

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

**Cléber Faccin**

**CONCRETOS ASFÁLTICOS EM UTILIZAÇÃO NO RIO GRANDE DO  
SUL: COMPORTAMENTO MECÂNICO E DESEMPENHO EM CAMPO  
QUANTO À DEFORMAÇÃO PERMANENTE**

**Santa Maria, RS  
2018**



**Cléber Faccin**

**CONCRETOS ASFÁLTICOS EM UTILIZAÇÃO NO RIO GRANDE DO  
SUL: COMPORTAMENTO MECÂNICO E DESEMPENHO EM CAMPO  
QUANTO À DEFORMAÇÃO PERMANENTE**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS  
2018

Faccin, Cléber

CONCRETOS ASFÁLTICOS EM UTILIZAÇÃO NO RIO GRANDE DO  
SUL: COMPORTAMENTO MECÂNICO E DESEMPENHO EM CAMPO QUANTO  
À DEFORMAÇÃO PERMANENTE / Cléber Faccin.- 2018.

220 p.; 30 cm

Orientador: Luciano Pivoto Specht

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

1. Concreto asfáltico 2. Comportamento mecânico 3.  
Flow Number 4. Deformação permanente I. Pivoto Specht,  
Luciano II. Título.

Cléber Faccin

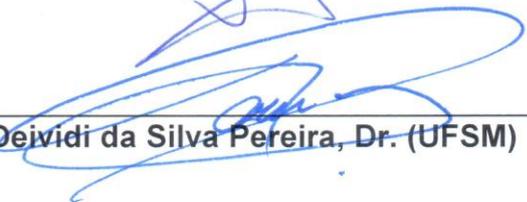
**CONCRETOS ASFÁLTICOS EM UTILIZAÇÃO NO RIO GRANDE DO SUL:  
COMPORTAMENTO MECÂNICO E DESEMPENHO EM CAMPO QUANTO À  
DEFORMAÇÃO PERMANENTE**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

**Aprovado em 05 de Julho de 2018:**

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

  
\_\_\_\_\_  
**Liedi Légi Bariani Bernucci, Dra. (USP)**

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

Santa Maria, RS  
2018



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família, pelo apoio em todas as empreitadas da minha vida.

Ao meu orientador, professor Luciano Pivoto Specht, pela oportunidade, pela confiança e pelos ensinamentos. És um exemplo de profissional.

À professora Liedi Légi Bariani Bernucci, pela disponibilidade em compor a banca examinadora, como membro externo, compartilhando seus conhecimentos e experiências.

Ao professor Deividi da Silva Pereira, pelos ensinamentos repassados durante a pós-graduação e por aceitar fazer parte da banca examinadora.

Aos demais professores da UFSM, sempre solícitos em ensinar e apoiar, em especial aos professores Rinaldo José Barboza Pinheiro, Andrea Valli Nummer, Tatiana Cureau Cervo e Magnos Baroni.

Às amizades que o Mestrado me proporcionou: ao Fernando Boeira, que me ensinou boa parte dos procedimentos laboratoriais utilizados nesta pesquisa; ao Eduardo Druzian, parceiro em praticamente todos os levantamentos de campo; ao Lucas Dotto Bueno, presente em diversos levantamentos de campo; ao Valdir Barboza Júnior e Gustavo dos Santos Pinheiro, sempre dispostos a me ajudar. Aos demais amigos e colegas da pós-graduação, integrantes do GEPPASV e funcionários da UFSM, só tenho a agradecer pelo convívio e pela ajuda quando precisei. Levarei a nossa amizade para sempre!

À UFRJ, especialmente ao Carlos Correia e Silva e ao Marcos Antônio Fritzen, pela disponibilidade na realização dos ensaios de morfologia dos agregados.

À UFC, na figura da Juceline Bastos, onde foram efetuados os ensaios de *Flow Number* com confinamento.

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida durante parte do Mestrado, possibilitando maior dedicação à pesquisa.

À Petrobras/ANP e à Rede de Asfalto, pelo aporte financeiro na compra de equipamentos utilizados na pesquisa.

À todas as empresas que forneceram os materiais utilizados no trabalho.

Enfim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma, colaboraram com este trabalho ao longo desses anos. Muito obrigado a todos!



## RESUMO

### CONCRETOS ASFÁLTICOS EM UTILIZAÇÃO NO RIO GRANDE DO SUL: COMPORTAMENTO MECÂNICO E DESEMPENHO EM CAMPO QUANTO À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

AUTOR: Cléber Faccin  
ORIENTADOR: Luciano Pivoto Specht

As rodovias possuem alta relevância no contexto econômico e social do Rio Grande do Sul, estado brasileiro localizado no extremo sul do Brasil, sendo a solução mais utilizada na construção e recuperação das mesmas os pavimentos flexíveis com revestimentos de concreto asfáltico. O comportamento mecânico dessas misturas asfálticas depende, dentre outros fatores, dos materiais constituintes, das ações do tráfego e do clima e está diretamente relacionado ao desempenho em campo, sendo expresso pelas propriedades mecânicas, obtidas, geralmente, por meio de ensaios laboratoriais. O conhecimento do comportamento das misturas efetivamente utilizadas no Estado é de suma importância no dimensionamento e especificação das camadas dos pavimentos. Além disso, é útil para a análise das alternativas utilizadas, em especial, para o entendimento da resistência à deformação permanente, que é um dos principais danos a que as rodovias estaduais estão sujeitas. Buscou-se, assim, avaliar o comportamento mecânico de diferentes misturas asfálticas densas em utilização no estado do Rio Grande do Sul, por meio de ensaios laboratoriais e de campo, com foco na deformação permanente e no parâmetro *Flow Number*, obtido através do ensaio uniaxial de carga repetida. Para a realização do estudo, foram coletados vinte e quatro concretos asfálticos em diversas regiões do estado, com diferentes agregados e ligantes asfálticos, além de diversas faixas granulométricas recomendadas pelos órgãos rodoviários que administram as rodovias no Estado (DAER e DNIT). Também, quinze trechos foram monitorados a fim de avaliar a deformação permanente das camadas de revestimento. As análises dos resultados demonstram que, para a maioria das misturas produzidas no RS, são identificados desvios de produção para granulometria e teor de ligante. Além disso, identificou-se a utilização de métodos de seleção de agregados e ligantes, critérios de dosagem e parâmetros como a RT, que já são ultrapassados, pois não levam em conta o desempenho, demonstrando a necessidade de atualização das especificações vigentes. Os resultados das propriedades mecânicas indicam diferenças significativas de comportamento para a rigidez das misturas estudadas, ficando evidente a importância da efetiva caracterização das mesmas para projetos de pavimentação. Para o ensaio de *Flow Number*, encontrou-se uma forte correlação do parâmetro FN com a reologia das misturas, característica fortemente influenciada pelo tipo de ligante, seguido do percentual de pó de pedra no traço. Além disso, os critérios de *Flow Number* do ensaio uniaxial de carga repetida foram refinados em função do tráfego, sendo possível inferir uma boa aplicabilidade do respectivo parâmetro na previsão da deformação permanente de concretos asfálticos, com exceção das misturas mornas e com asfalto borracha, que apresentam baixos valores de FN e bom desempenho em campo.

**Palavras-chave:** Concreto asfáltico. Comportamento mecânico. *Flow Number*. Deformação permanente.



## ABSTRACT

### ASPHALT CONCRETE USED IN THE STATE OF RIO GRANDE DO SUL: MECHANICAL BEHAVIOR AND PERMANENT DEFORMATION

AUTHOR: Cléber Faccin

ADVISOR: Luciano Pivoto Specht

Highways are relevant to the economic and social context in the state of Rio Grande do Sul (RS), located in the southern region of Brazil. Flexible pavement with asphalt concrete layers is the most commonly used solution for the construction and repair of highways. The mechanical behavior of these asphalt mixtures depends on, among other factors, the constituent materials, traffic and climate. It is directly related to field performance, which is expressed by the mechanical properties typically obtained in laboratory tests. Understanding the behavior of the mixtures used in the state is of utmost importance in the design and specification of pavement layers. Also, it is useful for analyzing alternatives, especially for understanding resistance to permanent deformation, which is one of the causes of damage to state highways. The aim of this study was to evaluate the mechanical behavior of different dense asphalt mixtures used in RS in laboratory and field tests. The focus was on permanent deformation and flow number obtained by the uniaxial repeated load test. Twenty-four asphalt concrete samples were collected in different regions of the state, with different aggregates and asphalt binders, as well as several grain size ranges recommended by the road agencies that oversee the state highways (DAER and DNIT). In addition, fifteen stretches of road were monitored to evaluate permanent deformation of the layers. The analysis of the results shows variation in grain size and binder content for most mixtures produced in RS. We also identified the use of outdated aggregate and binder selection methods, dose criteria and parameters such as tensile strength (TS). The fact that they do not take performance into account shows the need to update the current specifications. The results of the mechanical properties show significant differences in behavior for the stiffness of the mixtures. This shows the importance of effective characterization of the properties for pavement projects. The flow number test showed strong correlation between FN and the rheology of the mixtures. This characteristic is strongly influenced by the type of binder, followed by the percentage of stone dust. In addition, the flow number criteria of the uniaxial repeated load test were refined according to traffic. Thus, the use of FN appears to be promising in predicting permanent deformation of asphalt concretes, except for warm mix asphalt and rubberized asphalt, which have low FN values and good field performance.

**Keywords:** Asphalt concrete. Mechanical behavior. Flow number. Permanent deformation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Províncias geológicas que constituem o estado do Rio Grande do Sul ....	29
Figura 2 - Esquema da morfologia dos agregados.....	31
Figura 3 - Grau de desempenho sugerido para ligantes asfálticos por região do Brasil .....	35
Figura 4 - Usinas de asfalto licenciadas no estado do RS .....	37
Figura 5 - Pavimento: constituição, ações, solicitações e respostas.....	38
Figura 6 - Domínios típicos do comportamento mecânico de materiais asfálticos em função das deformações e da temperatura.....	39
Figura 7 - Domínios típicos do comportamento mecânico dos materiais asfálticos em função das deformações e do número de ciclos .....	40
Figura 8 - Domínios típicos do comportamento de concretos asfálticos convencionais .....	40
Figura 9 - Resposta de um material viscoelástico sob tensão controlada.....	42
Figura 10 - Modelos físico-matemáticos analógicos para misturas asfálticas .....	45
Figura 11 - Representação do modelo 2S2P1D no plano Cole-Cole .....	47
Figura 12 - Tensão versus deformação no ensaio de RT .....	50
Figura 13 - Definição de tenacidade.....	50
Figura 14 - Definição do índice de tenacidade .....	51
Figura 15 - Resultado típico do teste de IL-SCB ilustrando os parâmetros derivados da curva de deslocamento versus carga.....	52
Figura 16 - Tipos de deformação permanente em pavimentos flexíveis .....	53
Figura 17 - Influência dos agregados e do ligante nos defeitos de misturas asfálticas .....	56
Figura 18 - Fatores que afetam a resistência à deformação permanente das camadas de concreto asfáltico .....	62
Figura 19 - Deformação permanente durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN.....	64
Figura 20 - Fluxograma da pesquisa.....	71
Figura 21 - Resumo dos materiais coletados .....	72
Figura 22 - Modelo genérico da abreviatura das misturas asfálticas.....	73
Figura 23 - Procedimento de coleta das misturas asfálticas .....	74
Figura 24 - Equipamento <i>AIMS 2</i> .....	76
Figura 25 - Preparação das amostras .....	77
Figura 26 - Fluxograma cálculo da porosidade FAD .....	80
Figura 27 - Misturador <i>Infratest testing system</i> .....	82
Figura 28 - CGS, computador de aquisição de dados e amostras da dosagem Superpave.....	82
Figura 29 - Corpos de prova antes a após o faceamento .....	83
Figura 30 - Prensa UTM 25 e corpo de prova durante ensaio em duas direções ....	85
Figura 31 - Ensaio RT por compressão diametral .....	86
Figura 32 - Tela de entrada de dados .....	87
Figura 33 - Interface gráfica do ensaio.....	87
Figura 34 - Ensaio de módulo dinâmico na temperatura de -10°C.....	90
Figura 35 - Corpo de prova antes e após a realização do ensaio .....	91
Figura 36 - Medida ATR com treliça metálica.....	94
Figura 37 - Mapa de localização das usinas amostradas.....	95
Figura 38 - Localização das pedreiras com coleta de material.....	97

