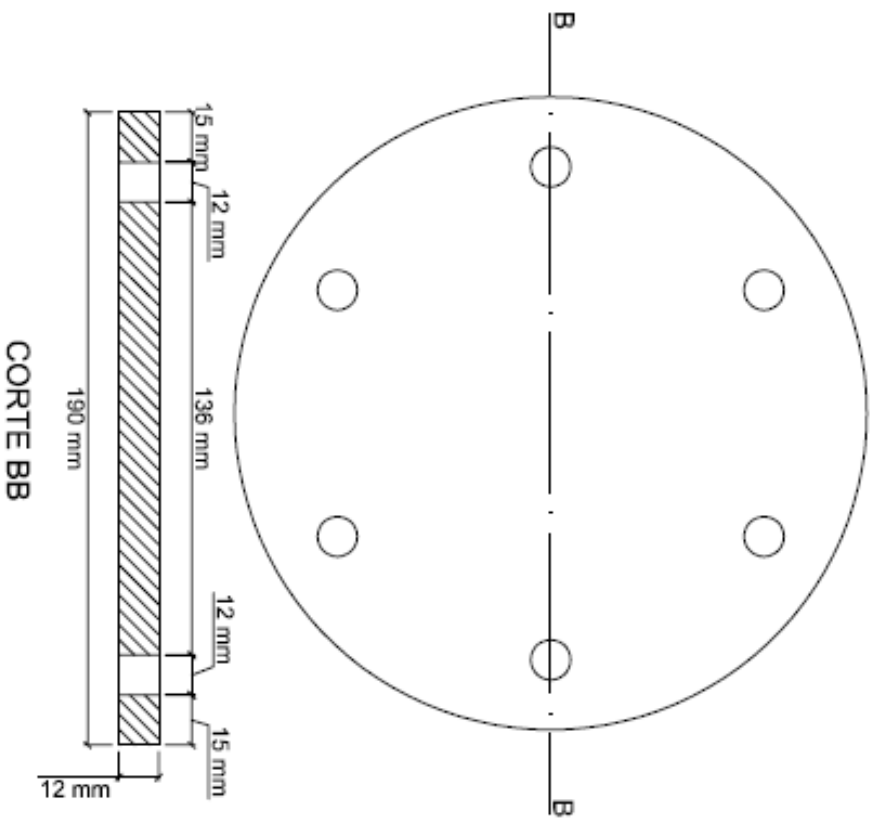
VISTA LATERAL

TÍTULO	ESCALA	FOLHA
CONEXÃO DA PLACA DE SUPORTE COM A MESA DA PRENSA	1:2	04
PROF. DR. LUCIANO PIKOTO SPICHT		
FERNANDO DEKEPER BOEIRA e GUSTAVO PINHEIRO		
		22/11/2018

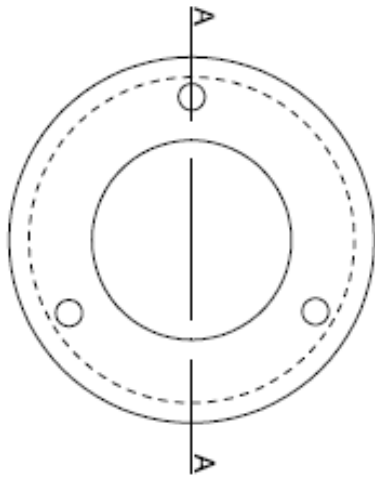
PLACAS DE SUPORTES (TOP E DOWN) COM A PRENSA



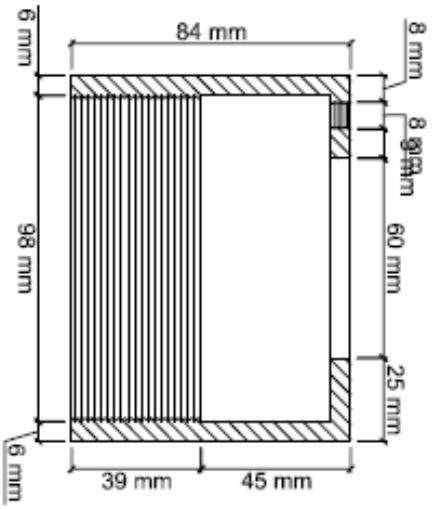
PLACAS DE COLAGEM (TOP E DOWN) COM O CP



COPO DE LIGAÇÃO DA RÓTULA COM A BASE

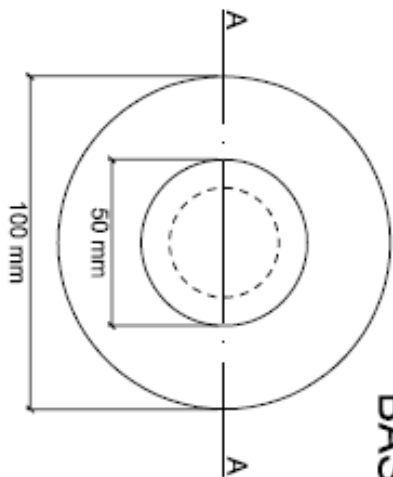


VISTA SUPERIOR

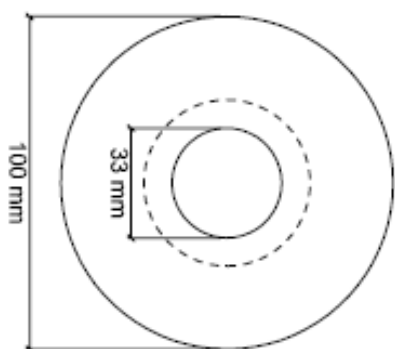


VISTA FRONTAL (CORTE AA)

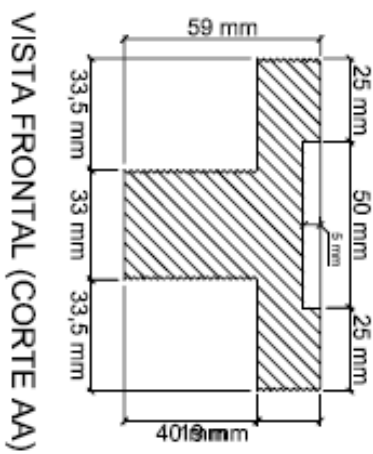
BASE DO COPO



VISTA SUPERIOR



VISTA INFERIOR



VISTA FRONTAL (CORTE AA)

APÊNDICE B – RESULTADOS BRUTOS DO ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

Tabela B.1 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura S CON FX B 50/70

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	34475	707	2,05	1,61	0,18	11,01
-10	20	34362	654	1,90	1,70	0,12	7,09
-10	10	33948	634	1,87	1,88	0,17	9,03
-10	5	33436	621	1,86	2,08	0,21	9,88
-10	2	32690	578	1,77	2,43	0,16	6,71
-10	1	32080	564	1,76	2,72	0,18	6,51
-10	0,5	31718	47	0,15	3,06	0,19	6,25
-10	0,2	30876	160	0,52	3,54	0,21	5,80
-10	0,1	29542	470	1,59	3,99	0,28	7,09
-10	0,01	26630	85	0,32	5,33	0,33	6,10
4	25	27621	1145	4,15	4,87	0,07	1,44
4	20	27311	1127	4,13	5,04	0,06	1,19
4	10	26337	1117	4,24	5,61	0,09	1,60
4	5	25263	1101	4,36	6,25	0,06	0,96
4	2	23701	1055	4,45	7,20	0,10	1,39
4	1	22435	1003	4,47	8,02	0,13	1,62
4	0,5	21114	964	4,57	8,91	0,23	2,58
4	0,2	19297	892	4,62	10,29	0,23	2,24
4	0,1	17903	768	4,29	11,44	0,27	2,36
4	0,01	13491	457	3,39	15,95	0,30	1,88
21	25	18129	2002	11,04	12,48	0,80	6,41
21	20	17620	1936	10,99	12,82	0,71	5,54
21	10	15981	1841	11,52	14,37	0,80	5,57
21	5	14335	1715	11,96	15,92	0,81	5,09
21	2	12178	1593	13,08	18,29	0,95	5,19
21	1	10607	1459	13,76	20,19	1,03	5,10
21	0,5	9109	1330	14,60	22,23	1,14	5,13
21	0,2	7217	946	13,11	25,02	1,17	4,68
21	0,1	5954	1008	16,93	27,19	1,25	4,60
21	0,01	2866	445	15,53	32,89	0,49	1,49
37	25	6011	468	7,79	32,75	0,39	1,19
37	20	5633	431	7,66	31,97	0,68	2,12
37	10	4282	327	7,65	34,02	0,80	2,35
37	5	3098	242	7,81	36,16	0,86	2,37
37	2	1936	159	8,22	38,30	0,80	2,09
37	1	1317	105	7,95	39,14	0,75	1,92
37	0,5	918	81	8,83	38,42	0,85	2,21
37	0,2	582	49	8,34	36,72	0,62	1,69
37	0,1	418	33	7,79	34,75	0,54	1,57
37	0,01	189	9	5,02	26,37	0,43	1,64
54	25	1330	1	0,11	38,80	1,21	3,12
54	20	1172	14	1,21	37,64	1,18	3,14
54	10	794	25	3,18	36,31	0,81	2,24
54	5	532	18	3,44	35,30	0,69	1,96
54	2	319	22	6,78	33,41	0,78	2,35
54	1	238	24	10,06	30,22	0,91	3,00
54	0,5	194	22	11,18	26,42	1,33	5,03
54	0,2	157	21	13,27	22,31	1,00	4,50
54	0,1	139	24	17,58	20,25	0,20	0,98
54	0,01	108	34	31,03	16,47	1,61	9,79

Tabela B.2 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura S BAI FX B 50/70

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	32656	1401	4,29	1,76	0,25	14,46
-10	20	32540	1295	3,98	1,90	0,16	8,19
-10	10	32074	1239	3,86	2,15	0,06	2,63
-10	5	31569	1184	3,75	2,38	0,09	3,87
-10	2	30797	1230	4,00	2,78	0,09	3,31
-10	1	30169	1204	3,99	3,10	0,12	3,88
-10	0,5	29456	1196	4,06	3,46	0,08	2,25
-10	0,2	28432	1161	4,08	3,96	0,04	1,07
-10	0,1	27623	1119	4,05	4,38	0,02	0,48
-10	0,01	24772	1204	4,86	5,96	0,02	0,36
4	25	26508	1574	5,94	4,50	0,52	11,63
4	20	26203	1567	5,98	4,66	0,54	11,53
4	10	25272	1507	5,96	5,26	0,50	9,55
4	5	24251	1432	5,90	5,86	0,56	9,54
4	2	22798	1278	5,60	6,76	0,62	9,20
4	1	21619	1154	5,34	7,53	0,70	9,30
4	0,5	20374	1047	5,14	8,41	0,71	8,41
4	0,2	18646	921	4,94	9,79	0,71	7,30
4	0,1	17305	846	4,89	10,82	0,88	8,10
4	0,01	13077	585	4,48	15,87	0,11	0,71
21	25	19687	185	0,94	10,42	0,06	0,54
21	20	19098	170	0,89	10,91	0,17	1,56
21	10	17421	141	0,81	12,33	0,25	2,01
21	5	15730	80	0,51	13,86	0,27	1,94
21	2	13538	29	0,21	16,16	0,59	3,63
21	1	11921	33	0,28	18,04	0,69	3,80
21	0,5	10330	95	0,92	20,09	0,67	3,34
21	0,2	8313	91	1,09	22,82	0,71	3,13
21	0,1	6877	99	1,44	24,89	0,75	3,01
21	0,01	3233	110	3,39	32,02	0,49	1,55
37	25	5944	154	2,59	33,06	0,52	1,56
37	20	5564	162	2,91	32,58	0,48	1,48
37	10	4218	182	4,33	34,85	0,67	1,93
37	5	3057	175	5,74	36,96	0,73	1,97
37	2	1915	139	7,24	38,81	0,64	1,64
37	1	1316	107	8,12	39,18	0,47	1,19
37	0,5	918	79	8,65	38,51	0,40	1,03
37	0,2	584	56	9,67	36,75	0,42	1,15
37	0,1	423	42	10,04	34,87	0,49	1,40
37	0,01	192	18	9,26	27,01	0,72	2,67
54	25	1141	151	13,21	40,75	0,57	1,39
54	20	1013	131	12,90	39,35	1,23	3,13
54	10	686	97	14,06	37,97	1,39	3,65
54	5	461	85	18,51	36,72	0,37	1,02
54	2	278	73	26,35	34,48	0,59	1,70
54	1	208	59	28,49	30,22	0,83	2,76
54	0,5	172	44	25,36	25,88	0,55	2,13
54	0,2	142	32	22,61	21,20	0,00	0,00
54	0,1	127	29	22,67	18,46	0,28	1,53
54	0,01	102	25	24,72	14,47	1,68	11,59

Tabela B.3 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura S CON FX C 50/70