Figura 39 - Localização dos trechos monitorados .....	106
Figura 40 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura da U1-DAER-FXA-50/70.....	111
Figura 41 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho mistura U2-DAER-FXB-50/70.....	111
Figura 42 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U2-DNIT-FXC-60/85 .....	112
Figura 43 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U2-DNIT-FXC-65/90 .....	112
Figura 44 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U3-DAER-FXB-ECO.....	113
Figura 45 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U4-DNIT-FXC-50/70 .....	113
Figura 46 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U4-DNIT-FXB-50/70.....	114
Figura 47 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U5-DNIT-FXB-60/85.....	114
Figura 48 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U5-DNIT-FXB-ECO.....	115
Figura 49 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U5-DAER-FXB-ECO.....	115
Figura 50 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U6-DNIT-FXC-60/85 .....	116
Figura 51 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U7-DNIT-FXC-60/85 .....	116
Figura 52 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U8-DNIT-FXB-50/70.....	117
Figura 53 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U8-DNIT-FXC-50/70 .....	117
Figura 54 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U9-DNIT-FXC-60/85 .....	118
Figura 55 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U9-DNIT-FXC-TLAF.....	118
Figura 56 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U10-DNIT-FXC-50/70 .....	119
Figura 57 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U11-DAER-FXA-50/70.....	119
Figura 58 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U12-DAER-FXB-60/85.....	120
Figura 59 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U12-DAER-FXC-60/85 .....	120
Figura 60 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U13-DNIT-FXB-50/70.....	121
Figura 61 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U14-DNIT-FXC-50/70 .....	121
Figura 62 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U14-DNIT-FXB-50/70.....	122
Figura 63 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U14-DNIT-FXC-60/85 .....	122
Figura 64 - Resultados de módulo de resiliência a 25°C para todas as misturas...	126

Figura 65 - Isoterma de $ E^* $ a 21°C .....	129
Figura 66 - Isoterma de $\phi$ a 37°C.....	130
Figura 67 - Isócrona de $ E^* $ a 10,0Hz .....	131
Figura 68 - Isócrona de $\phi$ a 10,0Hz.....	132
Figura 69 - Comparação das linhas de tendência lineares das curvas $\log [a(T)]$ para todas as misturas (@21°C) .....	134
Figura 70 - Espaço Cole-Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a mistura U13-DNIT-FXB-50/70.....	135
Figura 71 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a mistura U13-DNIT-FXB-50/70.....	136
Figura 72 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a mistura U9-DNIT-FXC-TLAF.....	137
Figura 73 - Espaço Cole Cole, para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D.....	138
Figura 74 - Diagrama de Black para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D.....	139
Figura 75 - Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas (@ 20°C) .....	141
Figura 76 - Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas (baixas frequências) (@ 20°C).....	142
Figura 77 - Curvas mestras de ângulo de fase para todas as misturas (@ 20°C) ..	143
Figura 78 - Curvas mestre do módulo complexo (esquerda) e ângulo de fase (direita) para Tref 21°C.....	144
Figura 79 - Relação entre módulo dinâmico @25°C 10Hz versus MR @25°C .....	145
Figura 80 - Inferência à deformação permanente à 37°C das misturas, em escala loglog.....	145
Figura 81 - Inferência à deformação permanente à 54°C das misturas, em escala loglog.....	146
Figura 82 - Resultados de RT para todas as misturas .....	150
Figura 83 - Comparação entre os parâmetros adicionais obtidos no ensaio de RT	151
Figura 84 - <i>Flow Number</i> das misturas estudadas com os limites mínimos propostos por Nascimento (2008) e Bastos et al. (2017) .....	153
Figura 85 - Correlação de FN, a 60°C, com a proporção AG para todas as misturas com CAP 50/70 .....	156
Figura 86 - Influência do AG para misturas de mesma britagem e tipo de ligante ..	157
Figura 87 - Correlação de FN, a 60°C, com a porosidade FAD para as misturas com CAP 50/70.....	158
Figura 88 - Influência da FAD para misturas de mesma britagem e tipo de ligante	158
Figura 89 - Correlação <i>Flow Number</i> com a relação $E^*/\sin\phi$ a 54°C, na frequência de 1Hz.....	159
Figura 90 - Ranking do $E^*/\sin\phi$ a 54°C, na frequência de 1Hz, comparando com o FN e com a variação de teor de ligante .....	160
Figura 91 - Importância dos preditores no modelo de regressão linear múltipla para o FN considerando todas as misturas .....	162
Figura 92 - Importância dos preditores no modelo de regressão linear múltipla para o FN, considerando todas as misturas e FN máximo de 2001 ciclos .....	163
Figura 93 - Importância dos preditores no modelo de regressão linear múltipla para o FN, para misturas com CAP 50/70.....	164
Figura 94 - Evolução do ATR em função do tráfego .....	167
Figura 95 - Emenda construtiva na trilha de roda externa.....	168

Figura 96 - Relação ATR/N acumulada para todos os trechos monitorados .....	169
Figura 97 - Relação ATR/N acumulada sem as misturas U2-DAER-FXB-50/70 e U3-DAER-FXB-ECO .....	170
Figura 98 - Relação ATR/N por período para todas as misturas .....	171
Figura 99 - Relação ATR/N por período sem as misturas U2-DAER-FXB-50/70 e U3-DAER-FXB-ECO .....	171
Figura 100 - Relação ATR/N acumulado e <i>Flow Number</i> .....	173
Figura 101 - Trecho sem ATR (esquerda) e com ATR (direita) .....	176
Figura 102 - Ensaio de FN com confinamento .....	177

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos agregados para utilização em concretos asfálticos...	30
Tabela 2 - Limites de classificação dos parâmetros do <i>AIMS 2</i> .....	32
Tabela 3 - Valores de PG dos ligantes de pesquisas realizadas no RS .....	35
Tabela 4 - Critérios de <i>FN</i> para diferentes níveis de tráfego da literatura .....	65
Tabela 5 - Quantidade de amostras por ensaio .....	73
Tabela 6 - Quantidades mínimas de partículas para ensaios no sistema <i>AIMS 2</i> .....	76
Tabela 7 - Fatores de correção do teor de ligante para asfalto borracha .....	78
Tabela 8 - Peneiras de controle do Método Bailey para misturas de comportamento gráúdo .....	79
Tabela 9 - Peneiras de controle do Método Bailey para misturas de comportamento miúdo .....	79
Tabela 10 - Parâmetros corpos de prova a serem ensaiados .....	83
Tabela 11 - Tempo mínimo para o equilíbrio da temperatura dos corpos de prova para ensaio de $E^*$ .....	89
Tabela 12 - Coeficiente de variação de média das propriedades de <i>FN</i> .....	93
Tabela 13 - Relação de misturas estudadas e nomenclatura utilizada .....	95
Tabela 14 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais .....	98
Tabela 15 - Resultados dos ensaios de morfologia dos agregados minerais .....	99
Tabela 16 - Ligantes asfálticos utilizados nas misturas.....	100
Tabela 17 - Propriedades dos ligantes asfálticos convencionais (CAP 50-70) .....	101
Tabela 18 - Propriedades dos ligantes asfálticos modificados (AMP 60-85).....	102
Tabela 19 - Propriedades do ligante asfáltico modificado (AMP 65-90).....	102
Tabela 20 - Propriedades dos ligantes modificados por borracha (ECOFLEX AB-08) .....	103
Tabela 21 - Propriedades do ligante asfáltico modificado (TLA FLEX) .....	103
Tabela 22 - Parâmetros volumétricos e características das misturas .....	104
Tabela 23 - Características das usinas asfálticas .....	105
Tabela 24 - Localização e características dos trechos estudados .....	108
Tabela 25 - Variações do teor de ligante e Densidade Máxima das misturas.....	110
Tabela 26 - Parâmetros das misturas dentro da especificação Bailey e resultados da porosidade FAD .....	123
Tabela 27 - Valores de módulo de resiliência a 25° .....	125
Tabela 28 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 de cada mistura .....	133
Tabela 29 - Resultados do ensaio de RT e parâmetros de Tenacidade, Energias de Fratura, IT e IF para cada amostra bem como suas médias, DP e CV de cada mistura .....	149
Tabela 30 - <i>Flow Number</i> , para cada mistura, obtido pelo Modelo Francken e seus respectivos parâmetros .....	152
Tabela 31 - Relação de variáveis analisadas nos modelos de regressão linear múltipla. .....	162
Tabela 32 - Medidas de ATR acumulado e tráfego .....	166
Tabela 33 - Proposta de critérios de <i>FN</i> para diferentes níveis de tráfego .....	175
Tabela 34 - Valores de <i>FN</i> para a mistura U3-DAER-FXB-ECO - produzida em laboratório e na usina de asfalto .....	177
Tabela 35 - Valores de <i>FN</i> sem e com confinamento .....	178
Tabela 36 - Condições do ensaio <i>Hamburgo Test</i> .....	178

Tabela 37 - Resultados do ensaio <i>Hamburgo Test</i> .....	179
Tabela 38 - Valores de FN para misturas com asfalto borracha na literatura .....	180

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\varphi$	Ângulo de fase
$\omega$	Frequência angular
$\tau$	Tempo característico
$\eta$	Viscosidade Newtoniana
$\nu_0$	Coefficiente de Poisson estático em transição
$\nu_{00}$	Coefficiente de Poisson estático
$\mu$	Coefficiente de Poisson
AASHTO	<i>American Association of Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AG	Agregado Graúdo
AIMS	<i>Aggregate Imaging Measurement System</i>
ARTESP	Agência Reguladora de Serviços Delegados de Transporte do Estado de São Paulo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	Afundamento de Trilha de Roda
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CGS	Compactador Giratório Superpave
CA	Concreto Asfáltico
CP	Corpo de Prova
CPA	Camada porosa de atrito
CREMA	Programa do DNIT para recuperação e conservação de rodovias
CV	Coefficiente de Variação
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem - RS
DMM	Densidade Máxima Medida
DMT	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EL	Especificação de Laboratório
EUA	Estados Unidos da América
FAD	Faixa de agregados dominantes
FAF	Fino do Agregado Fino
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FN	<i>Flow Number</i>
GAF	Graúdo do Agregado Fino
GEPPASV	Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária
Gsb	Massa específica aparente
Hz	Hertz
IF	Índice de Flexibilidade
IT	Índice de Tenacidade
kN	<i>Quilonewton</i>
kPa	<i>Quilopascal</i>
kgf	Quilograma Força
LMCC	Laboratório de materiais de construção civil da UFSM
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>

m	Metro
ME	Método de ensaio
mm	Milímetro
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
°C	Graus Celsius
PCP	Peneira de Controle Primário
PCS	Peneira de Controle Secundário
PCT	Peneira de Controle Terciário
PG	<i>Performance Grade</i>
PM	Peneira Média
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
PRO	Procedimento
RBV (%)	Relação betume-vazios
RPM	Rotação por minuto
RS	Rio Grande do Sul
RT	Resistência à tração
SMA	<i>Stone matrix asphalt</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavement System</i>
TER	Terminologia
TMN	Tamanho Máximo Nominal
USACE	<i>Corpo de Engenheiros do Exército Americano</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSM	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
VAM	Vazios no Agregado Mineral
Vv	Volume de Vazios

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
1.1	OBJETIVOS .....	22
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>22</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>22</b>
1.2	LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	23
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	24
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>25</b>
2.1	ESTADO DA PRÁTICA no Rio Grande do SUL – MISTURAS ASFÁLTICAS .....	25
<b>2.1.1</b>	<b>Dosagem de misturas asfálticas</b> .....	<b>25</b>
2.1.1.1	<i>Dosagem Marshall</i> .....	26
2.1.1.2	<i>Dosagem Superpave e compactador giratório</i> .....	27
<b>2.1.2</b>	<b>Materiais de composição dos concretos asfálticos</b> .....	<b>28</b>
2.1.2.1	<i>Agregados minerais</i> .....	28
2.1.2.1.1	<i>Morfologia dos agregados</i> .....	31
2.1.2.1.2	<i>Granulometria das misturas asfálticas</i> .....	33
2.1.2.2	<i>Ligantes asfálticos</i> .....	33
<b>2.1.3</b>	<b>Produção de misturas asfálticas</b> .....	<b>36</b>
2.1.3.1	<i>Usinas de asfalto</i> .....	36
2.2	COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS..	38
<b>2.2.1</b>	<b>Rigidez</b> .....	<b>41</b>
2.2.1.1	<i>Viscoelasticidade linear</i> .....	42
<b>2.2.2</b>	<b>Resistência à fadiga</b> .....	<b>47</b>
2.2.2.1	<i>Resistência à tração por compressão diametral</i> .....	48
<b>2.2.3</b>	<b>Resistência à deformação permanente</b> .....	<b>52</b>
2.2.3.1	<i>Fatores que influenciam a deformação permanente em concretos asfálticos</i> .....	55
2.2.3.1.1	<i>Influência dos agregados</i> .....	55
2.2.3.1.1.1	<i>Método Bailey</i> .....	57
2.2.3.1.1.2	<i>Metodologia Faixa de Agregados Dominantes (FAD)</i> .....	58
2.2.3.1.2	<i>Influência dos ligantes asfálticos</i> .....	59
2.2.3.1.3	<i>Influência das características da mistura</i> .....	60
2.2.3.1.4	<i>Influência das condições de campo</i> .....	60
2.2.3.2	<i>Ensaio</i> .....	63
2.2.3.2.1	<i>Parâmetro Flow Number e correlações</i> .....	63
2.2.3.2.2	<i>ATR em campo, medidas e previsão</i> .....	67
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DA PESQUISA</b> .....	<b>71</b>
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA .....	71
3.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	74
<b>3.2.1</b>	<b>Ensaio de caracterização morfológica dos agregados</b> .....	<b>74</b>
3.2.1.1	<i>Ensaio especificações brasileiras</i> .....	75
3.2.1.2	<i>Ensaio usando o sistema AIMS 2</i> .....	75
<b>3.2.2</b>	<b>Ensaio de caracterização das misturas asfálticas</b> .....	<b>77</b>
3.2.2.1	<i>Densidade máxima da mistura</i> .....	77
3.2.2.2	<i>Teor de betume</i> .....	78
3.2.2.3	<i>Granulometria das misturas</i> .....	78
3.2.2.3.1	<i>Parâmetros Bailey e FAD</i> .....	78
3.2.2.3.2	<i>Porosidade FAD</i> .....	80

3.2.3	<b>Moldagens corpos de prova .....</b>	<b>81</b>
3.2.4	<b>Parâmetros volumétricos das misturas.....</b>	<b>83</b>
3.2.5	<b>Ensaio mecânicos.....</b>	<b>84</b>
3.2.5.1	<i>Módulo de resiliência .....</i>	<i>84</i>
3.2.5.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral .....</i>	<i>86</i>
3.2.5.3	<i>Módulo Complexo.....</i>	<i>88</i>
3.2.5.4	<i>Flow Number .....</i>	<i>90</i>
3.2.6	<b>Ensaio de campo .....</b>	<b>93</b>
3.2.6.1	<i>Medidas de ATR em campo .....</i>	<i>93</i>
3.3	<b>MATERIAIS UTILIZADOS .....</b>	<b>94</b>
3.3.1	<b>Ensaio de campo .....</b>	<b>94</b>
3.3.1.1	<i>Agregados minerais.....</i>	<i>96</i>
3.3.1.2	<i>Ligantes asfálticos .....</i>	<i>100</i>
3.3.1.3	<i>Parâmetros volumétricos e características dos concretos asfálticos ...</i>	<i>104</i>
3.3.1.4	<i>Usinas asfálticas.....</i>	<i>105</i>
3.3.1.5	<i>Trechos monitorados.....</i>	<i>105</i>
4	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>109</b>
4.1	<b>CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS ENSAIADAS ...</b>	<b>109</b>
4.1.1	<b>Teor, granulometria e densidade máxima da mistura .....</b>	<b>109</b>
4.2	<b>PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....</b>	<b>124</b>
4.2.1	<b>Propriedades de rigidez das misturas .....</b>	<b>124</b>
4.2.1.1	<i>Módulo de resiliência .....</i>	<i>124</i>
4.2.1.2	<i>Módulo complexo.....</i>	<i>128</i>
4.2.2	<b>Propriedades de resistência das misturas .....</b>	<b>147</b>
4.2.2.1	<i>Resistência à tração por compressão diametral e índices correlatos ..</i>	<i>147</i>
4.2.2.2	<i>Flow Number .....</i>	<i>152</i>
4.2.2.2.1	<i>Correlações do parâmetro FN com o método Bailey e a porosidade FAD .....</i>	<i>155</i>
4.2.2.2.2	<i>Correlações do parâmetro FN com E*/semφ .....</i>	<i>159</i>
4.2.2.2.3	<i>Avaliação do FN em função dos parâmetros das misturas, ligantes e agregados .....</i>	<i>161</i>
4.3	<b>ATR EM CAMPO E ANÁLISE DE DESEMPENHO .....</b>	<b>165</b>
4.3.1	<b>Desempenho das misturas com asfalto borracha .....</b>	<b>176</b>
5	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>181</b>
5.1	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>181</b>
5.2	<b>SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>184</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>187</b>
	<b>APÊNDICE A - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO COMPLEXO.....</b>	<b>197</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No Rio Grande do Sul (RS), estado brasileiro localizado no extremo sul do país, o transporte rodoviário é responsável por 85,3% do transporte de cargas (MILANEZ, 2013). No entanto, o estado possui aproximadamente 62% das rodovias em condições regulares à péssimas, conforme relatório da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017). Esses dados expressam a importância e a necessidade de melhorias nas estradas para o desenvolvimento do estado e bem-estar da população.

A solução mais tradicional e utilizada na construção e recuperação das rodovias estaduais é a execução de pavimentos flexíveis com revestimentos asfálticos. Os defeitos mais recorrentes nesses revestimentos são o trincamento por fadiga e os afundamentos plásticos nas trilhas de rodas, estes últimos ocasionados geralmente pelo elevado volume de tráfego de caminhões somado às altas temperaturas no verão e, muitas vezes, por especificações inadequadas dos materiais constituintes das misturas.

Para a produção desses revestimentos, podem ser utilizados diversos tipos de ligantes asfálticos, desde asfaltos convencionais à modificados, diferentes faixas granulométricas e agregados minerais. Suas escolhas são influenciadas conforme a região, a condição de tráfego e a necessidade de atendimento às especificações impostas pelos respectivos órgãos responsáveis pelas rodovias: no âmbito estadual, pelo Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER) e, no federal, pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

O comportamento mecânico dessas misturas depende de diversos fatores, e, segundo Mahmoud e Bahia (2004), são as propriedades mecânicas que melhor o representam, estando mais relacionadas com o desempenho dos pavimentos em campo. Essas propriedades são expressas, normalmente, por meio de ensaios de laboratório, sendo necessárias para o dimensionamento e especificação das camadas dos pavimentos flexíveis e avaliação das alternativas em utilização.

Além disso, a engenharia rodoviária brasileira vem evoluindo e passa por um momento de atualização. Encontra-se em andamento um projeto para elaboração de um método mecanístico-empírico de dimensionamento de pavimentos asfálticos, por meio do programa Rede Temática de Asfalto, desenvolvido pelo CENPES da PETROBRAS em parceria com os principais centros de pesquisa e universidades do país, inclusive com a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Diante dessa

iminente realidade, o conhecimento das propriedades mecânicas dos materiais para pavimentação faz-se cada vez mais necessário.

Dentre os principais defeitos a serem considerados para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, a deformação permanente apresenta relevância significativa. O novo método adotará como critério de resistência à deformação permanente das camadas de concreto asfáltico o ensaio uniaxial de carga repetida e o parâmetro *Flow Number (FN)*, oriundo deste. Diante disso, faz-se necessário o estabelecimento e validação de critérios de aceitação das misturas asfálticas para diversos níveis de tráfego.

Com base nas premissas anteriores, na importância do conhecimento das alternativas em utilização no estado e na influência dos diferentes materiais disponíveis, são relevantes a avaliação e análise das propriedades mecânicas das misturas efetivamente utilizadas no estado e seu desempenho em campo. Com isso, o presente trabalho refere-se ao estudo do comportamento mecânico de diferentes concretos asfálticos, produzidos no estado do Rio Grande do Sul no período de março de 2016 a agosto de 2017, tendo como foco da presente pesquisa a deformação permanente.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico de 24 diferentes misturas asfálticas densas em utilização no estado do Rio Grande do Sul, por meio de ensaios laboratoriais, e o desempenho em campo de 15 revestimentos asfálticos quanto à deformação permanente, sob diferentes níveis de tráfego.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Como forma de complementação do objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar os Índices de Tenacidade e Flexibilidade, a Tenacidade e a Área de Energia de Fratura, obtidos por meio do ensaio de RT, a fim de verificar a

- possibilidade futura de uso dos mesmos como parâmetro de previsão de resistência à fadiga;
- b) Avaliar as misturas quanto ao atendimento dos parâmetros de granulometria propostos no método *Bailey* e efetuar o cálculo da porosidade FAD, correlacionando-os ao comportamento na deformação permanente;
  - c) Avaliar a influência da morfologia dos agregados, das propriedades dos ligantes asfálticos e das características das misturas na deformação permanente, por meio de regressão linear múltipla;
  - d) Correlacionar os resultados de *Flow Number* com os de afundamentos de trilha de roda medidos em campo e os respectivos tráfegos nos trechos monitorados;
  - e) Avaliar a viabilidade de utilização da inferência à deformação permanente, obtida por meio do ensaio de módulo complexo, correlacionando-a com os resultados de *Flow Number*.

## 1.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

No desenvolvimento da presente pesquisa, enfrentaram-se as seguintes limitações:

- a) Devido trabalhar-se com misturas coletadas em campo, dependendo do andamento das obras, alguns trechos tiveram períodos de monitoração menores dos que os planejados inicialmente;
- b) Alguns trechos sofreram intervenções após a construção, interrompendo-se a monitoração dos mesmos, já outros, não tiveram o tráfego liberado ou todas as camadas do revestimento executadas em tempo hábil para iniciar o monitoramento;
- c) Por questões de logística, foi realizado apenas um levantamento de ATR em campo a cada semestre, nem sempre respeitando rigorosamente a data prevista para a realização das leituras, no entanto, sempre considerando no cálculo do número N.

No entanto, apesar das limitações citadas, os resultados obtidos foram relevantes a fim de contribuir para o entendimento do comportamento mecânico e desempenho das misturas asfálticas densas em utilização no Rio Grande do Sul.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação está organizada em quatro capítulos, assim distribuídos:

No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica, que resume, com base na literatura nacional e internacional, os seguintes tópicos: características das misturas asfálticas utilizadas no RS e uma abordagem a respeito do estado da prática; os materiais utilizados e os métodos de dosagem. Além disso, são abordadas as propriedades mecânicas dos concretos asfálticos, os danos a que a camada de revestimento asfáltico está suscetível, especialmente quanto a deformação permanente, além da teoria para entendimento dos ensaios laboratoriais a serem empregados na previsão do comportamento mecânico das mesmas.

No Capítulo 3, é explicada a metodologia adotada no trabalho, sendo descritas as atividades de pesquisa realizadas em campo e laboratório. Também, são apresentados os materiais e equipamentos utilizados, os trechos em estudo, a sequência executiva, além das normas técnicas e pesquisas científicas que serviram de referência para a realização dos ensaios e testes executados.

No Capítulo 4, são apresentados, analisados e discutidos os resultados dos ensaios de caracterização, reologia e de resistência mecânica das 24 misturas estudadas, além do desempenho em campo quanto à resistência à deformação permanente para 15 trechos monitorados.

No Capítulo 5, são apresentadas as principais conclusões e constatações obtidas a partir do programa experimental da pesquisa realizada, além de recomendações para estudos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O presente capítulo aborda os assuntos necessários à compreensão das características das misturas asfálticas em utilização no RS, os materiais de sua composição, os métodos de dosagem, o método de seleção granulométrica Bailey e a porosidade FAD, além de o comportamento mecânico e os danos em misturas asfálticas, em especial, a deformação permanente.

### **2.1 ESTADO DA PRÁTICA NO RIO GRANDE DO SUL – MISTURAS ASFÁLTICAS**

O tipo de mistura asfáltica mais empregado no RS é o concreto asfáltico, que têm como característica uma curva granulométrica contínua e bem graduada, proporcionando um esqueleto mineral com poucos vazios devido aos agregados de dimensões menores preencherem os vazios dos maiores.

A fim de entender o comportamento das misturas asfálticas densas, é necessário o conhecimento dos critérios estabelecidos pelos órgãos rodoviários para os métodos de dosagem e especificações de materiais utilizados na sua composição, os quais estão descritos a seguir.

#### **2.1.1 Dosagem de misturas asfálticas**

O primeiro método de dosagem documentado para misturas asfálticas é conhecido como método Hubbard-Field, tendo sido originalmente desenvolvido para dosagem de misturas de areia e asfalto (BERNUCCI et al., 2010). Conforme Chaves et al. (2014), desde então, novas sistemáticas surgiram em função das mudanças ocorridas no volume de tráfego, no peso e na configuração de eixos dos veículos ao longo dos anos. Assim, o método Hubbard-Field foi substituído, em meados dos anos 1950, pelos métodos Marshall e de Hveem, sendo que o primeiro se difundiu rapidamente em escala mundial.

No entanto, durante os anos 1980, várias rodovias americanas de tráfego pesado apresentaram problemas prematuros relacionados à deformação permanente, que foram atribuídos ao excesso de ligante nas misturas. Acreditava-se que a compactação por impacto, durante o procedimento de dosagem, produzia corpos de prova com densidades distintas daquelas apresentadas pelas misturas em campo.

Essas constatações, somadas ao aumento do número de solicitações e da magnitude do carregamento, motivaram os estudos do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), entre os anos de 1987 e 1992, e um dos resultados diretos desse programa foi o método de projeto de misturas asfálticas denominado Superpave (CHAVES et al., 2014).

No RS, assim como em todo o Brasil, de modo geral, tem-se utilizado o método Marshall para dosagem de misturas, sendo o uso do método Superpave restrito a pesquisas, no âmbito de algumas universidades e centros de pesquisa.