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	32583	688	2,11	1,98	0,06	3,22
-10	20	32472	724	2,23	2,07	0,05	2,40
-10	10	32040	825	2,58	2,22	0,06	2,87
-10	5	31522	849	2,69	2,45	0,17	6,93
-10	2	30767	967	3,14	2,83	0,21	7,26
-10	1	30111	1045	3,47	3,14	0,30	9,46
-10	0,5	29411	1109	3,77	3,60	0,30	8,46
-10	0,2	28345	1197	4,22	4,08	0,39	9,54
-10	0,1	27456	1334	4,86	4,50	0,42	9,43
-10	0,01	24318	1246	5,12	6,30	0,52	8,20
4	25	25893	1167	4,51	4,86	0,13	2,62
4	20	25624	1206	4,71	5,08	0,09	1,81
4	10	24656	1148	4,66	5,67	0,04	0,62
4	5	23564	1095	4,65	6,32	0,06	1,01
4	2	22010	984	4,47	7,24	0,13	1,76
4	1	20761	872	4,20	8,09	0,19	2,36
4	0,5	19452	765	3,93	9,02	0,27	2,98
4	0,2	17690	608	3,44	10,39	0,42	4,08
4	0,1	16337	480	2,94	11,60	0,52	4,45
4	0,01	11993	455	3,79	16,58	0,72	4,35
21	25	15096	132	0,88	13,46	0,78	5,83
21	20	14693	55	0,38	13,92	0,71	5,08
21	10	13259	88	0,66	15,66	0,74	4,70
21	5	11765	87	0,74	17,58	0,75	4,26
21	2	9837	82	0,83	20,24	0,80	3,95
21	1	8468	71	0,84	22,33	0,83	3,74
21	0,5	7143	71	1,00	24,53	0,86	3,52
21	0,2	5529	84	1,52	27,46	0,95	3,48
21	0,1	4438	93	2,10	29,52	0,98	3,33
21	0,01	1865	175	9,40	35,08	1,27	3,61
37	25	5414	385	7,11	34,09	0,50	1,47
37	20	5019	324	6,45	33,82	0,25	0,75
37	10	3770	296	7,84	35,98	0,05	0,14
37	5	2718	253	9,31	38,08	0,06	0,15
37	2	1699	190	11,20	39,86	0,16	0,39
37	1	1176	146	12,45	39,98	0,45	1,13
37	0,5	836	120	14,32	38,70	0,39	1,01
37	0,2	550	89	16,22	36,02	0,16	0,43
37	0,1	413	76	18,44	33,54	0,03	0,08
37	0,01	210	56	26,43	24,49	0,84	3,44
54	25	1397	260	18,58	40,87	3,66	8,95
54	20	1244	241	19,39	39,26	2,60	6,61
54	10	849	164	19,27	38,09	2,09	5,48
54	5	568	99	17,34	37,19	1,53	4,11
54	2	345	59	17,19	35,33	1,51	4,28
54	1	256	41	16,18	31,80	0,83	2,60
54	0,5	204	29	14,30	28,01	0,40	1,44
54	0,2	160	20	12,62	22,99	0,74	3,20
54	0,1	139	21	14,89	19,84	1,29	6,49
54	0,01	94	51	54,38	24,98	19,73	78,98

Tabela B.4 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura S BAI FX C 50/70

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	33253	595	1,79	1,63	0,15	9,14
-10	20	32977	679	2,06	1,71	0,21	12,03
-10	10	32531	629	1,93	1,95	0,22	11,27
-10	5	31996	552	1,73	2,20	0,25	11,57
-10	2	31250	469	1,50	2,55	0,33	13,06
-10	1	30594	354	1,16	2,88	0,28	9,59
-10	0,5	29905	286	0,96	3,22	0,34	10,54
-10	0,2	28840	149	0,52	3,77	0,45	12,00
-10	0,1	27996	59	0,21	4,22	0,42	10,05
-10	0,01	25174	78	0,31	5,92	0,64	10,88
4	25	26112	151	0,58	4,31	0,98	22,64
4	20	26264	568	2,16	5,26	0,23	4,30
4	10	25217	641	2,54	6,12	0,13	2,20
4	5	24023	665	2,77	6,82	0,14	2,07
4	2	22312	672	3,01	7,92	0,19	2,41
4	1	20920	697	3,33	8,89	0,21	2,31
4	0,5	19477	682	3,50	9,94	0,21	2,06
4	0,2	17508	664	3,79	11,43	0,08	0,68
4	0,1	16030	554	3,45	12,76	0,43	3,38
4	0,01	11685	39	0,33	17,50	0,04	0,24
21	25	17402	563	3,23	12,42	0,82	6,60
21	20	16897	587	3,47	13,04	0,57	4,34
21	10	15249	602	3,95	14,64	0,63	4,30
21	5	13604	585	4,30	16,43	0,68	4,13
21	2	11479	581	5,06	19,01	0,70	3,68
21	1	9964	590	5,93	21,09	0,70	3,32
21	0,5	8497	554	6,52	23,21	0,75	3,23
21	0,2	6690	481	7,19	26,17	0,80	3,05
21	0,1	5451	402	7,37	28,26	0,69	2,45
21	0,01	2365	183	7,75	34,06	0,43	1,27
37	25	4907	216	4,40	34,81	0,08	0,24
37	20	4337	156	3,60	34,36	0,43	1,26
37	10	3444	184	5,34	36,52	0,79	2,17
37	5	2483	161	6,49	38,66	1,18	3,05
37	2	1538	109	7,08	40,83	2,00	4,90
37	1	1049	62	5,87	41,47	2,72	6,57
37	0,5	730	41	5,56	40,75	3,09	7,58
37	0,2	463	13	2,86	38,69	3,25	8,41
37	0,1	331	3	0,96	36,43	3,14	8,62
37	0,01	192	53	27,77	34,26	11,77	34,34
54	25	465	142	30,57	40,55	3,31	8,16
54	20	1030	127	12,29	39,06	3,02	7,73
54	10	708	74	10,42	36,79	2,77	7,53
54	5	478	42	8,73	35,24	2,92	8,29
54	2	289	16	5,69	33,07	3,03	9,17
54	1	219	6	2,80	29,37	3,03	10,33
54	0,5	180	1	0,51	25,50	2,92	11,45
54	0,2	146	1	0,92	21,57	2,57	11,90
54	0,1	128	1	1,05	19,15	1,20	6,28
54	0,01	102	5	5,32	13,94	1,09	7,81

Tabela B.5 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura M CON FX B 50/70

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	33443	479	1,43	1,58	0,01	0,90
-10	20	33316	476	1,43	1,69	0,04	2,10
-10	10	32892	457	1,39	1,87	0,01	0,76
-10	5	32384	436	1,35	2,13	0,04	1,99
-10	2	31614	415	1,31	2,47	0,11	4,58
-10	1	30964	398	1,29	2,83	0,09	3,25
-10	0,5	30247	351	1,16	3,17	0,13	4,02
-10	0,2	29211	305	1,05	3,69	0,14	3,83
-10	0,1	28334	245	0,86	4,12	0,11	2,75
-10	0,01	25088	234	0,93	5,90	0,11	1,92
4	25	27765	942	3,39	4,72	0,20	4,19
4	20	27385	942	3,44	4,87	0,11	2,32
4	10	26351	892	3,38	5,38	0,09	1,71
4	5	25236	844	3,34	5,99	0,10	1,65
4	2	23648	773	3,27	6,90	0,13	1,95
4	1	22340	721	3,23	7,69	0,11	1,38
4	0,5	20958	654	3,12	8,61	0,14	1,64
4	0,2	19022	573	3,01	10,01	0,15	1,48
4	0,1	17456	526	3,01	11,18	0,20	1,77
4	0,01	12136	417	3,44	17,01	0,12	0,71
21	25	15521	777	5,01	12,52	0,42	3,39
21	20	15045	666	4,43	13,21	0,30	2,30
21	10	13594	571	4,20	14,30	0,20	1,38
21	5	12124	511	4,21	16,00	0,13	0,84
21	2	10212	407	3,99	18,47	0,12	0,65
21	1	8840	344	3,90	20,48	0,00	0,00
21	0,5	7541	288	3,83	22,51	0,04	0,19
21	0,2	5945	230	3,87	25,47	0,20	0,78
21	0,1	4859	182	3,74	27,51	0,12	0,44
21	0,01	2095	98	4,66	33,99	0,69	2,02
37	25	4113	389	9,46	35,22	0,96	2,73
37	20	3798	333	8,77	34,61	0,38	1,10
37	10	2829	275	9,72	36,33	0,09	0,25
37	5	2019	232	11,49	38,01	0,07	0,19
37	2	1242	176	14,18	39,62	0,20	0,50
37	1	847	136	16,09	39,61	0,34	0,86
37	0,5	591	106	18,03	38,46	0,35	0,92
37	0,2	377	74	19,68	36,05	0,82	2,28
37	0,1	275	56	20,51	33,48	1,17	3,51
37	0,01	132	25	19,07	24,93	1,46	5,87
54	25	760	38	4,98	43,16	5,25	12,17
54	20	683	32	4,68	41,70	5,43	13,02
54	10	486	17	3,44	38,31	5,54	14,45
54	5	338	4	1,11	35,78	5,08	14,21
54	2	211	7	3,35	32,72	4,39	13,42
54	1	170	5	3,20	26,88	2,55	9,50
54	0,5	147	0	0,05	22,14	2,54	11,47
54	0,2	128	7	5,69	16,57	0,29	1,75
54	0,1	116	9	7,63	13,61	1,92	14,08
54	0,01	97	22	23,01	7,37	3,39	45,99

Tabela B.6 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura M BAI FX B 50/70

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	33293	1567	4,71	1,57	0,16	10,39
-10	20	33130	1400	4,23	1,63	0,11	6,94
-10	10	32731	1313	4,01	1,87	0,11	6,05
-10	5	32237	1329	4,12	2,09	0,06	3,05
-10	2	31494	1325	4,21	2,47	0,10	4,01
-10	1	30832	1263	4,10	2,80	0,04	1,52
-10	0,5	30125	1239	4,11	3,18	0,01	0,22
-10	0,2	29106	1246	4,28	3,67	0,06	1,74
-10	0,1	28244	1210	4,28	4,16	0,06	1,36
-10	0,01	24971	1119	4,48	5,77	0,52	9,07
4	25	27170	194	0,72	4,77	0,18	3,85
4	20	27001	306	1,13	5,11	0,41	8,03
4	10	25966	235	0,90	5,74	0,51	8,87
4	5	24828	125	0,50	6,37	0,52	8,21
4	2	23186	6	0,02	7,38	0,59	7,96
4	1	21829	110	0,50	8,29	0,66	8,02
4	0,5	20426	209	1,02	9,25	0,69	7,49
4	0,2	18472	274	1,48	10,79	0,75	6,95
4	0,1	16910	239	1,41	12,11	0,69	5,67
4	0,01	11718	223	1,91	18,02	0,15	0,82
21	25	16891	501	2,97	13,09	0,08	0,65
21	20	16306	431	2,64	13,60	0,20	1,46
21	10	14642	403	2,75	15,26	0,28	1,81
21	5	12955	352	2,72	17,16	0,40	2,35
21	2	10857	315	2,90	19,87	0,52	2,60
21	1	9317	279	2,99	21,97	0,62	2,83
21	0,5	7893	255	3,23	24,10	0,71	2,93
21	0,2	6168	232	3,76	27,08	0,81	3,00
21	0,1	4998	217	4,34	29,11	0,88	3,04
21	0,01	2061	174	8,44	34,64	0,25	0,71
37	25	4142	238	5,75	35,86	0,11	0,30
37	20	3835	195	5,09	35,11	0,22	0,62
37	10	2938	30	1,01	36,97	0,08	0,21
37	5	2208	137	6,21	38,55	0,18	0,46
37	2	1278	5	0,39	39,52	1,16	2,93
37	1	809	82	10,19	40,18	0,60	1,50
37	0,5	556	57	10,34	39,37	0,70	1,78
37	0,2	352	38	10,84	37,23	1,22	3,27
37	0,1	255	28	10,91	35,13	1,65	4,69
37	0,01	115	4	3,89	28,39	4,28	15,07
54	25	859	145	16,94	40,99	1,07	2,62
54	20	767	132	17,16	39,63	1,01	2,55
54	10	527	94	17,86	37,09	0,55	1,49
54	5	356	64	18,04	34,88	0,66	1,91
54	2	213	36	16,99	31,92	0,40	1,24
54	1	168	29	17,14	26,45	0,69	2,62
54	0,5	142	25	17,42	21,62	1,31	6,05
54	0,2	119	26	21,46	14,54	5,22	35,89
54	0,1	99	41	41,05	18,34	3,54	19,28
54	0,01	96	18	18,75	23,62	15,76	66,74

Tabela B.7 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura M CON FX C 50/70