#### 2.1.1.1 *Dosagem Marshall*

No RS, as misturas asfálticas utilizadas são dosadas pelo método de dosagem Marshall devido a disponibilidade de equipamentos, conhecimento do método e também para atender as especificações de serviço dos órgãos rodoviários, que o utilizam como referência, por meio das normas DNER-ME 043/95 (Misturas betuminosas a quente - Ensaio Marshall) e DAER/RS EL 217/01 (Ensaio Marshall para misturas betuminosas).

Esse método foi desenvolvido nos EUA pelo engenheiro Bruce Marshall, em 1939, e considera os seguintes parâmetros calculados na dosagem: Densidade aparente (Gmb), Volume de vazios (Vv), Relação Betume Vazios (RBV), Vazios Agregado Mineral (VAM), além de valores empíricos admissíveis de estabilidade e fluência. Esses parâmetros são obtidos por meio da compactação de corpos de prova por impacto, sendo a estabilidade a carga máxima suportada pelos corpos de prova, quando ocorre a ruptura, e a fluência a deformação sofrida quando o corpo de prova é submetido a uma tensão constante.

Conforme Bernucci et al. (2010), é importante considerar que a dosagem Marshall, conforme as normas utilizadas no país, embora parecidas com a da ASTM e com os procedimentos recomendados pelo Instituto de Asfalto Norte-Americano, não foram atualizadas de acordo com as mudanças ocorridas nas citadas normas estrangeiras, ao longo de revisões sucessivas, em pelo menos dois pontos importantes:

- a) a consideração da absorção de ligante pelos agregados e o uso da massa seca com superfície saturada;

b) o uso de equação para cálculo da Densidade Máxima Teórica (DMT). Na ASTM e no Instituto de Asfalto, só se utiliza a Densidade Máxima Medida (DMM), o que já leva em conta a absorção dos agregados e tem interferência nas determinações das relações volumétricas e, conseqüentemente, no teor de ligante.

Esses autores afirmam que há necessidade de se modificar as normas brasileiras de dosagem Marshall, para adaptá-las à ASTM, padrão também usado em muitos outros países. O DNIT já recomenda a utilização da DMM para o cálculo dos parâmetros, mesmo sem atualizar as normas de dosagem.

O DNIT, por meio da norma DNIT ES-031/06, apresenta os valores dos parâmetros de dosagem a serem seguidos na execução de misturas densas para camadas de rolamento e ligação. Para misturas com asfalto com adição de polímero, há a norma DNER-ES 385/99. Já as misturas produzidas para as obras sob supervisão do DAER seguem a especificação de serviço DAER-ES-P16/91.

#### 2.1.1.2 *Dosagem Superpave e compactador giratório*

O Superpave (*Superior Performance Asphalt Pavements* – Pavimentos Asfálticos de Desempenho Superior) foi concebido para auxiliar na seleção de materiais e projetos de misturas asfálticas. Esse método especifica materiais, projeta e analisa misturas asfálticas e prevê desempenho de pavimentos por meio de equipamentos de ensaios, métodos e critérios (MARQUES, 2004). No estado do RS, esse procedimento está restrito a algumas universidades devido ao alto custo dos equipamentos e desconhecimento por boa parte dos engenheiros rodoviários.

Conforme Bernucci et al. (2010), o Superpave divide em três níveis os projetos de misturas, dependendo do tráfego e da importância da rodovia. No primeiro caso, esses projetos podem estar completos após o projeto volumétrico (Nível 1), sendo os valores de tráfego (número N)  $10^6$  e  $10^7$  sugeridos como limites entre os diferentes níveis. Nos Níveis 2 e 3, ensaios baseados em desempenho são realizados para otimizar o projeto, a fim de resistir a falhas, como deformação permanente, trincamento por fadiga e por baixa temperatura.

Para o projeto de Nível 1, após a seleção dos materiais (ligantes asfálticos e agregados minerais), definem-se o teor de pó e os requisitos volumétricos da mistura. Estes constituem-se de Volume de vazios, Vazios no agregado mineral e Relação

betume vazios (MARQUES, 2004). Assim como a metodologia Marshall, para esse nível, a Superpave tem limitações de apenas considerar os parâmetros volumétricos das misturas, pois são propriedades mecânicas as que realmente se correlacionam com o desempenho da mistura, conforme Mahmoud e Bahia (2004).

Para Bernucci et al. (2010), a maior diferença entre os métodos Superpave e Marshall é a forma de compactação, pois, enquanto neste esta é feita por impacto (golpes), no Superpave, é realizada por amassamento (giros). Para isso, o equipamento utilizado na moldagem dos corpos de prova é o Compactador Giratório Superpave (CGS).

De acordo a literatura, de modo geral, os teores de ligante para as misturas dosadas pelo Superpave são menores que as dosadas pelo Marshall. Essa redução ficou entre 0,40% a 0,75% no teor para as misturas estudadas por Almeida Jr. (2015). Rossato (2015) encontrou teor de ligante inferior na ordem de 0,2% para o CAP 50-70 e 0,4% para o AMP 60-85E para as misturas dosadas no CGS em comparação ao Marshall. Nascimento (2008) também comparou os métodos e obteve teores de projeto no Superpave inferiores aos Marshall na variação de 0,1% a 0,9%. Isso se deve a maior energia de compactação que ocorre no CGS comparada à energia do Marshall, necessitando de um menor teor de ligante para atingir o volume de vazios requerido. Essa redução do teor acarreta, teoricamente, uma melhora na deformação permanente, porém pode reduzir a vida de fadiga.

## **2.1.2 Materiais de composição dos concretos asfálticos**

O concreto asfáltico é um compósito de agregados minerais e ligante asfáltico, tendo suas características e desempenho diretamente relacionados com esses materiais, os quais estão apresentados nas seções a seguir.

### *2.1.2.1 Agregados minerais*

As rochas pertencem a três grandes grupos: ígneas (ou magmáticas), sedimentares e metamórficas, sendo o comportamento mecânico delas definido pela sua mineralogia, arranjo estrutural e granulometria, cada qual com maior importância relativa conforme o tipo de rocha (OLIVEIRA; DE BRITO, 1998).

De acordo com Menegat et al. (1998), o RS pode ser dividido em quatro grandes províncias geológicas, reconhecidas a partir das características geológicas e estruturais das rochas e modelados da superfície, conforme ilustrado na Figura 1. No estado, são produzidos agregados em diversas formações geológicas, apresentando, então, diferentes características.

Figura 1 - Províncias geológicas que constituem o estado do Rio Grande do Sul



Fonte: adaptado de Porscher e Lopes (2000).

A partir da Figura 1, percebe-se que, ao norte, encontra-se o Planalto Meridional, formado por extenso platô de rochas basálticas e riódacíticas. As terras baixas, situadas no entorno da fralda do platô, apresentam coxilhas suaves e planícies fluviais, que constituem a Depressão Periférica, domínio formado por rochas sedimentares paleozóicas e mesozóicas da Bacia do Paraná.

Na porção sudeste do estado, evidencia-se o Escudo Sul-Rio-Grandense, planalto formado por rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Para Viero e Silva (2010), esse domínio está constituído por associações de rochas ígneas de composição predominantemente granítica, as quais, normalmente, são intrusivas em um conjunto de rochas metamórficas, representadas por extenso complexo de gnaisses ortoderivados, rochas máfico-ultramáficas de assoalho oceânico, xistos e mármore

de composição metapelítica. Estes, por sua vez, estão recobertos por um pacote com cerca de 5.000m de espessura de rochas sedimentares, intercaladas a rochas vulcânicas, cujas afinidades variam entre magmas básicos a ácidos na forma de lavas e rochas piroclásticas, que compõem a Bacia do Camaquã.

Na costa leste do estado, situa-se o domínio da Província Costeira, formada por um rosário de pequenas lagoas isoladas e encravadas em depósitos arenosos, de idade quaternária.

Para as misturas asfálticas densas, os agregados representam cerca de 90% a 95% em massa e de 80% a 90% do volume, bem como são responsáveis por resistir boa parte da carga imposta ao revestimento, sendo, então, fundamentais ao desempenho do pavimento. Conforme Mendes (2011), os agregados em um concreto asfáltico cumprem o papel de esqueleto da mistura e as características que lhes conferem resistência são dureza, textura superficial, angularidade, forma e sua distribuição granulométrica.

Na escolha dos agregados a serem utilizados em concretos asfálticos, além da necessidade de encaixar a mistura em faixa granulométrica especificada, as especificações do DAER e DNIT recomendam limites para os resultados dos ensaios de caracterização, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos agregados para utilização em concretos asfálticos

<b>Características</b>	<b>DNIT</b>	<b>DAER</b>
Desgaste Los Angeles (%)	≤50	≤40
Índice de forma	>0,50	-
Durabilidade (%)	<12	≤10
Equivalente de areia (%)	≥55	≥50
Lamelaridade	-	≤50

Fonte: DNIT (2006a) e DAER (1991).

Para o método Superpave, as pesquisas do SHRP deram menor atenção aos agregados, se comparado aos ligantes. As propriedades dos agregados especificadas pela norma são: angularidade dos agregados graúdos e miúdos, forma das partículas (lamelares, alongadas, entre outras) e o ensaio de equivalente de areia.

De maneira geral, esses parâmetros são atendidos para os agregados produzidos no estado, salvo casos de operação ou produção inadequada dos mesmos, que influenciam principalmente na morfologia. Essa afirmação é ratificada

por pesquisas como a de Boeira (2014), que avaliou as propriedades de agregados minerais utilizados em misturas asfálticas no RS para sete britagens, de diferentes formações geológicas do estado, sendo que todas atenderam os parâmetros normativos recomendados pelo DAER e DNIT. Além disso, o autor concluiu que os agregados de origem granítica/metamórfica, de forma geral, apresentam aumento do teor de ligante quando comparados aos de origem vulcânica e que ocorrem elevadas variações de absorção dos agregados conforme a área de exploração da rocha, com valores de 0,448% até 2,774%.

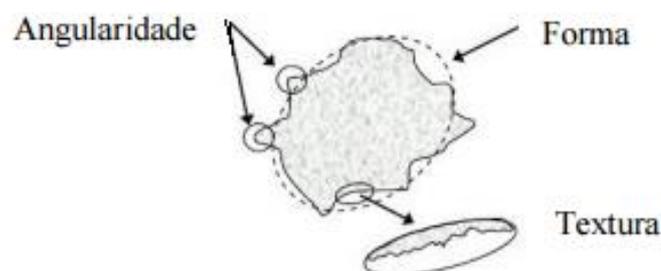
Além disso, é frequente no estado, a utilização de cal em misturas asfálticas, a fim de melhorar a adesividade e as propriedades mecânicas ou simplesmente para atender à exigência do DNIT, que tem indicado, a partir de 2009, nos projetos CREMA, a sua utilização em misturas densas, porém, sem especificar a natureza mineral da cal. O Estado produz apenas cal dolomítica, sendo que a cal calcítica necessita ser transportada dos estados do Paraná e Minas Gerais.

Às vezes, também, é utilizada areia na composição de misturas asfálticas, para enquadrar a composição granulométrica nas faixas especificadas, com predominância de utilização de areia natural.

#### 2.1.2.1.1 Morfologia dos agregados

As características morfológicas das partículas de agregados podem ser definidas em função de três propriedades principais: forma, angularidade e textura superficial, conforme ilustrado na Figura 2 (PAZOS, 2015). Conforme Gouveia (2002), essas propriedades das partículas dos agregados minerais afetam a resistência e influenciam na trabalhabilidade dos concretos asfálticos.

Figura 2 - Esquema da morfologia dos agregados



Para Orchard (1976), apud Balbo (2007), a forma dos grãos pode ser definida em termos de sua esfericidade e angularidade. A esfericidade é considerada como a relação entre o volume de uma esfera que circunscreve o grão e o volume do grão propriamente dito. A angularidade, por sua vez, está associada à presença de cantos vivos nos grãos, geralmente descrita por termos que variam de angulosos a arredondados.

Em relação à textura, esta pode ser estabelecida pelo grau de quanto a superfície do agregado é lisa ou áspera, e, de acordo com Balbo (2007), essa característica depende de diversos fatores, como tipos de minerais presentes, tamanho dos cristais que compõem a rocha, sua dureza, clivagem etc. Entre alguns termos que são utilizados para descrever a textura do grão, temos: polida, lisa, rugosa, cristalina, porosa, ondulada etc.

Os ensaios utilizados no estado do RS para a avaliação da morfologia dos agregados, indicados pelas especificações de serviço são o índice de forma (DNIT) e o índice de lamelalidade (DAER), apresentando alto grau de empirismo dos resultados. Conforme Pazos (2015), tem-se buscado metodologias mais expeditas e confiáveis para caracterizar as propriedades geométricas e de textura superficial de agregados, como os sistemas de análise por imagem, incluindo, entre eles, o *Aggregate Imaging Measurement System (AIMS)*.