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	32492	790	2,43	1,38	0,05	3,60
-10	20	32411	889	2,74	1,50	0,07	4,71
-10	10	32005	928	2,90	1,84	0,04	2,31
-10	5	31500	922	2,93	2,08	0,04	1,70
-10	2	30731	886	2,88	2,45	0,04	1,45
-10	1	30082	879	2,92	2,81	0,02	0,76
-10	0,5	29357	844	2,88	3,19	0,02	0,67
-10	0,2	28316	856	3,02	3,73	0,05	1,33
-10	0,1	27432	750	2,73	4,20	0,04	0,84
-10	0,01	24180	684	2,83	6,04	0,23	3,87
4	25	24916	964	3,87	5,61	0,03	0,50
4	20	24564	930	3,79	5,68	0,08	1,49
4	10	23473	914	3,89	6,49	0,13	2,07
4	5	22294	918	4,12	7,19	0,01	0,20
4	2	20652	854	4,14	8,36	0,01	0,08
4	1	19317	829	4,29	9,33	0,04	0,38
4	0,5	17939	785	4,38	10,43	0,08	0,75
4	0,2	16070	680	4,23	12,08	0,09	0,76
4	0,1	14630	569	3,89	13,48	0,13	1,00
4	0,01	10208	274	2,69	19,01	0,45	2,34
21	25	15560	713	4,58	13,45	0,66	4,94
21	20	15026	696	4,63	14,00	0,60	4,29
21	10	13452	630	4,68	15,60	0,59	3,81
21	5	11894	615	5,17	17,51	0,56	3,19
21	2	9913	535	5,39	20,19	0,46	2,28
21	1	8481	486	5,74	22,23	0,42	1,88
21	0,5	7155	429	6,00	24,38	0,32	1,31
21	0,2	5543	337	6,09	27,31	0,23	0,85
21	0,1	4439	254	5,72	29,49	0,02	0,07
21	0,01	1751	71	4,08	34,86	0,81	2,31
37	25	3523	32	0,90	35,85	0,68	1,89
37	20	3262	30	0,93	35,33	0,45	1,28
37	10	2409	7	0,29	37,05	0,53	1,43
37	5	1700	28	1,62	38,76	0,69	1,77
37	2	1031	43	4,19	40,40	0,93	2,29
37	1	701	42	5,99	40,39	1,12	2,78
37	0,5	486	37	7,58	39,48	1,41	3,56
37	0,2	308	31	10,11	37,05	1,40	3,78
37	0,1	225	25	11,05	34,63	1,44	4,17
37	0,01	108	15	13,55	25,98	0,90	3,46
54	25	687	38	5,49	41,53	2,27	5,47
54	20	610	38	6,17	40,03	2,25	5,62
54	10	425	39	9,11	37,35	2,79	7,48
54	5	291	37	12,75	35,29	3,61	10,24
54	2	179	31	17,52	32,59	4,67	14,32
54	1	144	29	20,40	27,66	4,36	15,75
54	0,5	123	31	25,63	23,76	4,90	20,63
54	0,2	105	34	32,47	19,37	5,01	25,85
54	0,1	97	36	37,30	16,72	3,74	22,38
54	0,01	83	40	47,71	10,85	0,55	5,08

Tabela B.8 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura M BAI FX C 50/70

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	33643	1933	5,75	1,43	0,19	13,40
-10	20	33634	1843	5,48	1,52	0,06	3,72
-10	10	33247	1807	5,44	1,74	0,07	4,06
-10	5	32780	1776	5,42	1,97	0,02	1,08
-10	2	32072	1744	5,44	2,31	0,01	0,31
-10	1	31502	1669	5,30	2,61	0,04	1,36
-10	0,5	30826	1620	5,26	2,92	0,09	3,15
-10	0,2	29824	1577	5,29	3,43	0,04	1,03
-10	0,1	28883	1659	5,74	3,85	0,07	1,84
-10	0,01	25675	1487	5,79	5,53	0,04	0,64
4	25	28543	569	1,99	4,87	0,63	12,94
4	20	28172	450	1,60	5,08	0,62	12,12
4	10	27026	295	1,09	5,76	0,71	12,28
4	5	25785	89	0,35	6,46	0,80	12,38
4	2	24040	160	0,66	7,49	0,93	12,46
4	1	22616	321	1,42	8,35	1,04	12,46
4	0,5	21126	477	2,26	9,35	1,18	12,64
4	0,2	19077	653	3,42	10,89	1,34	12,28
4	0,1	17463	663	3,80	12,20	1,34	11,01
4	0,01	12096	260	2,15	17,89	0,96	5,38
21	25	17783	18	0,10	12,80	0,54	4,26
21	20	17202	21	0,12	13,23	0,61	4,60
21	10	15491	195	1,26	14,79	0,66	4,49
21	5	13791	345	2,50	16,53	0,73	4,41
21	2	11626	427	3,67	19,01	0,88	4,61
21	1	10044	512	5,10	21,04	0,90	4,27
21	0,5	8556	516	6,03	23,06	0,86	3,74
21	0,2	6751	506	7,49	25,89	0,88	3,39
21	0,1	5496	496	9,02	27,90	0,89	3,19
21	0,01	2349	279	11,86	33,89	0,90	2,65
37	25	4420	53	1,20	35,09	0,46	1,31
37	20	4107	56	1,36	34,28	0,67	1,96
37	10	3056	70	2,29	35,81	0,88	2,47
37	5	2177	65	2,99	37,27	1,09	2,92
37	2	1342	46	3,43	38,40	1,25	3,26
37	1	920	27	2,88	38,14	1,32	3,47
37	0,5	644	23	3,61	36,87	1,62	4,39
37	0,2	414	13	3,23	34,55	1,60	4,63
37	0,1	301	7	2,44	32,45	1,57	4,84
37	0,01	142	4	2,88	24,74	1,22	4,92
54	25	465	2	0,44	39,74	0,78	1,96
54	20	762	13	1,76	37,98	0,35	0,91
54	10	537	16	2,95	35,25	0,20	0,56
54	5	364	14	3,73	33,48	0,45	1,35
54	2	212	5	2,13	31,95	0,04	0,11
54	1	156	3	2,08	28,81	1,07	3,73
54	0,5	124	9	7,64	26,09	1,99	7,64
54	0,2	96	13	13,86	23,04	2,21	9,58
54	0,1	82	14	17,62	20,88	2,29	10,97
54	0,01	60	18	30,41	16,78	1,59	9,48

Tabela B.9 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura S CON FX B 60/85

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	32256	1259	3,90	1,73	0,21	12,26
-10	20	32055	1198	3,74	1,91	0,30	15,96
-10	10	31602	1264	4,00	2,08	0,23	10,88
-10	5	31099	1334	4,29	2,31	0,30	13,19
-10	2	30351	1404	4,63	2,66	0,33	12,52
-10	1	29723	1504	5,06	2,95	0,36	12,25
-10	0,5	29043	1564	5,39	3,29	0,36	10,98
-10	0,2	28053	1626	5,80	3,75	0,48	12,82
-10	0,1	27210	1685	6,19	4,11	0,44	10,67
-10	0,01	24233	1239	5,11	5,45	0,36	6,62
4	25	27767	435	1,57	4,37	0,21	4,70
4	20	27391	268	0,98	4,66	0,07	1,52
4	10	26417	262	0,99	5,13	0,29	5,66
4	5	25312	223	0,88	5,76	0,25	4,30
4	2	23774	163	0,69	6,58	0,23	3,55
4	1	22532	103	0,46	7,27	0,25	3,50
4	0,5	21231	62	0,29	8,04	0,35	4,40
4	0,2	19435	12	0,06	9,20	0,38	4,15
4	0,1	18018	56	0,31	10,21	0,41	4,02
4	0,01	13408	382	2,85	14,38	1,04	7,23
21	25	16570	388	2,34	11,96	0,57	4,73
21	20	16174	494	3,06	12,40	0,63	5,08
21	10	14716	542	3,69	13,71	0,88	6,45
21	5	13259	569	4,29	15,17	1,02	6,71
21	2	11393	593	5,20	17,32	1,29	7,43
21	1	10014	598	5,97	19,00	1,38	7,26
21	0,5	8698	572	6,58	20,68	1,42	6,87
21	0,2	7050	524	7,43	23,01	1,36	5,90
21	0,1	5904	447	7,57	24,72	1,17	4,72
21	0,01	2915	163	5,58	30,08	0,66	2,21
37	25	5510	429	7,79	30,24	0,51	1,68
37	20	5204	424	8,14	30,15	0,40	1,34
37	10	4103	271	6,60	31,32	0,24	0,77
37	5	3173	174	5,48	32,61	0,31	0,95
37	2	2169	50	2,32	33,57	0,81	2,40
37	1	1614	17	1,05	33,73	0,99	2,93
37	0,5	1216	11	0,93	33,21	1,45	4,37
37	0,2	849	20	2,32	32,04	2,09	6,53
37	0,1	657	25	3,85	30,89	2,57	8,33
37	0,01	328	37	11,39	26,71	4,25	15,91
54	25	1462	307	20,99	36,82	0,63	1,71
54	20	1346	276	20,55	35,32	0,74	2,10
54	10	988	211	21,40	34,21	0,99	2,89
54	5	712	159	22,33	33,34	1,16	3,48
54	2	472	105	22,17	32,01	1,06	3,31
54	1	370	79	21,27	30,40	0,21	0,70
54	0,5	306	70	22,77	27,71	1,13	4,08
54	0,2	242	56	23,27	25,16	1,34	5,34
54	0,1	205	49	24,06	23,40	1,71	7,31
54	0,01	138	37	27,12	16,58	1,30	7,85

Tabela B.10 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura S BAI FX B 60/85

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	29695	917	3,09	1,61	0,43	26,87
-10	20	29526	877	2,97	1,81	0,25	14,06
-10	10	29163	911	3,13	2,01	0,28	14,07
-10	5	28703	902	3,14	2,23	0,32	14,30
-10	2	28060	932	3,32	2,64	0,28	10,47
-10	1	27504	950	3,45	2,94	0,21	7,22
-10	0,5	26894	934	3,47	3,27	0,30	9,31
-10	0,2	25995	925	3,56	3,69	0,37	9,96
-10	0,1	25299	856	3,38	3,91	0,52	13,38
-10	0,01	22905	663	2,90	5,78	0,36	6,24
4	25	25366	1182	4,66	4,77	0,68	14,23
4	20	25114	1129	4,49	5,21	0,86	16,56
4	10	24233	915	3,78	5,50	0,71	13,00
4	5	23266	723	3,11	6,07	0,84	13,87
4	2	21892	448	2,05	6,87	0,95	13,91
4	1	20779	245	1,18	7,56	1,12	14,78
4	0,5	19618	35	0,18	8,36	1,24	14,81
4	0,2	18017	205	1,14	9,51	1,47	15,47
4	0,1	16821	340	2,02	10,48	1,54	14,71
4	0,01	12726	887	6,97	14,53	2,23	15,38
21	25	16483	287	1,74	10,17	1,94	19,05
21	20	16263	6	0,04	11,09	1,35	12,18
21	10	14916	119	0,80	12,86	0,65	5,06
21	5	13509	199	1,47	14,35	0,74	5,12
21	2	11652	314	2,69	16,50	0,91	5,49
21	1	10268	353	3,44	18,26	1,03	5,62
21	0,5	8937	381	4,26	20,07	1,13	5,64
21	0,2	7263	425	5,85	22,63	1,26	5,56
21	0,1	6096	433	7,11	24,52	1,27	5,16
21	0,01	2976	503	16,90	29,97	0,87	2,90
37	25	5342	249	4,66	30,72	1,86	6,05
37	20	5100	202	3,97	30,12	1,65	5,47
37	10	4027	80	1,98	31,71	1,73	5,46
37	5	3095	4	0,11	33,09	1,76	5,32
37	2	2119	47	2,24	34,27	1,68	4,91
37	1	1543	88	5,68	34,42	1,22	3,55
37	0,5	1168	77	6,60	33,51	0,86	2,55
37	0,2	808	55	6,81	32,27	0,32	0,99
37	0,1	622	38	6,15	31,02	0,11	0,34
37	0,01	297	6	2,12	26,91	1,38	5,12
54	25	1373	37	2,73	37,62	1,26	3,35
54	20	1272	54	4,28	36,15	1,32	3,64
54	10	958	39	4,05	34,59	0,39	1,12
54	5	700	31	4,48	33,35	0,11	0,32
54	2	463	11	2,45	31,69	1,00	3,15
54	1	351	19	5,37	30,82	0,57	1,86
54	0,5	289	11	3,96	27,83	0,37	1,35
54	0,2	231	4	1,53	24,68	1,47	5,96
54	0,1	200	3	1,41	23,16	1,15	4,95
54	0,01	187	64	34,08	17,04	2,57	15,10

Tabela B.11 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura S CON FX C 60/85

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	29091	208	0,71	2,09	0,08	4,06
-10	20	29034	249	0,86	2,10	0,05	2,36
-10	10	28586	330	1,16	2,33	0,06	2,43
-10	5	28097	348	1,24	2,62	0,06	2,43
-10	2	27345	380	1,39	3,02	0,01	0,47
-10	1	26700	398	1,49	3,36	0,01	0,21
-10	0,5	26011	413	1,59	3,71	0,03	0,76
-10	0,2	25009	420	1,68	4,24	0,03	0,67
-10	0,1	24190	462	1,91	4,64	0,03	0,61
-10	0,01	21351	607	2,84	6,18	0,07	1,14
4	25	23682	700	2,96	5,38	0,69	12,76
4	20	23332	654	2,80	5,63	0,49	8,79
4	10	22297	622	2,79	6,21	0,55	8,88
4	5	21199	653	3,08	6,86	0,69	10,10
4	2	19679	668	3,39	7,82	0,70	8,96
4	1	18462	679	3,68	8,62	0,76	8,78
4	0,5	17236	691	4,01	9,53	0,85	8,90
4	0,2	15540	679	4,37	10,90	0,95	8,76
4	0,1	14263	668	4,68	11,99	0,99	8,26
4	0,01	10644	462	4,34	16,30	1,57	9,63
21	25	15713	692	4,41	11,06	0,03	0,26
21	20	15332	768	5,01	11,62	0,21	1,77
21	10	13996	827	5,91	13,33	0,48	3,61
21	5	12603	827	6,56	14,89	0,45	3,04
21	2	10818	857	7,92	17,13	0,41	2,39
21	1	9529	828	8,69	18,96	0,32	1,68
21	0,5	8275	798	9,65	20,92	0,21	0,98
21	0,2	6714	724	10,78	23,62	0,06	0,24
21	0,1	5607	663	11,82	25,59	0,11	0,41
21	0,01	2657	361	13,57	29,88	1,07	3,57
37	25	4714	681	14,45	31,20	1,44	4,62
37	20	4447	680	15,28	30,89	1,56	5,04
37	10	3507	610	17,38	32,45	1,75	5,38
37	5	2701	544	20,14	33,56	1,79	5,33
37	2	1858	434	23,37	34,49	1,75	5,08
37	1	1394	344	24,71	34,51	1,55	4,49
37	0,5	1053	260	24,74	33,92	1,09	3,21
37	0,2	727	175	24,06	32,79	0,57	1,73
37	0,1	557	125	22,49	31,63	0,02	0,07
37	0,01	264	37	13,99	27,40	0,71	2,58
54	25	1408	5	0,35	36,57	1,36	3,71
54	20	1308	1	0,05	35,15	1,27	3,62
54	10	980	8	0,83	33,85	1,54	4,55
54	5	724	19	2,61	32,82	1,97	6,01
54	2	482	22	4,47	31,73	2,42	7,62
54	1	381	22	5,88	29,42	2,72	9,26
54	0,5	314	27	8,68	27,14	2,91	10,73
54	0,2	250	31	12,30	24,73	3,05	12,35
54	0,1	214	30	13,93	23,12	2,71	11,72
54	0,01	139	29	21,16	18,88	1,57	8,31

Tabela B.12 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura S BAI FX C 60/85

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	33885	4075	12,03	2,09	0,52	24,76
-10	20	33684	4026	11,95	2,11	0,52	24,80
-10	10	33184	4089	12,32	2,35	0,61	25,88
-10	5	32608	4157	12,75	2,60	0,63	24,25
-10	2	31753	4241	13,36	2,96	0,69	23,21
-10	1	31016	4296	13,85	3,24	0,71	21,82
-10	0,5	30221	4344	14,38	3,64	0,81	22,37
-10	0,2	29042	4305	14,82	4,07	0,89	21,89
-10	0,1	28128	4337	15,42	4,49	0,95	21,28
-10	0,01	25673	4933	19,21	5,78	1,27	22,02
4	25	28125	2133	7,59	4,55	0,21	4,51
4	20	27740	2082	7,50	4,71	0,21	4,36
4	10	26707	1931	7,23	5,19	0,37	7,08
4	5	25567	1748	6,84	5,71	0,39	6,82
4	2	24016	1517	6,32	6,47	0,49	7,55
4	1	22781	1301	5,71	7,10	0,54	7,67
4	0,5	21529	1124	5,22	7,81	0,59	7,52
4	0,2	19822	880	4,44	8,82	0,57	6,50
4	0,1	18534	732	3,95	9,64	0,55	5,72
4	0,01	14359	825	5,75	12,88	0,33	2,53
21	25	17654	108	0,61	10,66	0,18	1,66
21	20	17166	102	0,59	10,98	0,16	1,48
21	10	15776	103	0,65	12,11	0,16	1,28
21	5	14340	152	1,06	13,47	0,18	1,31
21	2	12448	176	1,41	15,42	0,25	1,61
21	1	11087	175	1,58	17,02	0,30	1,74
21	0,5	9738	148	1,52	18,64	0,25	1,37
21	0,2	8040	157	1,95	21,01	0,25	1,21
21	0,1	6818	170	2,50	22,81	0,11	0,47
21	0,01	3424	293	8,57	27,80	0,01	0,03
37	25	5422	396	7,30	28,77	0,93	3,24
37	20	5168	376	7,28	28,46	0,93	3,28
37	10	4142	353	8,52	30,01	0,93	3,11
37	5	3232	323	10,00	31,39	0,87	2,77
37	2	2263	267	11,78	32,71	0,74	2,25
37	1	1653	156	9,41	35,62	2,96	8,30
37	0,5	1279	164	12,83	32,96	0,18	0,56
37	0,2	884	116	13,14	32,18	0,06	0,20
37	0,1	674	90	13,36	31,32	0,21	0,65
37	0,01	307	35	11,56	28,31	0,66	2,32
54	25	1730	150	8,67	35,67	1,29	3,61
54	20	1619	150	9,26	34,50	1,98	5,74
54	10	1211	126	10,39	33,67	2,16	6,41
54	5	895	99	11,12	33,08	2,28	6,88
54	2	597	69	11,61	31,91	2,18	6,83
54	1	465	49	10,56	29,86	1,82	6,11
54	0,5	377	39	10,43	27,66	1,70	6,14
54	0,2	292	26	9,05	24,97	1,58	6,32
54	0,1	246	18	7,23	23,69	1,03	4,33
54	0,01	154	13	8,21	21,45	2,44	11,38

Tabela B.13 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura M CON FX B 60/85

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	33691	1577	4,68	1,78	0,04	1,99
-10	20	33618	1571	4,67	1,84	0,05	2,70
-10	10	33231	1601	4,82	2,06	0,11	5,16
-10	5	32724	1580	4,83	2,30	0,07	3,07
-10	2	31936	1507	4,72	2,66	0,08	3,19
-10	1	31258	1438	4,60	3,02	0,11	3,75
-10	0,5	30530	1377	4,51	3,41	0,09	2,70
-10	0,2	29426	1285	4,37	3,99	0,16	4,08
-10	0,1	28520	1250	4,38	4,42	0,09	2,08
-10	0,01	25007	1066	4,26	6,29	0,01	0,11
4	25	25854	823	3,18	5,60	0,24	4,29
4	20	25477	815	3,20	5,88	0,16	2,77
4	10	24314	759	3,12	6,56	0,04	0,54
4	5	23045	731	3,17	7,31	0,00	0,00
4	2	21255	684	3,22	8,45	0,05	0,59
4	1	19807	617	3,12	9,43	0,11	1,20
4	0,5	18320	542	2,96	10,55	0,09	0,87
4	0,2	16300	480	2,95	12,19	0,11	0,93
4	0,1	14770	510	3,45	13,60	0,15	1,09
4	0,01	10190	216	2,12	19,05	0,27	1,41
21	25	17432	1276	7,32	12,10	0,13	1,05
21	20	16881	1264	7,49	12,50	0,02	0,17
21	10	15295	1176	7,69	13,90	0,03	0,20
21	5	13689	1056	7,71	14,98	0,62	4,11
21	2	11589	932	8,04	17,73	0,14	0,80
21	1	10072	841	8,35	19,55	0,21	1,05
21	0,5	8636	721	8,34	21,45	0,32	1,48
21	0,2	6860	585	8,53	24,12	0,33	1,38
21	0,1	5610	418	7,45	26,06	0,47	1,82
21	0,01	2340	160	6,83	31,80	0,90	2,82
37	25	3855	124	3,23	33,50	0,33	0,99
37	20	3570	134	3,76	33,12	0,29	0,88
37	10	2690	122	4,55	34,23	0,46	1,34
37	5	1979	88	4,43	35,07	0,71	2,02
37	2	1299	44	3,37	35,40	1,14	3,22
37	1	952	21	2,24	34,56	1,57	4,54
37	0,5	715	3	0,38	33,12	1,92	5,81
37	0,2	507	10	1,97	30,90	2,23	7,21
37	0,1	402	17	4,24	29,00	2,24	7,73
37	0,01	223	24	10,80	23,70	2,23	9,43
54	25	1070	69	6,48	33,61	0,47	1,41
54	20	989	61	6,20	32,23	0,61	1,89
54	10	749	46	6,14	30,23	0,72	2,39
54	5	559	40	7,18	28,92	0,70	2,42
54	2	378	30	7,94	27,52	0,40	1,44
54	1	311	26	8,37	24,82	0,31	1,25
54	0,5	269	23	8,39	22,32	0,28	1,24
54	0,2	231	18	7,91	18,41	1,15	6,26
54	0,1	207	23	11,05	18,10	0,78	4,30
54	0,01	154	17	10,95	15,16	0,37	2,43

Tabela B.14 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura M BAI FX B 60/85

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	32668	2355	7,21	1,53	0,30	19,41
-10	20	32575	2412	7,40	1,72	0,11	6,18
-10	10	32189	2420	7,52	1,94	0,08	4,37
-10	5	31707	2423	7,64	2,19	0,09	4,21
-10	2	30973	2401	7,75	2,58	0,03	1,10
-10	1	30347	2333	7,69	2,89	0,06	2,21
-10	0,5	29643	2314	7,81	3,28	0,08	2,38
-10	0,2	28609	2264	7,91	3,81	0,11	2,79
-10	0,1	27736	2208	7,96	4,22	0,13	3,19
-10	0,01	24399	1985	8,14	6,23	0,01	0,11
4	25	26321	3259	12,38	4,92	0,36	7,34
4	20	26047	3209	12,32	5,12	0,30	5,80
4	10	25035	3095	12,36	5,73	0,27	4,69
4	5	23922	3010	12,58	6,43	0,22	3,41
4	2	22306	2882	12,92	7,46	0,24	3,22
4	1	21016	2759	13,13	8,33	0,33	3,90
4	0,5	19673	2608	13,26	9,32	0,35	3,72
4	0,2	17794	2383	13,39	10,80	0,37	3,40
4	0,1	16300	2252	13,82	12,05	0,34	2,82
4	0,01	11564	1872	16,19	17,17	1,02	5,93
21	25	17302	116	0,67	11,35	0,84	7,42
21	20	16752	185	1,11	11,77	0,85	7,21
21	10	15226	297	1,95	13,16	1,10	8,38
21	5	13740	412	3,00	14,69	1,38	9,39
21	2	11798	574	4,87	16,92	1,75	10,36
21	1	10360	636	6,14	18,74	1,94	10,34
21	0,5	8979	708	7,88	20,60	2,16	10,50
21	0,2	7269	770	10,59	23,16	2,35	10,17
21	0,1	6099	770	12,63	24,97	2,44	9,77
21	0,01	3026	572	18,91	30,26	2,06	6,82
37	25	4149	781	18,83	32,30	3,24	10,03
37	20	3868	785	20,29	32,06	3,32	10,37
37	10	2974	697	23,42	33,35	3,61	10,81
37	5	2228	585	26,25	34,29	3,49	10,17
37	2	1491	435	29,18	34,75	3,13	8,99
37	1	1104	326	29,53	34,06	2,26	6,64
37	0,5	833	244	29,32	32,70	1,40	4,28
37	0,2	589	158	26,91	30,60	0,47	1,53
37	0,1	462	112	24,30	28,76	0,27	0,93
37	0,01	249	36	14,58	23,58	1,29	5,46
54	25	1246	304	24,40	33,66	0,36	1,07
54	20	1145	280	24,49	32,40	0,03	0,09
54	10	863	204	23,66	30,78	0,52	1,68
54	5	638	141	22,12	29,41	0,83	2,81
54	2	430	92	21,50	27,97	0,96	3,44
54	1	351	67	19,08	25,36	1,08	4,27
54	0,5	239	36	15,08	22,13	0,00	0,00
54	0,2	267	59	22,12	19,83	0,00	0,00
54	0,1	242	58	23,82	18,18	0,00	0,00
54	0,01	179	50	27,97	17,36	0,00	0,00

Tabela B.15 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura M CON FX C 60/85

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	33707	465	1,38	1,78	0,05	2,79
-10	20	33509	361	1,08	1,89	0,06	2,99
-10	10	33012	354	1,07	2,17	0,06	2,94
-10	5	32421	375	1,16	2,44	0,04	1,45
-10	2	31547	361	1,14	2,83	0,07	2,50
-10	1	30819	386	1,25	3,24	0,04	1,09
-10	0,5	30017	384	1,28	3,61	0,09	2,55
-10	0,2	28868	377	1,31	4,16	0,13	3,23
-10	0,1	27930	426	1,53	4,63	0,22	4,74
-10	0,01	24392	577	2,37	6,86	0,30	4,33
4	25	26837	1269	4,73	5,44	0,56	10,28
4	20	26509	1171	4,42	5,59	0,55	9,87
4	10	25366	1203	4,74	6,22	0,50	8,08
4	5	24101	1237	5,13	6,90	0,57	8,20
4	2	22348	1305	5,84	7,91	0,64	8,05
4	1	20930	1336	6,39	8,77	0,69	7,90
4	0,5	19468	1358	6,98	9,74	0,74	7,55
4	0,2	17531	1370	7,82	11,15	0,82	7,36
4	0,1	16083	1305	8,12	12,29	0,84	6,85
4	0,01	11528	868	7,53	16,47	1,48	9,02
21	25	16868	1479	8,77	11,76	0,14	1,20
21	20	16351	1420	8,68	12,17	0,15	1,22
21	10	14873	1346	9,05	13,47	0,01	0,10
21	5	13320	1222	9,17	15,04	0,01	0,05
21	2	11346	1060	9,34	17,20	0,16	0,90
21	1	9923	929	9,36	18,96	0,19	1,01
21	0,5	8586	794	9,25	20,85	0,26	1,26
21	0,2	6931	651	9,39	23,35	0,35	1,48
21	0,1	5818	503	8,65	25,10	0,51	2,03
21	0,01	2886	119	4,12	30,57	0,97	3,17
37	25	3882	13	0,35	33,33	1,02	3,06
37	20	3613	16	0,45	32,94	0,96	2,92
37	10	2773	33	1,17	34,17	1,10	3,23
37	5	2080	35	1,70	35,11	1,10	3,14
37	2	1391	20	1,42	35,71	1,46	4,10
37	1	1023	1	0,14	35,29	1,77	5,01
37	0,5	766	15	1,99	34,39	2,26	6,56
37	0,2	528	30	5,61	32,81	2,61	7,95
37	0,1	407	38	9,30	31,19	2,76	8,84
37	0,01	204	39	19,06	25,74	1,63	6,32
54	25	1064	7	0,66	37,76	1,39	3,69
54	20	973	6	0,57	36,52	1,29	3,54
54	10	723	8	1,13	34,58	1,56	4,52
54	5	533	17	3,22	33,03	1,73	5,22
54	2	353	20	5,77	31,60	1,25	3,96
54	1	285	24	8,58	28,66	0,43	1,51
54	0,5	241	26	10,95	25,70	0,39	1,51
54	0,2	191	16	8,49	28,02	9,07	32,38
54	0,1	168	20	11,89	21,37	2,95	13,80
54	0,01	152	65	42,44	12,49	1,10	8,83