O sistema *AIMS 2* fornece informações de angularidade, esfericidade, características de achatamento, alongamento e textura para os agregados graúdos, e angularidade e forma para os agregados miúdos, baseada na classificação de agregados desenvolvida por Al Rousan (2004), de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de classificação dos parâmetros do *AIMS 2*

<b>Propriedade</b>	<b>Valores-limite / classificação</b>				
<b>Forma 2D</b>	< 6,5	6,5 – 8,0	8,0 – 10,5	> 10,5	-
	Circular	Semicircular	Semialongado	Alongado	-
<b>Esfericidade</b>	< 6,0	0,6 – 0,7	0,7 – 0,8	> 0,8	-
	Achatado / alongado	Pouco esférico	Moderadamente esférico	Muito esférico	-
<b>Angularidade</b>	< 2.100	2.100 – 4.000	4.000 – 5.400	> 5.400	-
	Arredondado	Subarredondado	Subangular	Angular	-
<b>Textura superficial</b>	< 165	165 - 275	275 - 350	350 – 460	> 460
	Polido	Macio	Pouco rugoso	Moderado rugoso	Muito rugoso

Fonte: Al Rousan (2004).

#### 2.1.2.1.2 *Granulometria das misturas asfálticas*

A granulometria dos agregados pode ser considerada a sua mais importante propriedade e afeta as principais características das misturas asfálticas, entre elas: rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga, atrito e resistência à umidade (ROBERTS et al., 1996).

Porém, assim como ocorre em outras regiões do Brasil, no estado do RS, as proporções de agregados nas misturas asfálticas são selecionadas por tentativa e erro, enquadrando em uma faixa de trabalho de referência das especificações técnicas dos órgãos rodoviários. Mendes (2011) disserta que, para projetistas menos experientes, torna-se um método difícil, onde não se garantem as características desejadas e nem se aproveita da contribuição do esqueleto mineral sobre as características mecânicas das misturas asfálticas.

No meio acadêmico, tem-se estudado métodos racionais para a definição de avaliação e especificação das curvas granulométrica de uma mistura asfáltica: o método Bailey e a metodologia de Faixa de Agregados Dominantes (FAD).

As versões anteriores do Superpave estabelecem alguns itens de controle para escolha da curva granulométrica, destacando-se o gráfico de potência  $n=0,45$  e os pontos de controle. Conforme pesquisa bibliográfica elaborada por Gouveia (2006), a escolha dos métodos de controle de granulometria no Superpave foi bastante controversa e não parece claro o motivo ou motivos que levaram a zona restrita a tornar-se parte das especificações. A razão principal dessas dúvidas e controvérsias é que muitas misturas densas, as quais transpõem a zona restrita, apresentaram bom desempenho em campo. A versão mais atual da norma para misturas asfálticas, pelo método Superpave, AASHTO M 323- 13 – *Superpave Volumetric Mix Design*, não faz mais referência à zona de restrição como nas versões anteriores.

#### 2.1.2.2 *Ligantes asfálticos*

O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoelástico, impermeável à água e pouco reativo. No Brasil, utiliza-se a denominação CAP para designar esse produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas (BERNUCCI et al., 2006).

A fim de melhorar o desempenho dos ligantes, os cimentos asfálticos de petróleo podem ser modificados por meio da adição de asfaltos naturais como o Asfalto de Trinidad ou ainda por adição de fileres (cimento, cal, sílica, etc), fibras (fibra de vidro, asbestos, fibra de celulose e fibras poliméricas) ou por enxofre elementar. A modificação mais empregada é por meio do uso de polímeros (SBR, SBS, EVA, RET, etc.) e por borracha moída de pneu (LEITE, 1999).

Há uma predominância no RS da utilização do CAP 50/70, porém, devido a insucessos nas rodovias e aumento do volume de tráfego, é crescente a utilização de ligantes modificados, principalmente em rodovias concedidas à iniciativa privada e outras com elevado tráfego.

A especificação brasileira de ligantes asfálticos é baseada em ensaios empíricos, sem análise de desempenho. Tradicionalmente, nos projetos de dosagem, os ligantes asfálticos são escolhidos conforme experiência do projetista, muitas vezes, sem uma análise adequada do clima e do tráfego onde o material será empregado. Isso pode se dar pelo fato de as normas brasileiras para dosagem não especificarem critérios para escolha do tipo de ligante, diferentemente do Superpave, em que o ligante a ser utilizado deve ser definido com base em ensaios de desempenho, selecionando-o a partir do clima do local onde se pretende aplicá-lo. Por exemplo, para um ligante classificado com grau de desempenho (PG) 64-22 significa que suas propriedades físicas de alta e baixa temperaturas são aceitáveis até 64°C e até -22°C, respectivamente. Além disso, são feitas considerações adicionais em termos de volume de tráfego e tempo de aplicação de carga para se especificá-lo.

Cunha, Zegarra e Fernandes Jr. (2007) revisaram o PG para ligantes asfálticos brasileiros em todos os estados do país, adotando-se a mesma base de dados usada por Leite e Tonial (1994), que utilizaram temperaturas do ar obtidas das Normais Climatológicas de 1961 a 1990, com dados de 209 estações climatológicas brasileiras. Porém, os autores aplicaram as novas equações desenvolvidas pelo Superpave, a fim de que os modelos melhores representassem as condições reais de temperatura do pavimento. Foi, então, encontrado o grau de desempenho sugerido para ligantes asfálticos em cada estado do Brasil, conforme Figura 3.

Figura 3 - Grau de desempenho sugerido para ligantes asfálticos por região do Brasil



Fonte: Cunha, Zegarra e Fernandes (2007).

Esse estudo sugere a utilização de ligantes asfálticos com PG 70-10 ou maior no RS. No entanto, conforme resultados de pesquisas recentes no estado, apresentados na Tabela 3, os ligantes do tipo CAP 50/70 não atingem essa classificação.

Tabela 3 - Valores de PG dos ligantes de pesquisas realizadas no RS

Fonte	Tipo de ligante	Resultado PG
Bruxel (2015)	CAP 50/70	58-16
Silveira (2015)	CAP 50/70	58-16
Silveira (2015)	CAP 50/70	64-16
Barros (2017)	AMP 60-85	70 - XX*
Barros (2017)	CAP TLA 30/45	70 - XX*
Barros (2017)	AB-8	76 - XX*
Barros (2017)	CAP 30/45	70 - XX*
Almeida Júnior et al. (2018)	CAP 50/70	58-28
Almeida Júnior et al. (2018)	AMP 60-85	70-22

(\*) Não foram realizados os ensaios à baixa temperatura

Fonte: Do autor (2018).

Também, devido ao período de inverno no estado, com temperaturas abaixo de 10°C, além de trechos que demandam longas distâncias de transporte, uma

alternativa que começou a ser utilizada nos últimos anos é a execução de misturas mornas. Conforme Cavalcanti (2010), essa tecnologia permite a diminuição da viscosidade ou da tensão superficial do asfalto em temperaturas mais baixas que a das misturas quentes, ocasionando uma melhoria na trabalhabilidade e compactação. Além disso, reduz o consumo de energia e a emissão de gases. Essa redução da temperatura pode ser alcançada com a adição de aditivos químicos nos ligantes, como o Evotherm™ e o Rediset™ ou aditivos orgânicos como Cecabase RT® e o Sasobit®. Também, podem ser obtidas com espuma de asfalto, que utiliza zeolitas (alumino-silicatados hidratados).

Bohn (2016), ao avaliar as propriedades de duas misturas, convencional e morna, para os ligantes CAP 50/70 e AMP 60-85, concluiu que as propriedades de resistência para as misturas convencionais e mornas tem comportamento similar. Já Barros (2017), ao avaliar três misturas densas, com CAP TLA 30/45, AMP-60/85 e CAP 30/45, e duas misturas tipo *gap-graded* com ligante tipo AB-08, concluiu que a utilização de misturas mornas ocasiona, para a maioria, uma pequena redução para os valores de MR e RT. No entanto, para os valores de *Flow Number*, com execução da mistura com ligante AMP 60/85 em que a mistura morna apresentou maior FN, de 733 ciclos em comparação a mistura convencional com valor de 350 ciclos, todas as demais misturas apresentaram redução do FN a medida em que se utilizam misturas mornas. A mistura com maior redução desse parâmetro é a com asfalto borracha e cal dolomítica, que apresentou uma redução de 274 para 94 ciclos.

Diante disso, fica evidente a necessidade de atualização do método de dimensionamento e a definição de critérios de seleção de agregados e ligantes com base em desempenho, ao encontro dos métodos já em utilização em alguns países desenvolvidos.

### **2.1.3 Produção de misturas asfálticas**

#### *2.1.3.1 Usinas de asfalto*

Existem dois tipos básicos de usina de asfalto: a de produção por batelada ou gravimétrica, que produz quantidades unitárias de misturas asfálticas, e a usina de produção contínua, cuja produção é contínua, como a própria designação classifica,

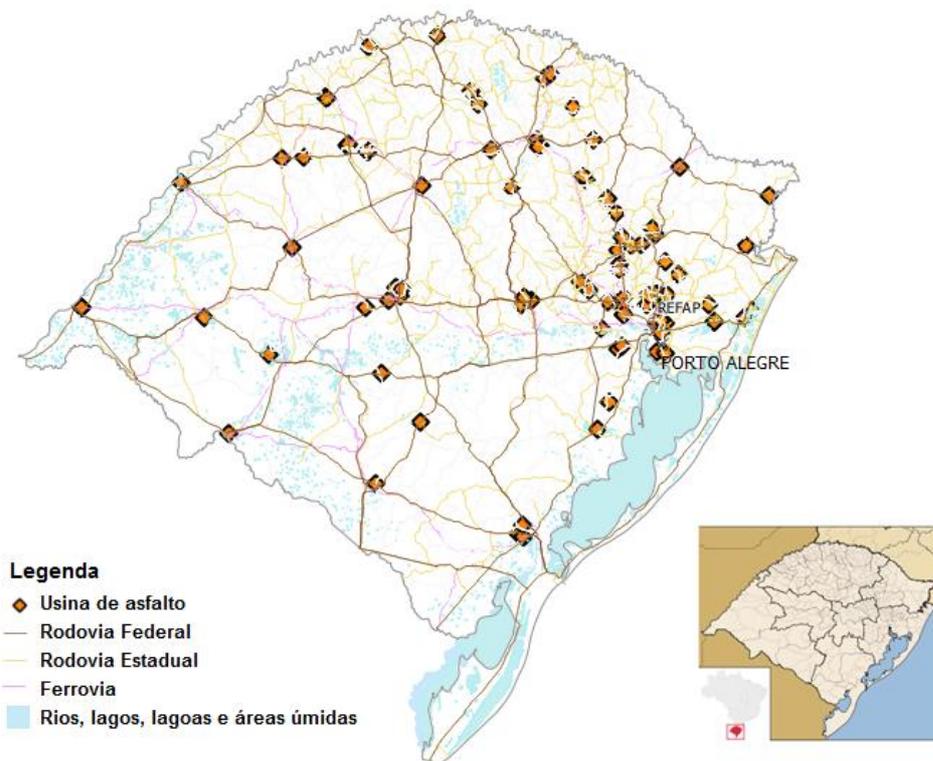
podendo ser de fluxo paralelo ou contra fluxo, de acordo com o sentido dos agregados no tambor secador (BERNUCCI et al., 2010).

A tecnologia de produção de misturas asfálticas evoluiu muito nos últimos anos, tendo esse avanço permitido a oferta de equipamentos cada vez mais produtivos e que, ao mesmo tempo, oferecem melhorias na qualidade das misturas, além da redução significativa nos custos operacionais e controle de emissão dos gases de exaustão.

Levantamento efetuado pelo Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) em 2017, vinculado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSM, mostra que o RS possuía 94 usinas de asfalto licenciadas para operação, com uma maior concentração próxima à região metropolitana de Porto Alegre e distribuídas no espaço territorial conforme Figura 4.

No estado, existem, em operação, sete empresas que fabricam usinas, desde multinacionais como a mais antiga fabricante de usinas do mundo, o Grupo Ammann, a jovens empresas nacionais como a Margui Engenharia de Equipamentos.