Tabela B.16 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura M BAI FX C 60/85

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	32506	829	2,55	1,72	0,07	4,11
-10	20	32405	745	2,30	1,78	0,17	9,53
-10	10	31942	682	2,13	1,97	0,11	5,40
-10	5	31415	660	2,10	2,20	0,13	5,79
-10	2	30634	615	2,01	2,59	0,09	3,56
-10	1	29988	545	1,82	2,91	0,12	4,14
-10	0,5	29248	547	1,87	3,24	0,10	3,06
-10	0,2	28185	488	1,73	3,76	0,15	3,95
-10	0,1	27259	398	1,46	4,84	1,08	22,38
-10	0,01	24047	164	0,68	5,84	0,18	3,03
4	25	25752	218	0,85	5,33	0,08	1,46
4	20	25505	359	1,41	5,51	0,11	2,05
4	10	24422	303	1,24	6,12	0,06	1,04
4	5	23238	246	1,06	6,77	0,08	1,25
4	2	21568	190	0,88	7,78	0,03	0,36
4	1	20234	137	0,68	8,63	0,01	0,16
4	0,5	18820	131	0,70	9,61	0,07	0,74
4	0,2	16912	100	0,59	11,10	0,10	0,89
4	0,1	15452	23	0,15	12,31	0,20	1,61
4	0,01	10892	175	1,61	17,05	0,75	4,40
21	25	17693	67	0,38	10,97	0,61	5,54
21	20	17170	86	0,50	11,64	0,45	3,83
21	10	15608	127	0,82	12,87	0,68	5,27
21	5	14073	144	1,03	14,31	0,81	5,63
21	2	12091	158	1,31	16,42	0,92	5,60
21	1	10626	165	1,56	18,07	1,02	5,63
21	0,5	9236	158	1,71	19,87	1,08	5,45
21	0,2	7520	192	2,55	22,29	1,10	4,92
21	0,1	6323	189	2,99	24,07	1,03	4,26
21	0,01	3187	56	1,75	30,24	1,25	4,14
37	25	3934	72	1,83	33,17	1,17	3,54
37	20	3671	60	1,64	33,27	0,88	2,66
37	10	2818	14	0,50	34,93	1,05	3,00
37	5	2105	17	0,81	36,27	1,29	3,57
37	2	1401	39	2,78	37,22	1,22	3,29
37	1	1022	30	2,98	36,88	0,21	0,58
37	0,5	773	32	4,20	35,68	0,26	0,73
37	0,2	542	26	4,75	33,66	0,11	0,34
37	0,1	423	19	4,38	31,92	0,47	1,46
37	0,01	219	5	2,36	27,02	0,55	2,04
54	25	1220	88	7,25	38,18	1,21	3,17
54	20	1129	39	3,45	36,65	1,41	3,86
54	10	839	5	0,58	34,88	1,42	4,08
54	5	614	13	2,13	33,44	1,36	4,08
54	2	408	19	4,65	31,80	1,48	4,65
54	1	347	15	4,26	29,63	1,67	5,63
54	0,5	342	79	23,23	16,72	12,38	74,07
54	0,2	283	63	22,34	14,42	10,97	76,10
54	0,1	240	38	15,86	18,83	3,24	17,20
54	0,01	119	7	5,55	19,59	0,92	4,69

Tabela B.17 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura S CON FX B HIMA

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	28987	1849	6,38	2,04	0,05	2,43
-10	20	28839	1884	6,53	2,24	0,08	3,48
-10	10	28288	1790	6,33	2,53	0,06	2,52
-10	5	27733	1766	6,37	2,87	0,14	4,93
-10	2	26858	1648	6,14	3,34	0,13	4,03
-10	1	26131	1570	6,01	3,74	0,18	4,92
-10	0,5	25373	1499	5,91	4,22	0,23	5,54
-10	0,2	24300	1372	5,65	4,76	0,21	4,31
-10	0,1	23489	1273	5,42	5,19	0,21	3,95
-10	0,01	20919	1266	6,05	7,22	0,42	5,78
4	25	22870	330	1,44	6,28	0,71	11,38
4	20	22434	541	2,41	6,40	0,92	14,36
4	10	21419	472	2,20	7,06	0,84	11,93
4	5	20283	372	1,83	7,82	0,88	11,21
4	2	18680	210	1,12	8,96	0,90	10,03
4	1	17396	86	0,50	9,92	0,95	9,63
4	0,5	16079	31	0,19	10,94	0,95	8,73
4	0,2	14390	64	0,45	12,43	0,98	7,85
4	0,1	13121	35	0,27	13,50	0,82	6,08
4	0,01	9354	233	2,49	17,54	0,03	0,16
21	25	13699	588	4,29	14,15	0,07	0,50
21	20	13192	446	3,38	15,10	0,15	0,98
21	10	11701	373	3,19	16,56	0,21	1,28
21	5	10256	272	2,65	18,12	0,49	2,69
21	2	8491	208	2,45	20,54	0,51	2,48
21	1	7240	209	2,89	22,60	0,36	1,60
21	0,5	6061	203	3,35	24,83	0,05	0,20
21	0,2	4704	166	3,53	27,87	0,51	1,83
21	0,1	3805	170	4,48	29,72	0,76	2,57
21	0,01	1725	122	7,05	35,97	0,86	2,40
37	25	4181	785	18,77	31,92	1,03	3,21
37	20	3914	766	19,57	31,43	1,27	4,03
37	10	3032	682	22,48	32,70	1,20	3,68
37	5	2287	585	25,60	33,84	1,03	3,05
37	2	1540	445	28,89	34,46	0,54	1,58
37	1	1134	334	29,45	34,23	0,19	0,56
37	0,5	858	251	29,21	33,10	0,71	2,14
37	0,2	593	161	27,11	31,23	1,61	5,14
37	0,1	449	103	22,93	29,81	2,00	6,71
37	0,01	219	14	6,49	24,18	2,76	11,44
54	25	1169	4	0,30	38,28	1,22	3,20
54	20	1138	77	6,78	36,16	0,18	0,51
54	10	835	55	6,54	34,66	0,01	0,02
54	5	599	27	4,58	33,21	0,06	0,17
54	2	391	7	1,79	31,09	0,76	2,43
54	1	300	12	4,05	28,73	1,76	6,13
54	0,5	244	10	4,05	26,21	2,29	8,74
54	0,2	188	8	4,07	23,41	3,03	12,96
54	0,1	152	4	2,47	20,76	4,12	19,82
54	0,01	84	11	13,25	23,85	7,15	29,98

Tabela B.18 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura S BAI FX B HIMA

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	28529	1117	3,91	2,13	0,21	9,96
-10	20	28279	1153	4,08	2,25	0,04	1,89
-10	10	27794	1126	4,05	2,55	0,06	2,50
-10	5	27234	1115	4,09	2,84	0,10	3,49
-10	2	26425	1090	4,12	3,26	0,14	4,34
-10	1	25745	1081	4,20	3,60	0,12	3,34
-10	0,5	25045	1063	4,25	4,01	0,04	0,88
-10	0,2	24059	1032	4,29	4,51	0,11	2,35
-10	0,1	23290	1022	4,39	4,88	0,22	4,50
-10	0,01	20703	820	3,96	6,22	0,24	3,87
4	25	21704	610	2,81	5,05	0,71	14,16
4	20	21598	556	2,57	5,54	0,13	2,30
4	10	20654	553	2,68	6,20	0,12	1,94
4	5	19627	541	2,76	6,92	0,12	1,74
4	2	18188	484	2,66	7,86	0,08	0,99
4	1	17035	448	2,63	8,68	0,02	0,24
4	0,5	15851	420	2,65	9,58	0,03	0,30
4	0,2	14296	339	2,37	10,94	0,02	0,19
4	0,1	13192	334	2,54	11,89	0,21	1,78
4	0,01	9698	344	3,54	15,38	0,49	3,22
21	25	13819	525	3,80	13,29	0,11	0,85
21	20	13356	504	3,77	13,74	0,04	0,26
21	10	11994	477	3,97	15,28	0,11	0,69
21	5	10659	399	3,74	16,94	0,13	0,79
21	2	8993	365	4,06	19,17	0,29	1,51
21	1	7799	296	3,80	20,80	0,35	1,70
21	0,5	6679	292	4,37	22,49	0,52	2,33
21	0,2	5341	278	5,20	24,64	0,79	3,21
21	0,1	4457	276	6,20	26,02	0,95	3,64
21	0,01	2181	240	11,02	30,17	1,49	4,95
37	25	5128	738	14,38	31,33	0,84	2,69
37	20	4854	723	14,89	30,76	0,25	0,83
37	10	3861	614	15,90	32,53	0,52	1,61
37	5	3000	515	17,19	33,96	0,54	1,60
37	2	2103	398	18,93	35,28	0,28	0,80
37	1	1581	310	19,64	35,65	0,30	0,85
37	0,5	1204	247	20,56	34,79	0,23	0,65
37	0,2	838	185	22,09	33,41	0,47	1,40
37	0,1	635	146	23,00	31,87	1,00	3,15
37	0,01	320	77	24,16	25,28	0,47	1,85
54	25	1502	94	6,26	35,00	0,79	2,26
54	20	1418	125	8,83	33,50	0,98	2,93
54	10	1052	87	8,28	32,32	0,79	2,45
54	5	773	58	7,46	31,30	1,16	3,70
54	2	523	35	6,74	29,67	1,32	4,46
54	1	387	20	5,10	28,73	1,44	5,00
54	0,5	318	14	4,27	26,39	1,56	5,92
54	0,2	247	7	2,71	23,83	1,90	7,95
54	0,1	204	6	2,95	22,18	1,88	8,48
54	0,01	126	4	2,81	17,20	2,21	12,83

Tabela B.19 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura S CON FX C HIMA

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	28460	2829	9,94	1,28	1,29	101,49
-10	20	28985	1832	6,32	1,32	1,30	98,57
-10	10	29065	1025	3,53	2,10	0,53	25,31
-10	5	28486	1020	3,58	2,40	0,45	18,60
-10	2	27725	905	3,26	2,85	0,43	15,16
-10	1	27038	858	3,17	3,24	0,34	10,48
-10	0,5	26304	812	3,09	3,65	0,38	10,46
-10	0,2	25251	746	2,95	4,18	0,35	8,46
-10	0,1	24428	643	2,63	4,64	0,30	6,56
-10	0,01	21456	233	1,08	6,45	0,31	4,82
4	25	23743	839	3,54	5,32	0,18	3,46
4	20	23464	387	1,65	5,14	0,52	10,18
4	10	22575	141	0,63	6,17	0,05	0,80
4	5	21433	117	0,55	6,87	0,04	0,62
4	2	19844	199	1,00	7,88	0,11	1,44
4	1	18591	229	1,23	8,68	0,15	1,71
4	0,5	17285	276	1,60	9,59	0,11	1,18
4	0,2	15560	303	1,95	10,82	0,13	1,18
4	0,1	14231	255	1,79	11,91	0,05	0,42
4	0,01	10017	224	2,24	15,78	0,21	1,30
21	25	13906	280	2,01	14,16	0,35	2,50
21	20	13337	192	1,44	14,58	0,44	3,01
21	10	11862	89	0,75	16,17	0,49	3,02
21	5	10452	19	0,18	17,82	0,60	3,37
21	2	8692	48	0,55	20,15	0,64	3,19
21	1	7484	79	1,06	21,87	0,64	2,91
21	0,5	6360	111	1,75	23,51	0,58	2,47
21	0,2	5020	107	2,13	25,76	0,49	1,89
21	0,1	4144	99	2,39	27,14	0,33	1,22
21	0,01	2029	37	1,81	30,57	0,56	1,83
37	25	4284	440	10,27	31,50	0,91	2,87
37	20	4025	469	11,65	31,28	1,62	5,18
37	10	3142	427	13,59	32,87	2,14	6,52
37	5	2405	357	14,85	33,87	2,11	6,24
37	2	1651	252	15,29	34,46	2,05	5,95
37	1	1236	190	15,40	34,13	1,96	5,74
37	0,5	942	134	14,25	33,03	1,80	5,46
37	0,2	668	78	11,71	31,66	1,98	6,25
37	0,1	513	49	9,49	30,01	1,52	5,07
37	0,01	260	5	1,74	25,50	0,59	2,33
54	25	1324	32	2,40	35,34	0,83	2,36
54	20	1253	25	2,03	33,53	0,62	1,86
54	10	940	26	2,81	32,32	0,30	0,94
54	5	702	24	3,41	31,36	0,14	0,45
54	2	483	24	5,01	30,09	0,06	0,19
54	1	375	36	9,54	29,13	0,54	1,87
54	0,5	317	33	10,32	27,14	0,22	0,81
54	0,2	258	30	11,52	24,74	0,49	2,00
54	0,1	220	28	12,87	22,59	0,41	1,82
54	0,01	150	23	15,26	13,61	5,78	42,46