Figura 4 - Usinas de asfalto licenciadas no estado do RS



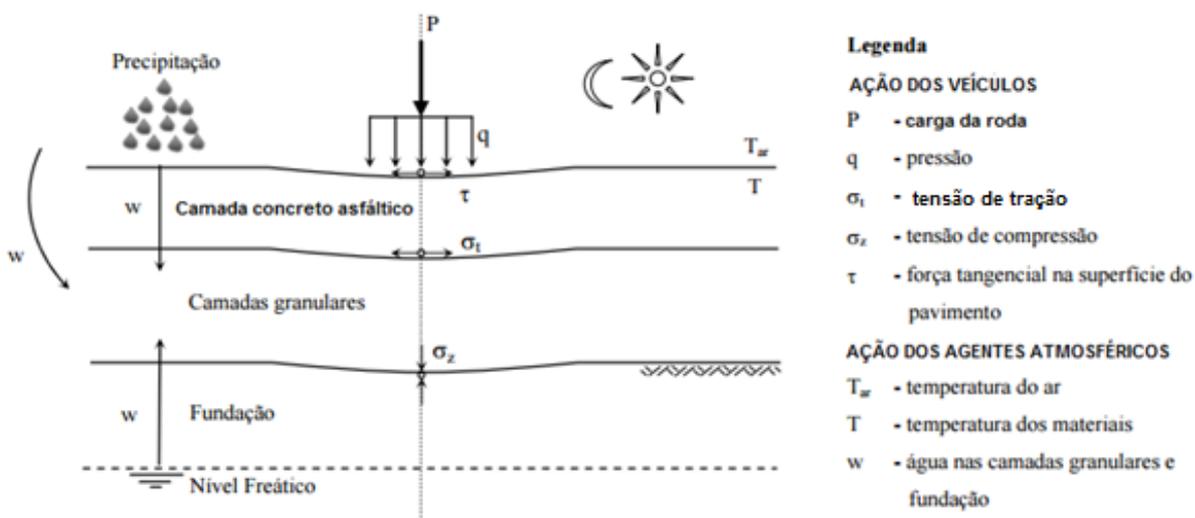
Fonte: Do autor (2018).

## 2.2 COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS

Os pavimentos são estruturas de múltiplas camadas, tendo a camada de revestimento a função de receber e distribuir, para as demais, as cargas dos veículos além de resistir a ação climática, apresentando como respostas das solicitações deformações e tensões. Na Figura 5, é apresentado um esquema da constituição de um pavimento flexível, com as principais ações, solicitações e as respectivas respostas.

O estado de tensões resultante das ações pode ser representado pelas tensões de tração ( $\sigma_t$ ) nas camadas betuminosas (asfálticas); de compressão ( $\sigma_z$ ) e de tração ( $\sigma_t$ ) nas camadas granulares e na fundação (subleito). Estas tensões apresentam valores e uma evolução dependentes das características dos materiais constituintes e das condições climáticas (FONTES, 2009).

Figura 5 - Pavimento: constituição, ações, solicitações e respostas



Fonte: Branco et al. (2005 apud FONTES, 2009, p. 11).

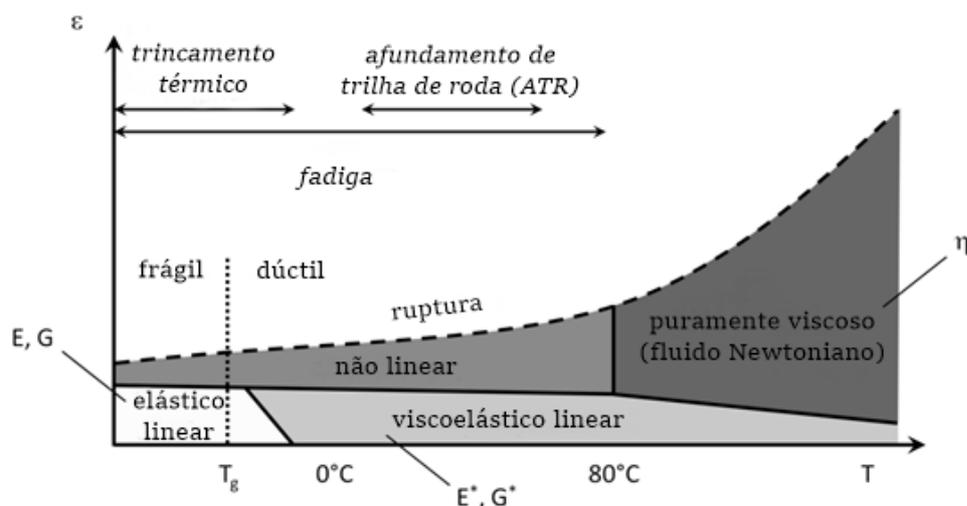
Conforme a Figura 5, ao ser submetida pelo tráfego, a camada de concreto asfáltico está essencialmente submetida à flexão, devendo resistir aos esforços de tração ( $\sigma_t$ ) nas fibras inferiores, as quais originam trincamento por fadiga. Essa camada também está submetida a esforços tangenciais ( $\tau$ ), às contrações e expansões térmicas ( $\Delta T$ ), a esforços de cisalhamento e compressão, promovendo

fenômenos de densificação por fluência, que originam deformações permanentes (MELO, 2014).

O comportamento dos materiais asfálticos e suas respostas às ações do tráfego e clima são difíceis de serem reproduzidos em laboratório devido à influência de inúmeras variáveis. Mesmo assim, busca-se, por meio de ensaios mecânicos, avaliar o comportamento mecânico das mesmas, correlacionando-os com o desempenho de campo. Para dimensionamento dos pavimentos e especificação de materiais adequados ao tráfego e clima, é necessário o conhecimento das características e do comportamento das camadas de pavimento, especialmente do concreto asfáltico.

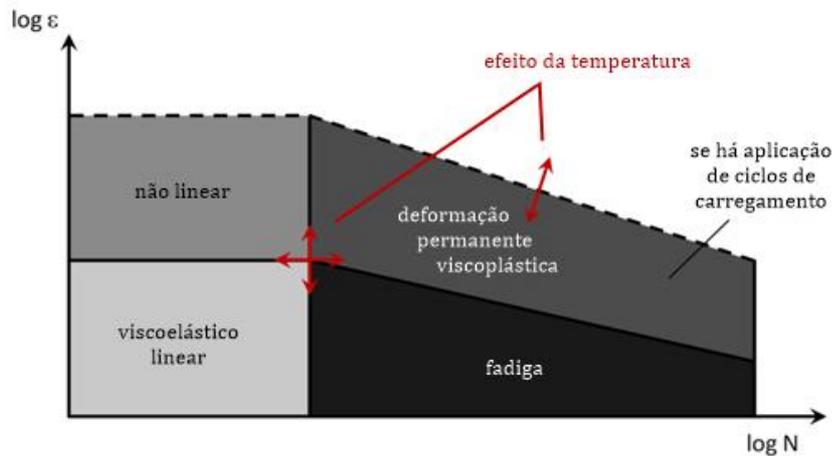
Em um nível macroscópico, o material asfáltico pode ser considerado como um material contínuo, homogêneo, isotrópico, tendo seu comportamento influenciado por três fatores: temperatura, amplitude de deformações e número de ciclos de carga. Dependendo dos valores desses fatores, diferentes domínios de comportamento mecânico podem ser definidos. Diante disso, na Figura 6, são apresentados domínios do comportamento mecânico, dependendo da amplitude de deformações ( $\epsilon$ ) e da temperatura ( $T$ ), e, na Figura 7, os diferentes domínios de comportamento para amplitude de deformação ( $\epsilon$ ) e número de ciclos ( $N$ ), para uma dada temperatura (MANGIAFICO, 2014).

Figura 6 - Domínios típicos do comportamento mecânico de materiais asfálticos em função das deformações e da temperatura



Fonte: Mangiafico (2014).

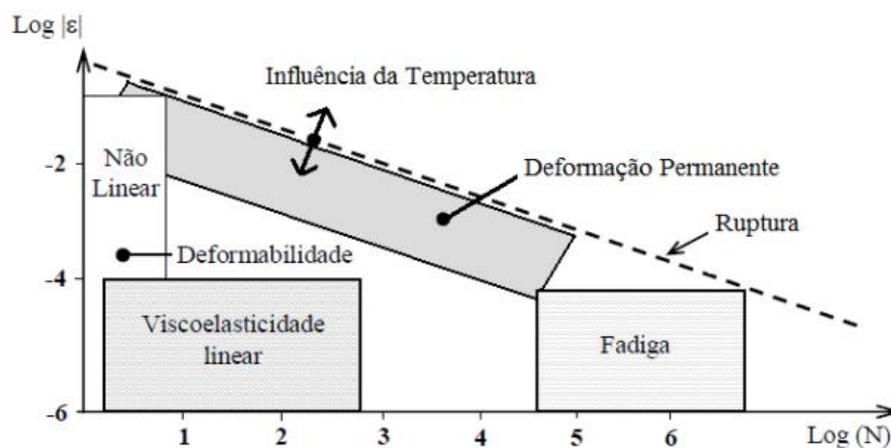
Figura 7 - Domínios típicos do comportamento mecânico dos materiais asfálticos em função das deformações e do número de ciclos



Fonte: Mangiafico (2014).

A Figura 8 apresenta os diferentes tipos de comportamento observados para misturas betuminosas, de acordo com a amplitude da deformação aplicada e a quantidade de ciclos de carga. Para um domínio de pequena deformação ( $\epsilon < 100 \mu\text{m}/\text{m}$ ) e número limitado de ciclos, os materiais betuminosos apresentam comportamento viscoelástico linear (CARDONA et al., 2015).

Figura 8 - Domínios típicos do comportamento de concretos asfálticos convencionais



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

Para entender o comportamento dos concretos asfálticos e suas respostas, é necessário o conhecimento da propriedade de rigidez dos mesmos.

### 2.2.1 Rigidez

Conforme Medina e Motta (2015), a rigidez das misturas asfálticas indica a capacidade de resistir à deformação e depende da temperatura. Assim, a deformabilidade maior ou menor do pavimento é condicionada pelas variações de temperatura do ar ou das condições meteorológicas de um modo geral. Kim (2009) disserta que a propriedade é afetada por diversos fatores, tais como: taxa de deformação, temperatura, estado de tensão, as partículas dos agregados, o tipo de ligante, os vazios na mistura, a idade da mistura asfáltica, os finos no mastigue, a água em forma líquida ou vapor e sua localização na mistura, entre outros.

De acordo com Balbo (2007), os métodos de dimensionamento de pavimentos foram, via de regra, concebidos de duas maneiras distintas: com base no desempenho observado ao longo do tempo, obtidos pelas experiências em campo (modelos empíricos), ou a partir da teoria elástica, considerada adequada para a interpretação de fenômenos físicos quantificados em campo (modelos semiempíricos e empírico-mecanicistas). Assim, um procedimento mecanístico pode considerar um simples modelo de comportamento elástico do material, sem variação do valor modular com a temperatura, até a consideração de um modelo visco-elasto-plástico dos materiais asfálticos, com variação horária de suas propriedades, em função das condições climáticas locais.

Conforme Melo (2014, p. 97):

Para casos correntes na engenharia, a teoria da elasticidade, regida pela lei de Hooke, fornece à análise mecânica uma equação independente do tempo, com parâmetros materiais determinados de forma simples. Os resultados, obtidos por esta, são satisfatórios apenas em um domínio muito limitado de aplicações. A lei de Hooke, todavia, não é capaz de interpretar precisamente fenômenos presentes em uma variedade de materiais, como, por exemplo, os materiais asfálticos em determinadas temperaturas, prestando-se apenas a uma avaliação introdutória. Nesse contexto, a viscoelasticidade se apresenta como uma teoria mais completa, capaz de representar fenômenos além daqueles modelados pela elasticidade, introduzindo, ao assunto do estudo dos corpos deformáveis, uma relação no tempo entre a história dos campos de tensões e deformações presentes no corpo, característica essa que confere a estes materiais o título de materiais com memória.

A determinação da rigidez das misturas asfálticas, realizada por meio do ensaio de Módulo de Resiliência (MR), considera um comportamento elástico linear das mesmas quando os deslocamentos considerados são os recuperáveis (resilientes),

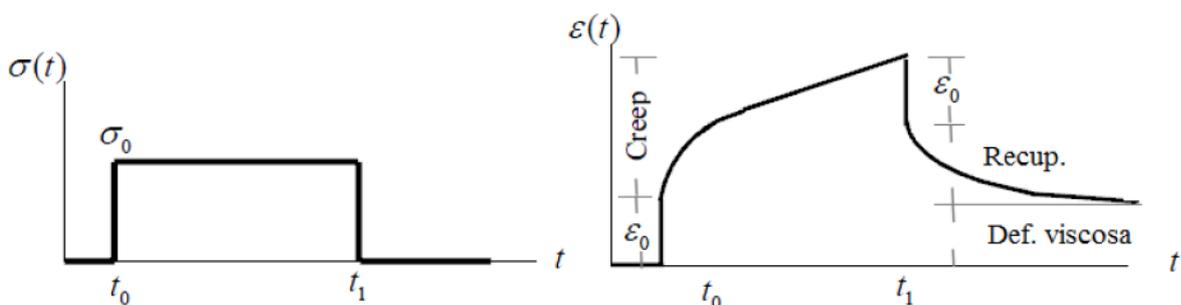
obedecendo a Lei de Hooke. No entanto, cabe ressaltar que o MR não representa um parâmetro puramente elástico para misturas asfálticas, uma vez que, no seu cálculo associado a um dado pulso de carregamento, desenvolvem-se deformações viscoelásticas, que são parcialmente contabilizadas como deformações elásticas (BERNUCCI et al., 2010).

Além disso, conforme Specht et al. (2017), o uso de uma única temperatura e uma única frequência de carga no ensaio de MR negligencia a natureza viscoelástica (dependência de tempo ou frequência) das misturas asfálticas e sua susceptibilidade à temperatura, herdada do ligante asfáltico.

### 2.2.1.1 Viscoelasticidade linear

Um material viscoelástico possui características de materiais elásticos e também de viscosos e, como tal, exibe comportamento de deformação dependente do tempo, que é manifestado por meio da fluência e relaxação, fenômenos comuns a todos os materiais que têm relação direta com o fator tempo. Quando uma tensão constante é aplicada sobre um material viscoelástico, uma resposta de deformação instantânea é observada. Em seguida, ocorre um aumento da deformação (*creep*). Ao remover o carregamento, um processo inverso ocorre: um certo nível de recuperação instantânea é seguido por uma recuperação da deformação que se estende por um certo tempo. A deformação viscosa do material, durante a aplicação do carregamento, resulta em uma deformação irrecuperável quando o carregamento é removido, conforme pode ser observado na Figura 9 (WOLDEKIDAN, 2011).

Figura 9 - Resposta de um material viscoelástico sob tensão controlada



Fonte: Woldekidan (2011).

Quando submetidos a pequenas deformações, os materiais asfálticos apresentam comportamento viscoelástico linear. A linearidade se dá quando desconsideram-se os efeitos do tempo e então a relação tensão-deformação dos materiais é, portanto, proporcional (BAHIA et al., 1999).

Se o material for viscoelástico linear, duplicar a carga aplicada resultará, conseqüentemente, na duplicação da resposta do material. Isto implica que a resposta global do material é o resultado das várias cargas que agem em conjunto e é igual à soma da resposta das várias cargas agindo independentemente no material. Esta propriedade decorre do conhecido princípio de superposição, que é assumido como válido para a maioria dos materiais lineares elásticos e viscoelásticos lineares. No entanto, se as cargas aplicadas forem grandes, no caso sob o domínio do ligante de uma mistura asfáltica, os materiais asfálticos exibem um comportamento não linear (WOLDEKIDAN, 2011).

Nesse sentido, novas pesquisa, seguindo a tendência de outros países, têm buscado obter a rigidez do concreto asfáltico pelo ensaio de Módulo Complexo, que melhor representa o comportamento viscolástico linear na camada asfáltica. Conforme Marques (2004), o desenvolvimento original desse ensaio é anterior a 1960 e foi feito pelos pesquisadores da Universidade do estado de Ohio, nos EUA. 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 e temperatura.

Em misturas asfálticas, esse parâmetro é obtido usualmente por meio de um carregamento senoidal aplicado axialmente em corpos de prova cilíndricos, confinados ou não. O procedimento é repetido para diferentes temperaturas e frequências de carregamento, com o intuito de se construir uma curva mestra que incorpore os efeitos das duas variáveis citadas, tempo e temperatura (FRANCKEN e PARTL, 1996 apud BERNUCCI et al., 2010).

Desse modo, a relação tensão-deformação, durante o carregamento senoidal contínuo, é definida pelo módulo complexo ( $E^*$ ), e o valor absoluto  $|E^*|$  é definido como módulo dinâmico, sendo a defasagem entre a aplicação de carga e a resposta da amostra o ângulo de fase da mistura asfáltica ( $\delta$ ) (NASCIMENTO, 2008).

O módulo complexo ( $E^*$ ) é composto pelas partes real ( $E_1$ ), correspondente à resposta elástica do material, e imaginária ( $E_2$ ), referente à resposta viscosa do

material, sendo utilizado para medir tanto as propriedades viscoelásticas quanto as elásticas de materiais asfálticos.

As Equações 1, 2, 3 e 4 apresentam esses parâmetros.

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (1)$$

$$E^* = E1 + iE2 \quad (2)$$

$$E1 = \frac{\sigma_0 \cos \delta}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

$$E2 = \frac{\sigma_0 \sin \delta}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

Onde:

$\delta$  = ângulo de fase

$\sigma_0$  = amplitude da tensão aplicada

$\varepsilon_0$  = amplitude da deformação

$i$  = número complexo

O ângulo de fase é um indicador das propriedades viscosas do material. Quando esse ângulo for de  $0^\circ$  ou  $90^\circ$ , o material é puramente elástico ou puramente viscoso, respectivamente (CAVALCANTI, 2010).

A partir dos resultados obtidos com o ensaio de módulo complexo, é feita uma modelagem física-matemática para que seja possível obter as propriedades viscoelásticas das misturas em frequências e temperaturas nas quais não foram ensaiadas, sem necessidade de realização de novos ensaios.

Conforme Pagliosa (2004, p. 12):

Elementos mecânicos como molas (elásticos) e amortecedores (viscosos) podem ser combinados para formar um modelo de material com propriedades viscoelásticas. Embora os modelos não contenham informações sobre os fenômenos físicos e moleculares que ocorrem, ou seja, são modelos exclusivamente fenomenológicos, eles são úteis para prever a resposta de um material sob condições de fluência e relaxação, assim como situações de carregamento complexas. Adicionalmente, fornecem uma visão da natureza geral da resposta viscoelástica.

Os modelos físico-matemáticos viscoelásticos são utilizados para demonstrar os efeitos viscosos e elásticos nos materiais viscoelásticos. Eles podem apresentar

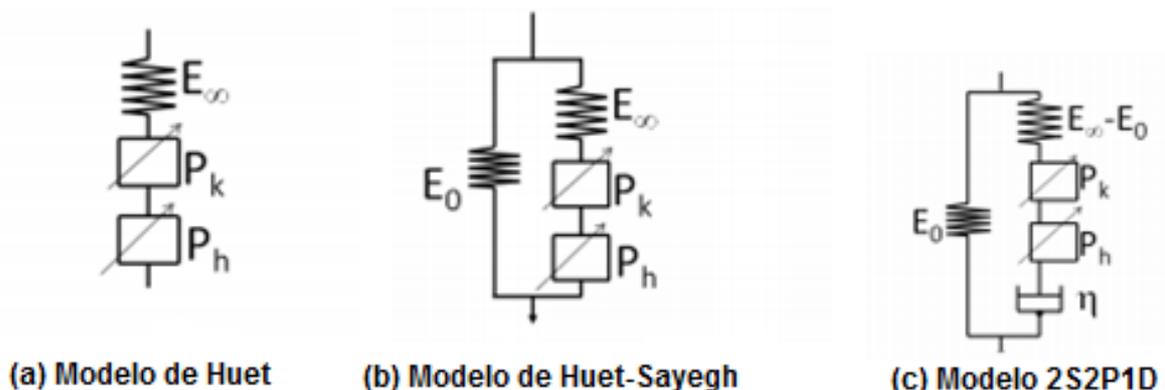
diferentes arranjos geométricos de molas e amortecedores para representar, respectivamente, as parcelas elásticas (modelos Hookeanos) e viscosa (modelos Newtonianos).

Os principais modelos com molas e amortecedores utilizados no estudo de misturas asfálticas são o de Maxwell, o de Kelvin e os generalizados de Maxwell e de Kelvin, uma vez que a mola linear representa a elasticidade instantânea do material, e o amortecedor viscoso linear, a dependência do tempo do material, ambos tanto no carregamento quanto no descarregamento.

Também, podem ser utilizados modelos analógicos que incorporam elementos parabólicos, tendo respostas características diferentes quando comparados com os amortecedores lineares (MELO, 2014). Dentre esses modelos, podem-se destacar o de Huet, de Huet-Sayegh e o modelo 2S2P1D. Este é composto pela combinação de duas molas, dois elementos parabólicos e um amortecedor.

Assim, a Figura 10 representa a evolução dos modelos analógicos com elementos parabólicos, desde o de Huet (a), a fim de representar o comportamento viscoelástico de ligantes asfálticos, passando pelo de Huet-Sayegh (b), para misturas asfálticas, até o modelo 2S2P1D (c), desenvolvido por Olard e Di Benedetto (2003) e baseado na generalização do modelo Huet-Sayegh.

Figura 10 - Modelos físico-matemáticos analógicos para misturas asfálticas



Fonte: Somé, Gaudetroy e Pavoine (2015).

Conforme Cardona et al. (2015), o modelo 2S2P1D descreve adequadamente o comportamento viscoelástico linear da maior parte dos materiais betuminosos sobre uma ampla gama de frequências e temperaturas. O modelo possui parâmetros de calibração para representação correta desse comportamento em termos de módulo,

ângulo de fase e coeficiente de Poisson para temperatura e frequência de carregamento variado. O módulo e o coeficiente de Poisson complexos são expressos pela Equação 5 e Equação 6, respectivamente:

$$E^*(\omega) = E_{00} \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(j\omega\tau)^{-k} + (j\omega\tau)^{-h} + (j\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (5)$$

$$v^*(\omega) = v_{00} + (v_0 - v_{00}) \frac{E^*(\omega) - E_{00}}{E_0 - E_{00}} \quad (6)$$

Onde:

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

$k, h$  = expoentes,  $0 < k < h < 1$ ,  $\beta$  = constante

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

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

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

$\tau$  = tempo característico, o qual varia com a temperatura  $T$ ,  $\tau(T) = a\tau(T) \tau_0$  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,  $\omega \rightarrow \infty$

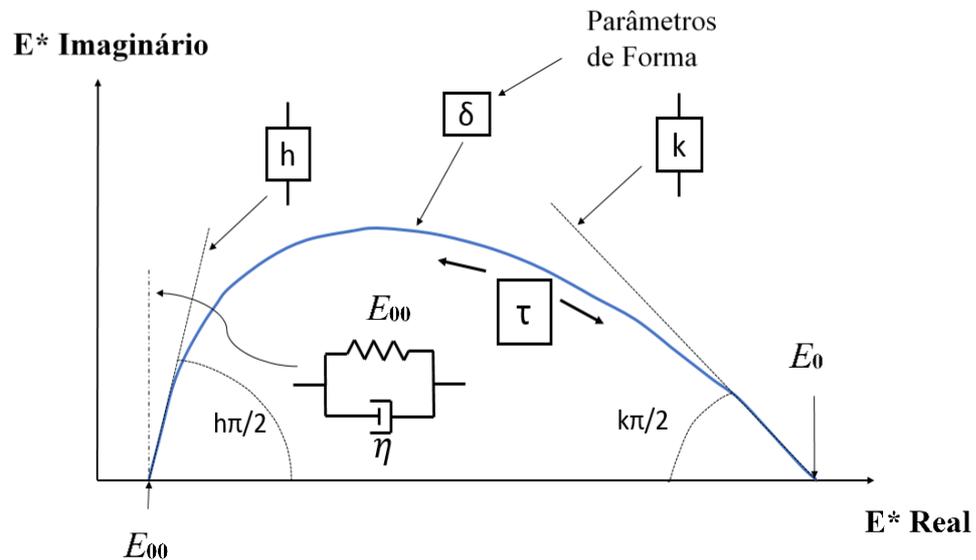
A modelagem bidimensional utiliza sete parâmetros de calibração, enquanto a tridimensional utiliza nove ao acrescentar o coeficiente de Poisson. Há também as constantes  $C_1$  e  $C_2$  de WLF (William, Landel e Ferry), responsáveis pela translação, como é demonstrado na Equação 7.

$$\log(a_T) = -\frac{C_1 (T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (7)$$

O modelo 2S2P1D permite, conforme Olard (2003), melhorar a aproximação das simulações com as curvas reais, encontradas através dos dados colhidos durante a realização de ensaios em laboratório. Após a inserção dos resultados no 2S2P1D, são geradas e ajustadas as curvas no plano Cole-Cole, diagrama de Black, curva mestra de módulo dinâmico e ângulo de fase. O Cole-Cole é a representação dos dados colhidos em escala aritmética de  $E_1$  (parte real) juntamente com  $E_2$  (perda) ou

parte imaginária, dando origem a uma curva na forma de semicírculo, conforme a Figura 11.

Figura 11 - Representação do modelo 2S2P1D no plano Cole-Cole



Fonte: Olard e Di Benedetto (2003).

O diagrama de Black permite compreender as mudanças no comportamento do material em diferentes temperaturas, relacionando o módulo dinâmico e o ângulo de fase. Também são geradas duas curvas mestras, uma de ângulo de fase, que proporciona a verificação do comportamento viscoso do material em diferentes temperaturas e frequências, e outra de módulo dinâmico, que permite a análise da variação do módulo em variadas temperaturas e frequências.

A especificação Superpave para ligantes asfálticos define o  $|G^*|/\sin\varphi$  como critério para o fator de deformação permanente, calculado em altas temperaturas. Assim, Kim (2009), propôs uma inferência para a deformação utilizando o valor de  $|E^*|/\sin\varphi$  encontrado no ensaio de módulo dinâmico, obtendo uma correlação com  $R^2$  de 0,91.

### 2.2.2 Resistência à fadiga

Quando há repetições das cargas dos veículos no pavimento, na superfície deste, é aplicada uma carga vertical de compressão, e, nas fibras inferiores da

camada de concreto asfáltico, surgem tensões de tração e compressão devido o carregamento e descarregamento repetido.