Tabela B.20 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura S BAI FX C HIMA

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	30786	259	0,84	2,19	0,28	12,92
-10	20	30651	197	0,64	2,32	0,30	12,80
-10	10	30109	131	0,43	2,64	0,42	15,83
-10	5	29465	57	0,19	2,96	0,40	13,64
-10	2	28557	73	0,26	3,39	0,51	15,02
-10	1	27789	168	0,60	3,75	0,57	15,08
-10	0,5	26967	247	0,92	4,14	0,55	13,32
-10	0,2	25818	347	1,34	4,74	0,67	14,19
-10	0,1	24865	358	1,44	5,12	0,62	12,15
-10	0,01	22001	122	0,55	6,56	0,51	7,76
4	25	24375	621	2,55	4,94	0,88	17,75
4	20	23898	410	1,72	5,00	0,25	4,95
4	10	22969	544	2,37	6,02	0,25	4,11
4	5	21830	513	2,35	6,71	0,16	2,43
4	2	20253	469	2,31	7,63	0,26	3,43
4	1	18986	443	2,33	8,45	0,16	1,93
4	0,5	17667	389	2,20	9,33	0,24	2,58
4	0,2	15934	371	2,33	10,54	0,26	2,48
4	0,1	14637	366	2,50	11,60	0,16	1,40
4	0,01	10424	437	4,19	15,32	0,01	0,05
21	25	14167	342	2,42	13,36	0,99	7,41
21	20	13718	425	3,10	14,25	0,43	3,03
21	10	12283	309	2,52	15,71	0,39	2,48
21	5	10882	282	2,59	17,36	0,41	2,36
21	2	9116	215	2,36	19,60	0,49	2,53
21	1	7853	183	2,33	21,32	0,55	2,59
21	0,5	6702	144	2,15	22,96	0,57	2,50
21	0,2	5318	120	2,26	25,12	0,58	2,31
21	0,1	4405	105	2,38	26,47	0,59	2,24
21	0,01	2171	69	3,19	29,52	0,33	1,10
37	25	4859	52	1,06	29,62	0,01	0,05
37	20	4575	27	0,59	29,29	0,04	0,14
37	10	3619	26	0,72	30,64	0,10	0,32
37	5	2800	23	0,81	31,76	0,10	0,31
37	2	1935	7	0,37	32,80	0,08	0,24
37	1	1453	6	0,44	33,01	0,11	0,32
37	0,5	1104	6	0,58	32,29	0,10	0,31
37	0,2	770	6	0,82	31,19	0,06	0,20
37	0,1	584	11	1,93	30,06	0,21	0,71
37	0,01	285	11	3,96	25,74	0,20	0,77
54	25	465	36	7,76	35,22	0,72	2,05
54	20	1225	54	4,39	33,73	0,30	0,90
54	10	905	43	4,75	32,54	0,27	0,83
54	5	663	39	5,82	31,40	0,18	0,59
54	2	455	21	4,68	29,69	0,61	2,05
54	1	357	0	0,04	27,86	1,61	5,76
54	0,5	294	1	0,22	25,72	1,26	4,89
54	0,2	234	3	1,30	23,49	0,65	2,77
54	0,1	197	3	1,58	21,88	0,54	2,46
54	0,01	129	3	2,46	18,50	0,96	5,20

Tabela B.21 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura M CON FX B HIMA

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	28178	1825	6,48	2,99	0,21	7,09
-10	20	27782	1766	6,36	3,03	0,25	8,18
-10	10	27129	1880	6,93	3,55	0,18	5,18
-10	5	26339	1889	7,17	3,96	0,16	3,93
-10	2	25204	1887	7,49	4,67	0,17	3,63
-10	1	24261	1848	7,62	5,14	0,19	3,72
-10	0,5	23284	1801	7,74	5,72	0,20	3,46
-10	0,2	21936	1803	8,22	6,45	0,21	3,29
-10	0,1	20967	1687	8,05	6,96	0,25	3,66
-10	0,01	18716	1396	7,46	8,50	0,23	2,66
4	25	21615	1440	6,66	6,73	0,23	3,47
4	20	21206	1345	6,34	7,07	0,36	5,10
4	10	20069	1346	6,71	7,71	0,48	6,24
4	5	18854	1320	7,00	8,59	0,49	5,68
4	2	17161	1288	7,51	9,81	0,58	5,91
4	1	15834	1245	7,86	10,87	0,64	5,85
4	0,5	14471	1203	8,31	12,00	0,74	6,13
4	0,2	12739	1179	9,25	13,61	0,93	6,81
4	0,1	11488	1119	9,74	14,92	0,98	6,54
4	0,01	7768	658	8,47	19,20	0,71	3,68
21	25	11550	354	3,06	16,47	0,38	2,32
21	20	11014	364	3,31	17,12	0,22	1,28
21	10	9627	325	3,37	18,93	0,23	1,23
21	5	8276	281	3,39	20,86	0,34	1,63
21	2	6643	213	3,20	23,56	0,41	1,74
21	1	5513	183	3,32	25,53	0,32	1,25
21	0,5	4499	154	3,43	27,38	0,38	1,39
21	0,2	3360	128	3,81	29,56	0,37	1,27
21	0,1	2649	99	3,74	30,71	0,53	1,73
21	0,01	1145	30	2,66	32,01	0,10	0,31
37	25	3557	395	11,09	32,42	0,11	0,33
37	20	3307	357	10,80	32,36	0,04	0,11
37	10	2529	286	11,33	33,74	0,02	0,06
37	5	1895	232	12,24	34,64	0,00	0,00
37	2	1269	167	13,15	35,13	0,06	0,18
37	1	942	126	13,43	34,44	0,07	0,21
37	0,5	711	91	12,85	33,17	0,08	0,23
37	0,2	496	63	12,68	31,32	0,06	0,20
37	0,1	379	44	11,63	29,43	0,06	0,22
37	0,01	186	13	7,04	24,42	1,27	5,18
54	25	981	259	26,43	38,03	2,16	5,67
54	20	885	213	24,09	36,77	1,60	4,35
54	10	664	164	24,66	34,69	1,43	4,12
54	5	498	122	24,56	33,21	1,84	5,54
54	2	343	86	25,09	32,26	3,50	10,85
54	1	286	66	22,96	28,85	2,68	9,29
54	0,5	245	51	20,94	25,86	1,85	7,16
54	0,2	203	38	18,95	22,74	1,26	5,53
54	0,1	175	29	16,56	19,94	0,35	1,74
54	0,01	118	10	8,11	15,02	0,99	6,59

Tabela B.22 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura M BAI FX B HIMA

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média $ E^* $ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	30782	517	1,68	2,19	0,40	18,45
-10	20	30607	657	2,15	2,42	0,30	12,59
-10	10	30002	649	2,16	2,77	0,39	14,07
-10	5	29323	607	2,07	3,12	0,37	12,03
-10	2	28308	545	1,93	3,68	0,37	10,20
-10	1	27464	494	1,80	4,10	0,45	11,04
-10	0,5	26571	423	1,59	4,60	0,44	9,53
-10	0,2	25340	349	1,38	5,28	0,43	8,18
-10	0,1	24373	293	1,20	5,76	0,50	8,72
-10	0,01	21360	470	2,20	7,30	0,04	0,48
4	25	23761	1177	4,95	6,30	0,11	1,80
4	20	23402	1160	4,96	6,51	0,01	0,11
4	10	22255	1102	4,95	7,29	0,08	1,16
4	5	21012	1044	4,97	8,11	0,02	0,26
4	2	19273	962	4,99	9,29	0,04	0,38
4	1	17898	879	4,91	10,30	0,02	0,21
4	0,5	16500	776	4,70	11,39	0,03	0,25
4	0,2	14632	676	4,62	13,01	0,03	0,22
4	0,1	13230	613	4,63	14,30	0,08	0,54
4	0,01	8827	373	4,23	19,70	0,21	1,04
21	25	12681	412	3,25	16,05	0,17	1,06
21	20	12113	400	3,30	16,59	0,01	0,04
21	10	10636	392	3,68	18,40	0,09	0,50
21	5	9202	316	3,44	20,31	0,23	1,11
21	2	7451	263	3,53	23,01	0,35	1,54
21	1	6225	211	3,40	25,06	0,53	2,12
21	0,5	5127	194	3,78	26,94	0,69	2,55
21	0,2	3844	178	4,64	29,29	0,91	3,11
21	0,1	3051	161	5,26	30,51	1,08	3,55
21	0,01	1365	127	9,28	31,82	1,28	4,02
37	25	3424	170	4,98	35,18	1,31	3,72
37	20	3153	139	4,42	35,78	0,49	1,36
37	10	2373	117	4,92	37,51	0,11	0,28
37	5	1758	93	5,31	38,26	0,14	0,37
37	2	1172	74	6,34	38,05	0,13	0,33
37	1	878	65	7,41	36,88	0,32	0,86
37	0,5	677	56	8,21	35,00	0,83	2,36
37	0,2	491	42	8,66	32,51	1,08	3,33
37	0,1	388	36	9,34	30,55	1,81	5,93
37	0,01	224	27	11,86	24,66	0,86	3,50
54	25	998	63	6,26	36,96	3,59	9,72
54	20	931	57	6,07	34,78	3,13	9,01
54	10	697	43	6,19	32,67	2,79	8,55
54	5	519	28	5,47	30,85	2,38	7,70
54	2	362	18	4,90	28,66	2,14	7,48
54	1	299	16	5,47	26,13	2,32	8,88
54	0,5	259	14	5,39	23,77	2,57	10,80
54	0,2	218	15	6,82	21,05	2,72	12,90
54	0,1	191	15	8,05	18,84	2,55	13,51
54	0,01	137	8	6,21	13,28	1,77	13,37

Tabela B.23 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura M CON FX C HIMA

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	30021	1743	5,81	2,51	0,47	18,91
-10	20	29904	1534	5,13	2,70	0,24	8,90
-10	10	29372	1562	5,32	2,91	0,18	6,32
-10	5	28777	1580	5,49	3,24	0,04	1,31
-10	2	27818	1586	5,70	3,79	0,01	0,37
-10	1	27032	1607	5,95	4,18	0,08	1,86
-10	0,5	26177	1607	6,14	4,57	0,16	3,40
-10	0,2	24977	1597	6,39	5,12	0,25	4,84
-10	0,1	24025	1532	6,37	5,62	0,17	3,02
-10	0,01	20820	1710	8,21	6,96	0,06	0,81
4	25	24605	1068	4,34	5,27	0,14	2,68
4	20	24189	969	4,01	5,54	0,16	2,94
4	10	23216	996	4,29	6,12	0,17	2,77
4	5	22051	945	4,29	6,84	0,16	2,38
4	2	20440	878	4,29	7,88	0,25	3,14
4	1	19125	809	4,23	8,73	0,22	2,51
4	0,5	17784	725	4,08	9,73	0,18	1,89
4	0,2	15973	587	3,67	11,10	0,21	1,91
4	0,1	14572	530	3,64	12,28	0,16	1,32
4	0,01	9870	252	2,55	17,55	0,11	0,64
21	25	14168	455	3,21	13,25	0,32	2,40
21	20	13653	461	3,38	13,78	0,57	4,11
21	10	12279	431	3,51	15,14	0,40	2,62
21	5	10913	363	3,32	16,77	0,34	2,02
21	2	9193	268	2,92	19,14	0,48	2,51
21	1	7929	244	3,08	20,98	0,62	2,97
21	0,5	6735	259	3,84	22,82	0,71	3,13
21	0,2	5268	255	4,85	25,25	0,83	3,30
21	0,1	4249	214	5,04	26,83	0,86	3,19
21	0,01	1792	106	5,92	30,28	1,05	3,48
37	25	4017	7	0,18	31,68	0,62	1,94
37	20	3706	10	0,27	31,76	0,47	1,47
37	10	2858	3	0,10	33,25	0,54	1,62
37	5	2167	10	0,46	34,11	0,64	1,87
37	2	1484	12	0,81	34,35	0,73	2,12
37	1	1121	14	1,26	33,52	0,98	2,91
37	0,5	864	12	1,39	32,08	0,93	2,91
37	0,2	628	10	1,58	30,06	0,96	3,20
37	0,1	500	7	1,43	27,87	1,03	3,70
37	0,01	282	5	1,68	23,02	0,55	2,40
54	25	1180	100	8,45	34,72	2,45	7,07
54	20	1102	107	9,69	33,75	2,40	7,10
54	10	841	90	10,69	31,89	2,77	8,69
54	5	633	72	11,30	30,07	3,54	11,78
54	2	441	54	12,13	27,27	4,99	18,31
54	1	357	30	8,30	24,13	5,49	22,74
54	0,5	312	30	9,54	21,97	5,28	24,05
54	0,2	266	32	12,07	19,55	5,08	25,97
54	0,1	238	33	13,94	18,24	3,47	19,04
54	0,01	166	39	23,35	16,43	0,23	1,38

Tabela B.24 – Resultados do ensaio de Módulo Complexo da mistura M BAI FX C HIMA

Temperatura (°C)	Frequencia (Hz)	Média E* (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média ϕ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	27834	247	0,89	1,79	0,12	6,73
-10	20	27416	179	0,65	2,35	0,18	7,82
-10	10	26877	220	0,82	2,64	0,22	8,32
-10	5	26277	241	0,92	2,96	0,17	5,73
-10	2	25375	269	1,06	3,48	0,28	8,13
-10	1	24656	274	1,11	3,99	0,29	7,28
-10	0,5	23851	281	1,18	4,38	0,32	7,27
-10	0,2	22753	266	1,17	5,07	0,48	9,48
-10	0,1	21859	264	1,21	5,54	0,42	7,54
-10	0,01	18724	104	0,56	7,60	0,02	0,28
4	25	20839	1814	8,71	5,90	0,17	2,88
4	20	20457	1375	6,72	6,44	0,18	2,75
4	10	19337	1367	7,07	7,26	0,05	0,68
4	5	18143	1380	7,61	8,10	0,08	1,05
4	2	16559	1306	7,89	9,40	0,01	0,08
4	1	15320	1252	8,17	10,47	0,04	0,41
4	0,5	14052	1175	8,36	11,70	0,06	0,48
4	0,2	12356	1071	8,66	13,37	0,01	0,11
4	0,1	11123	923	8,30	14,71	0,11	0,72
4	0,01	7509	581	7,74	19,74	0,25	1,29
21	25	11436	250	2,19	16,99	0,25	1,46
21	20	10938	257	2,35	17,47	0,30	1,74
21	10	9590	275	2,87	19,30	0,26	1,36
21	5	8275	253	3,06	21,19	0,35	1,64
21	2	6694	247	3,69	23,77	0,47	1,96
21	1	5583	239	4,28	25,66	0,62	2,40
21	0,5	4596	214	4,65	27,42	0,70	2,55
21	0,2	3455	192	5,55	29,63	0,82	2,77
21	0,1	2739	194	7,07	30,81	0,86	2,80
21	0,01	1206	126	10,44	32,55	0,90	2,76
37	25	3401	185	5,45	33,82	0,71	2,11
37	20	3165	182	5,74	33,26	0,69	2,08
37	10	2407	150	6,23	34,29	0,85	2,47
37	5	1789	124	6,92	35,03	0,90	2,56
37	2	1182	88	7,42	35,37	0,98	2,76
37	1	868	69	7,93	34,73	0,83	2,40
37	0,5	648	51	7,83	33,49	0,64	1,90
37	0,2	448	35	7,78	31,76	0,32	1,00
37	0,1	341	26	7,62	30,15	0,10	0,33
37	0,01	171	13	7,65	26,23	1,05	3,99
54	25	465	21	4,47	36,44	0,66	1,80
54	20	773	20	2,58	35,11	0,74	2,09
54	10	577	18	3,05	33,35	0,57	1,72
54	5	422	9	2,15	31,93	0,26	0,82
54	2	277	6	2,22	30,62	0,06	0,21
54	1	212	0	0,17	28,82	0,29	1,01
54	0,5	178	0	0,28	26,60	0,45	1,70
54	0,2	143	1	0,99	24,31	0,71	2,91
54	0,1	121	2	1,92	22,83	0,61	2,66
54	0,01	81	3	4,17	18,80	1,36	7,26

APÊNDICE C – CURVAS CARACTERÍSTICAS DE DANO PARA AJUSTE DO FITTING

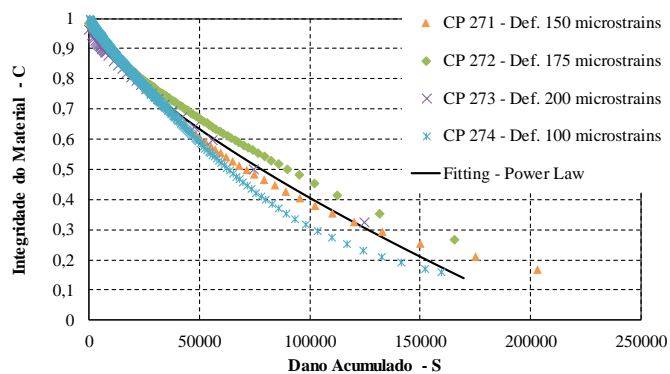
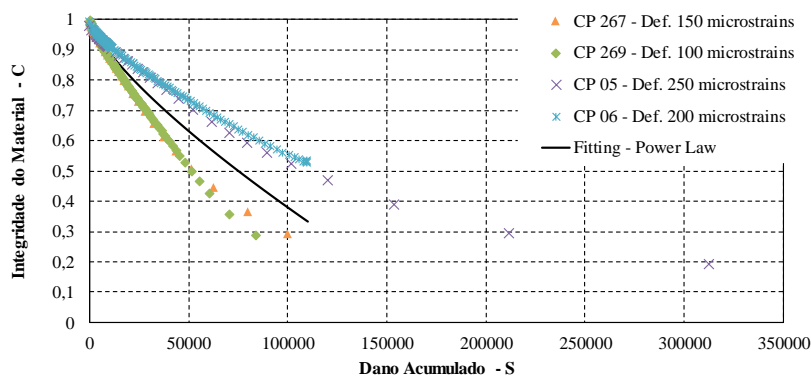
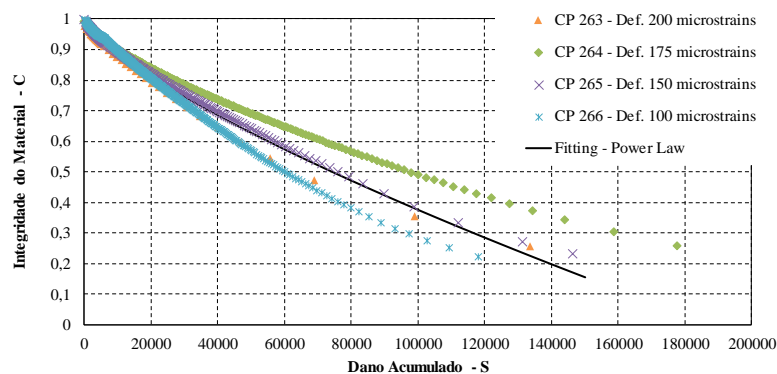
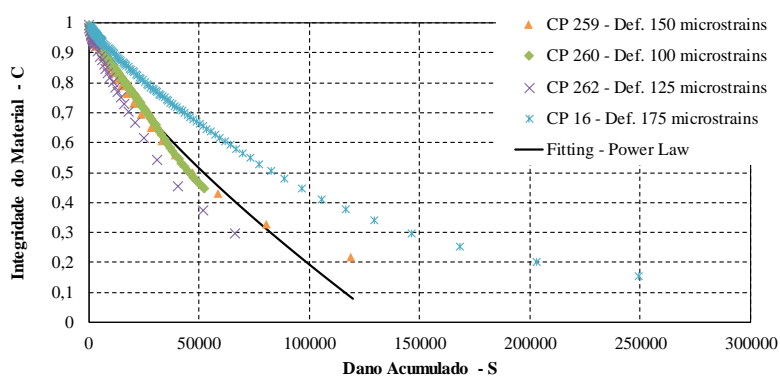
Figura C.1 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S CON FX B 50/70Figura C.2 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S BAI FX B 50/70Figura C.3 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S CON FX C 50/70Figura C.4 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S BAI FX C 50/70

Figura C.5 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura M CON FX B 50/70

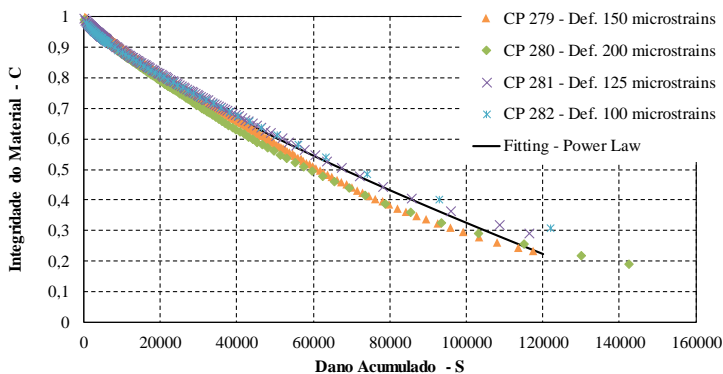


Figura C.6 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura M BAI FX B 50/70

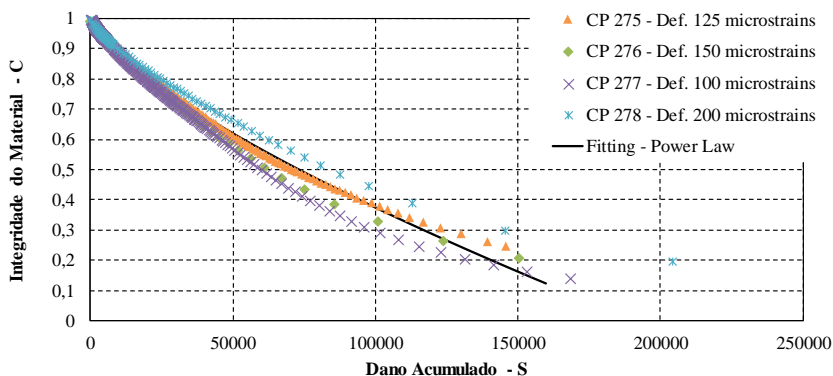


Figura C.7 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura M CON FX C 50/70

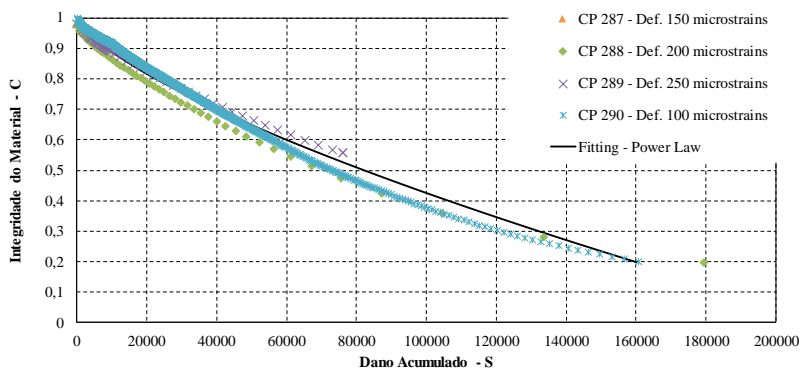


Figura C.8 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura M BAI FX C 50/70

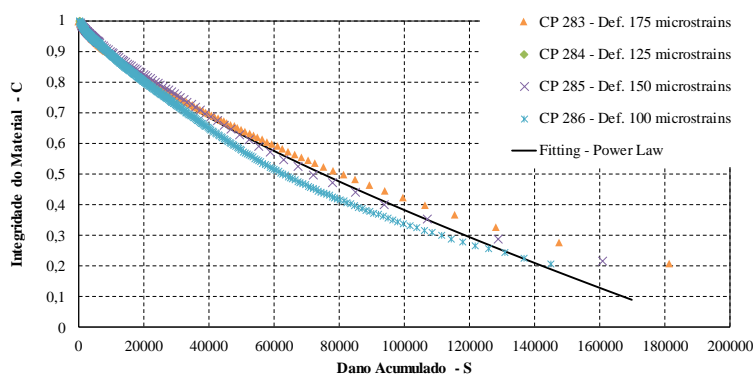


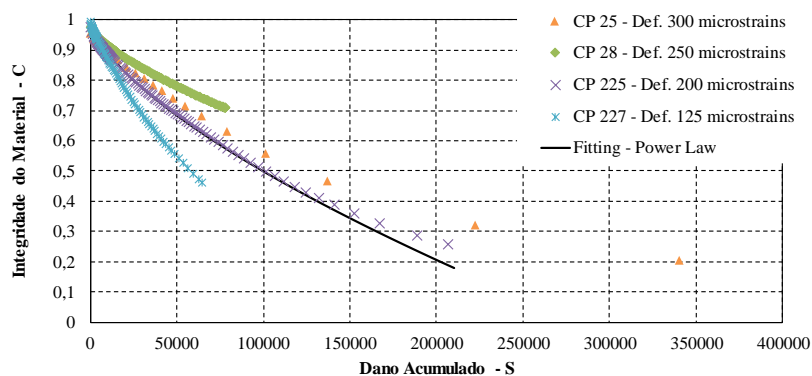
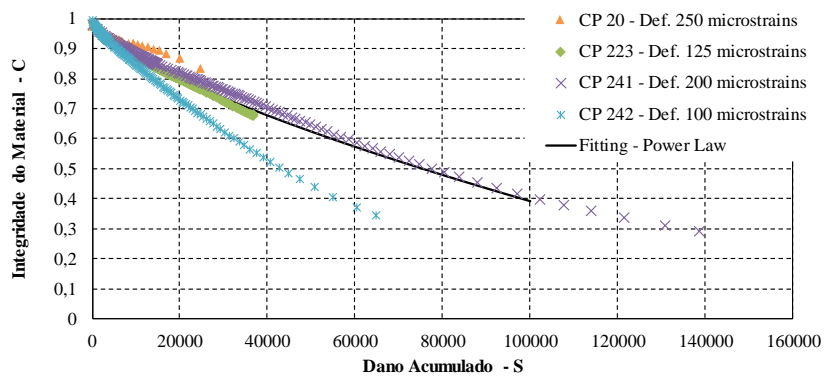
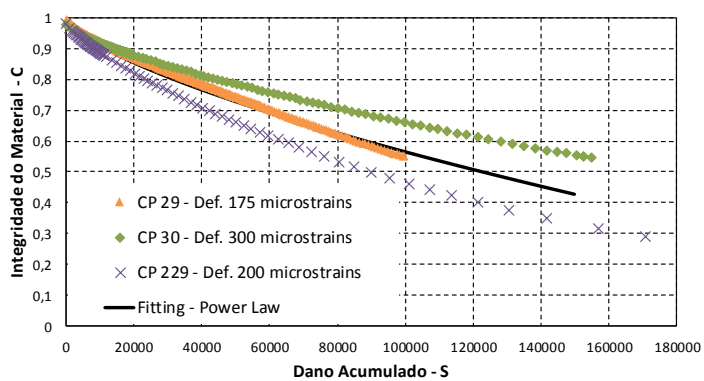
Figura C.9 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S CON FX B 60/85Figura C.10 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S BAI FX B 60/85Figura C.11 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S CON FX C 60/85

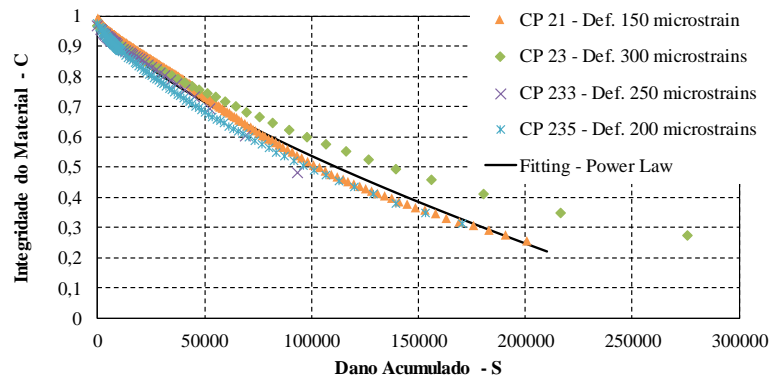
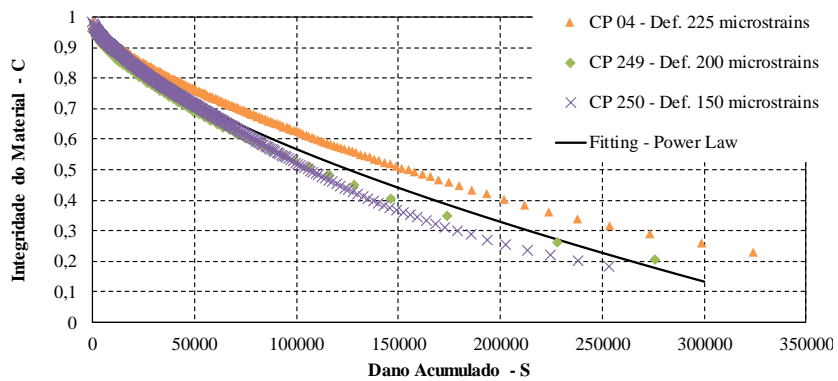
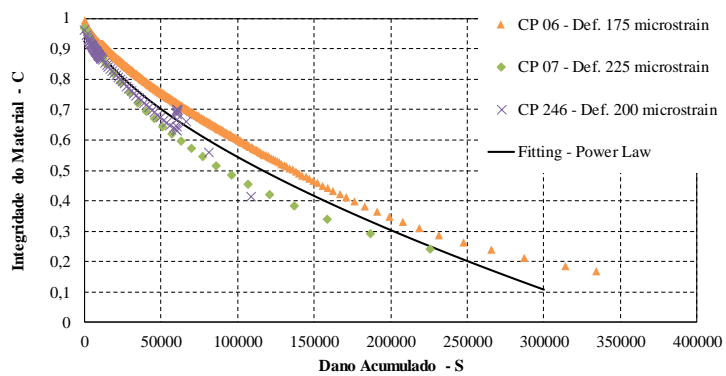
Figura C.12 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S BAI FX C 60/85Figura C.13 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura M CON FX B 60/85Figura C.14 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura M BAI FX B 60/85

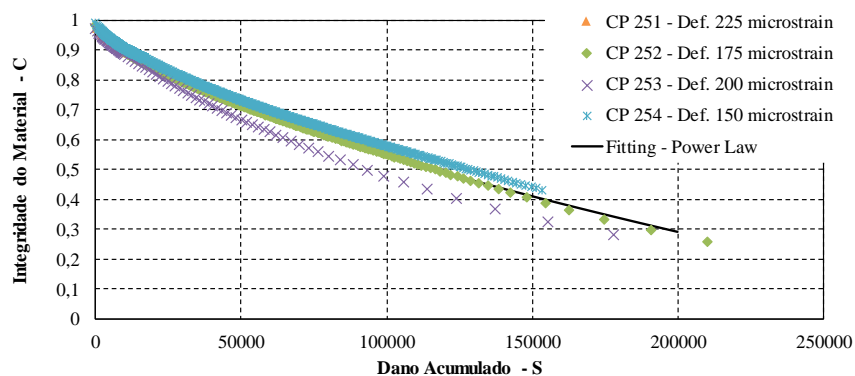
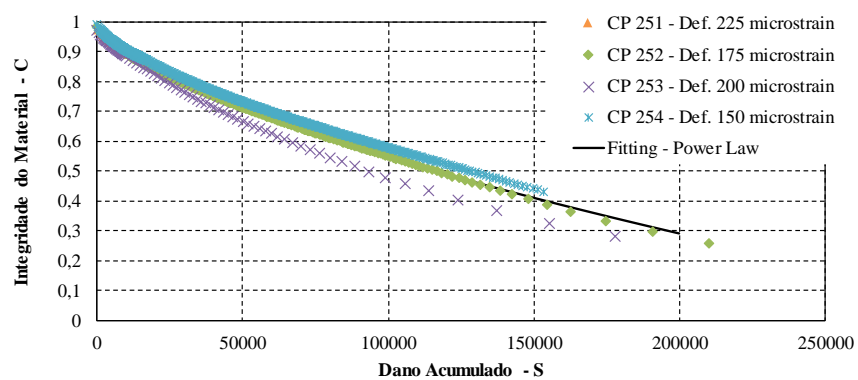
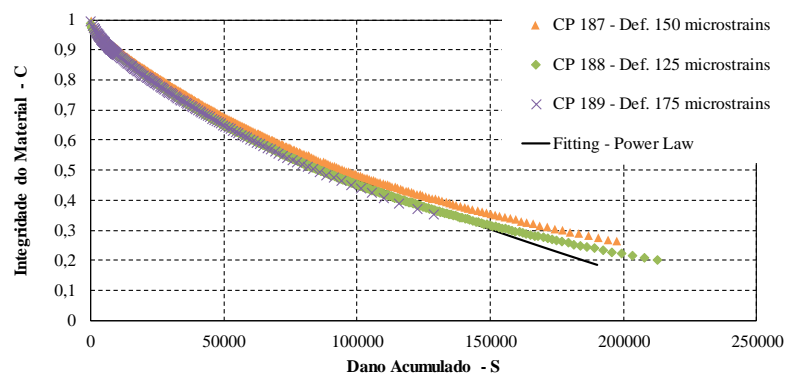
Figura C.15 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura M CON FX C 60/85Figura C.16 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura M BAI FX C 60/85Figura C.17 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S CON FX B HIMA

Figura C.18 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S BAI FX B HIMA

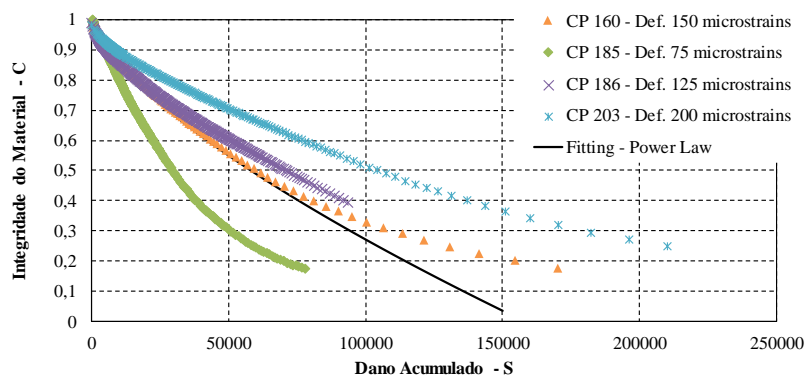


Figura C.19 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S CON FX C HIMA

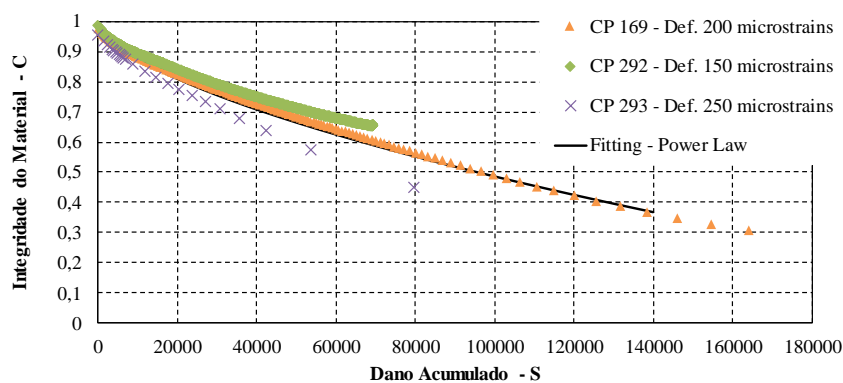


Figura C.20 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura S BAI FX C HIMA

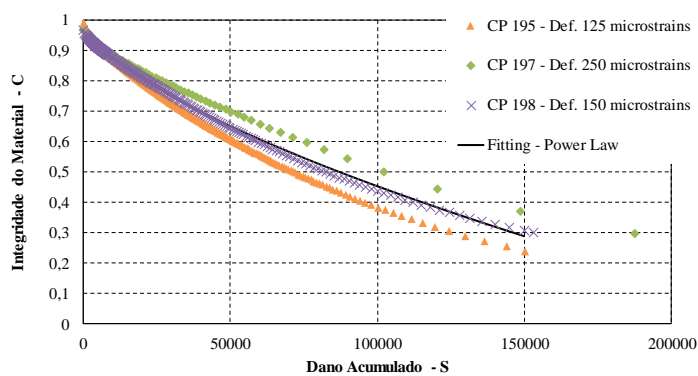
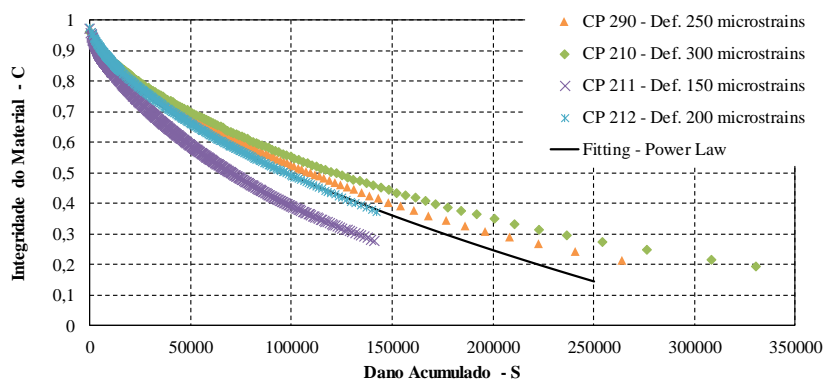
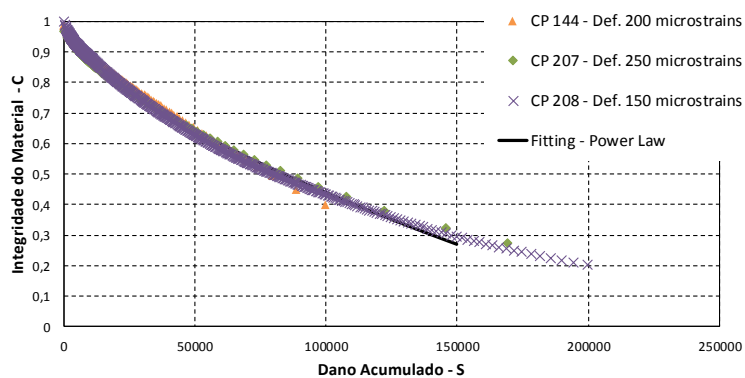
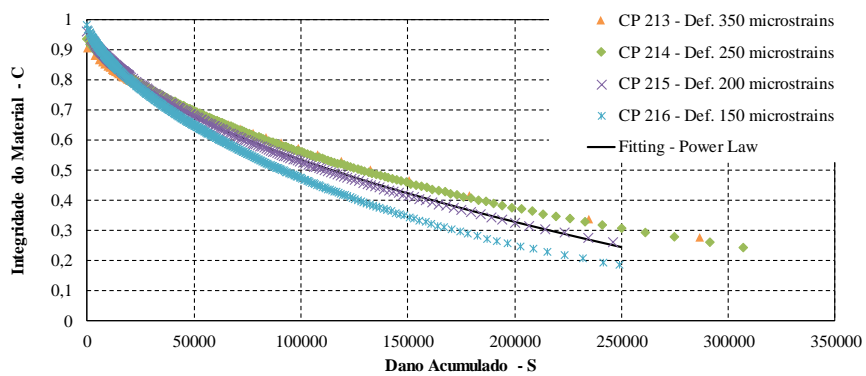


Figura C.21 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura M CON FX B HIMAFigura C.22 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura M BAI FX B HIMAFigura C.23 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura M CON FX C HIMAFigura C.24 – Curva C versus S do ajuste *Fitting* da mistura M BAI FX C HIMA