O fenômeno da fadiga, então, pode ser definido assim:

Relaciona-se ao fato de que muitos materiais, sendo sucessivamente solicitados em níveis de tensão inferiores àqueles de ruptura (para dado modo de solitação), pouco a pouco desenvolvam alterações em sua estrutura interna, que resultam na perda de características estruturais originais. Isso gera um processo de microfissuração progressiva que culmina no desenvolvimento de fraturas e, conseqüentemente, no rompimento do material (BALBO, 2007, p. 261).

A vida de fadiga de uma mistura asfáltica corresponde ao número de solicitações para que atinja determinado critério predefinido: no campo, equivale ao trincamento conhecido como “couro-de-jacaré” por exemplo; em laboratório, pode referir-se a um critério muitas vezes arbitrário, relacionado à capacidade de desempenho da amostra sob o carregamento. É influenciada por diversos fatores, tais como: características do material e do corpo de prova, condições ambientais e características do ensaio (carregamento, critério estabelecido no próprio ensaio, entre outros) (BASTOS, 2010).

A análise do trincamento por fadiga pode ser realizada por diversos modelos, sendo aqueles que buscam uma interpretação do fenômeno através de ensaios de laboratório os mais utilizados. Os dados obtidos desta forma são ajustados para se chegar a uma correlação que forneça uma previsão da vida de fadiga do material. Dentre os ensaios de laboratório para avaliar a resistência à fadiga das misturas asfálticas, o de resistência à tração por compressão diametral é o recomendado pela prática vigente no país, resultando em uma medida indireta da resistência à tração Medina e Motta (2015).

#### *2.2.2.1 Resistência à tração por compressão diametral*

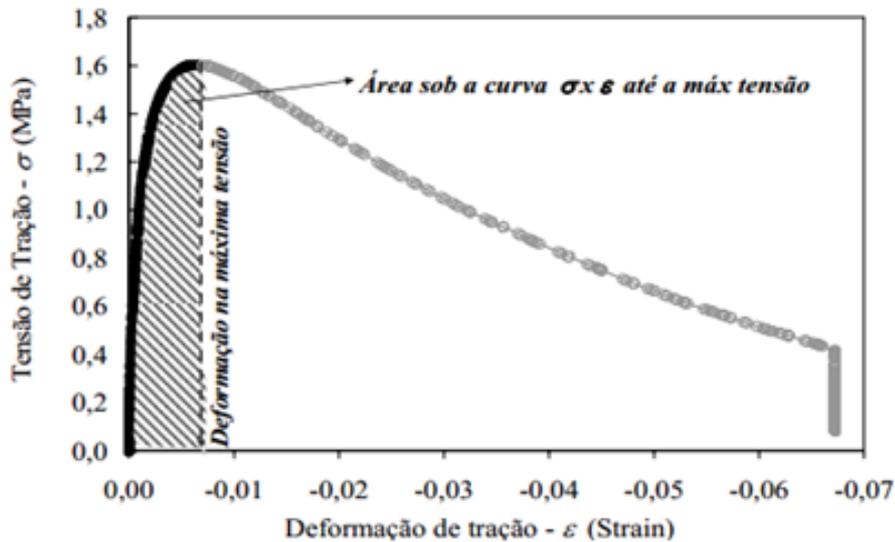
A resistência à tração indireta é determinada por meio do ensaio de compressão diametral, desenvolvido pelo professor Fernando Luiz Lobo. B. Carneiro para a determinação da resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de concreto de cimento Portland, sendo, posteriormente, adaptado para outros materiais, entre eles, os de pavimentação.

Conforme Balbo (2007), o arranjo do ensaio permite a criação de uma zona tracionada que coincide com o plano de aplicação de cargas, sendo, portanto, a zona de fratura (quando for o caso). Assim, a amostra é submetida a um estado de tensões biaxial, as seções verticais da amostra ficam sujeitas a esforços de compressão, e as seções horizontais, por sua vez, submetidas a esforços de tração.

O RT não tem se mostrado parâmetro que representa adequadamente a fadiga das misturas asfálticas, sendo substituído por novos ensaios, porém, esses, de modo geral, demandam elevados investimentos em infraestrutura e conhecimento técnico, o que muitas vezes inviabiliza a sua utilização no meio rodoviário. Diante disso, alguns autores vêm investigando parâmetros adicionais àqueles corriqueiramente determinados a partir do ensaio de RT, buscando indicadores do desempenho de misturas asfálticas em função da energia de fratura:

- a) Resistência à Tração Indireta: é calculada em função da carga máxima aplicada no momento da ruptura do corpo de prova, utilizando a teoria da elasticidade e ignorando o efeito do estado multiaxial de tensões. É o parâmetro usado nas especificações brasileiras, e o DNIT especifica um valor mínimo de: 0,65 MPa para misturas asfálticas densas com CAP 50/70 (DNIT-ES 031/2006); 0,75 MPa para misturas com asfalto borracha em camada de rolamento (DNIT 112/2009-ES); e um valor entre 0,7 e 1,2 MPa para concretos asfálticos com asfalto polímero SBS (DNER-ES 385/99). O DAER, por sua vez, não recomenda limites nas suas especificações de serviço.
- b) Energia de Fratura: Kim e Wen (2002 apud BRITO; CERATTI; VICTORINO, 2008) apresentam um estudo sobre a energia de fratura, obtida no ensaio de RT, como indicador de performance de trincamento por fadiga de misturas asfálticas, correlacionando ensaios de laboratório com o desempenho de pavimentos durante ensaios acelerados. Os autores determinaram, a partir do ensaio de RT, a tensão de tração última, a deformação horizontal central durante o pico de carregamento e a energia de fratura até a ruptura. Como resultado da pesquisa, os autores indicam que a RT e a deformação, durante o pico de carregamento, não servem como indicadores de resistência à fadiga, mas que a correlação entre energia de fratura, determinada no ensaio de RT, e o trincamento por fadiga é muito bom. O parâmetro é a área sob a curva até a deformação de tração no momento de ruptura (máxima tensão), conforme ilustrado na Figura 12.

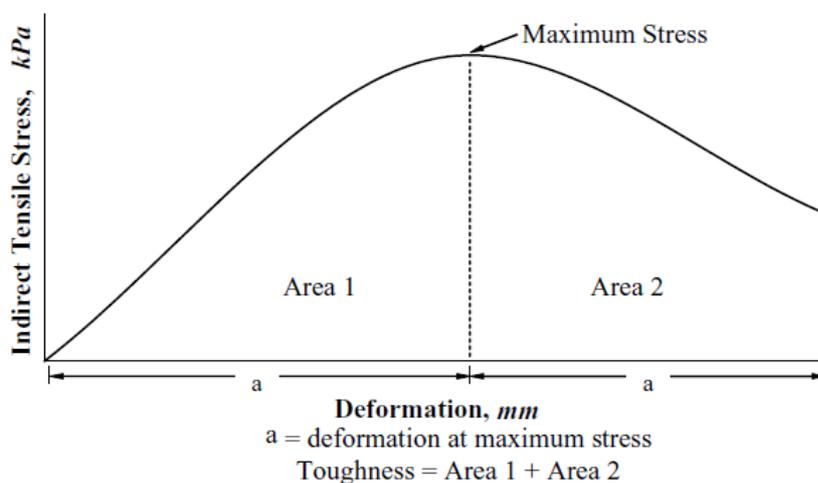
Figura 12 - Tensão versus deformação no ensaio de RT



Fonte: Brito, Ceratti e Victorino (2008).

- c) Tenacidade: é a capacidade de um material absorver energia e se deformar plasticamente antes da fratura. Uma maneira de medir a tenacidade é calculando a área sob a curva resistência à tração indireta versus deformação horizontal (Figura 13), até uma deformação do dobro da máxima tensão de tração, sendo este valor denominado de "tenacidade do material" (PUTMAN; AMIRKHANIAN, 2004). A deformação horizontal é calculada considerando a teoria da elasticidade.

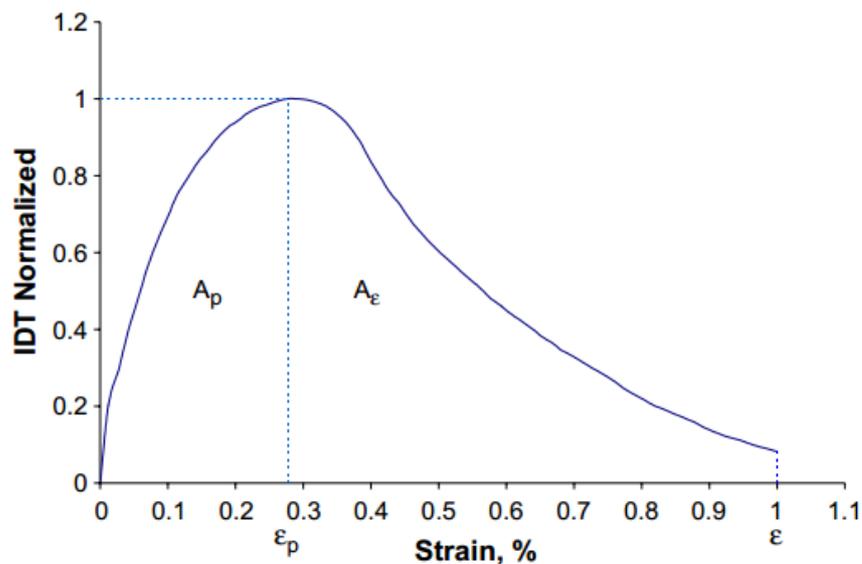
Figura 13 - Definição de tenacidade



Fonte: Putman e Amirkhanian (2004).

- d) Índice de Tenacidade (IT): é um parâmetro adimensional que descreve a tenacidade na região pós-pico, também calculado a partir dos resultados do ensaio de RT. A Figura 14 apresenta a tensão de tração indireta típica (em relação à carga de pico) e a deformação de tração indireta. O IT compara o desempenho de uma amostra com o de um material de referência perfeitamente elastoplástico (IT = 1), neste sentido, o IT é zero para um material frágil ideal sem capacidade de carga pós-pico (HUANG; SHU; LI, 2005). Calcula-se, então, a tensão indireta a partir do deslocamento vertical e da carga, utilizando-se a teoria da elasticidade. Esses autores calcularam os valores do índice de resistência à tração indireta até à deformação de tração de 0,4%, mas esse valor varia conforme o caso.

Figura 14 - Definição do índice de tenacidade



Fonte: Huang, Shu e Li (2005).

O índice de tenacidade (IT) é calculado conforme Equação 8.

$$IT = \frac{A_{\varepsilon} - A_p}{\varepsilon - \varepsilon_p} \quad (8)$$

Onde:

$A_p$  é a área sob a curva de tensão-deformação normalizada até a deformação  $\varepsilon_p$ ;

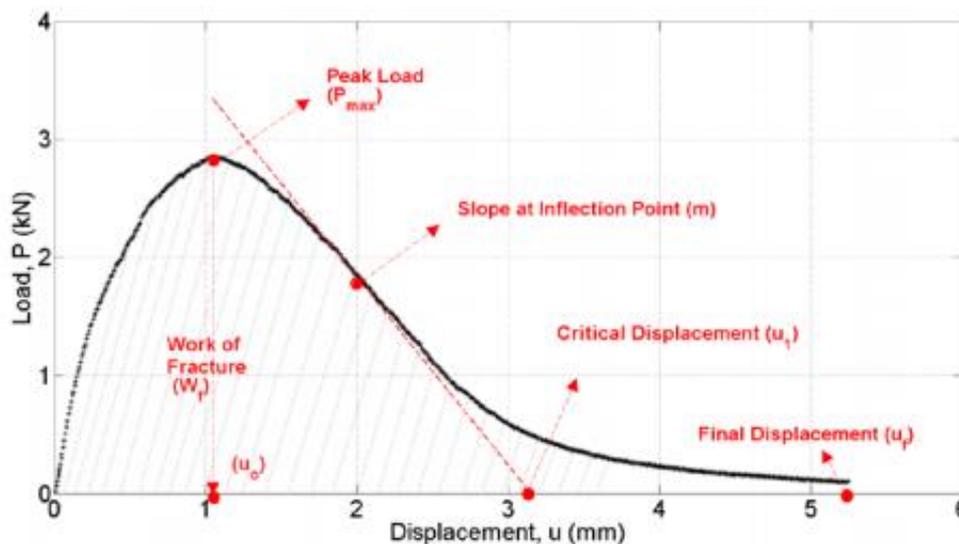
$A_{\varepsilon}$  é a área sob a curva de tensão-deformação normalizada até a deformação  $\varepsilon$ ;

$\varepsilon$  é a deformação no ponto de interesse;

$\varepsilon_p$  é a deformação correspondente à tensão máxima.

Além desses parâmetros, uma alternativa proposta neste trabalho é avaliar a viabilidade de adaptação do ensaio brasileiro para obter o Índice de Flexibilidade (IF). Esse índice foi introduzido para determinar os parâmetros de resistência à fratura de uma mistura asfáltica por meio do teste de flexão semicircular modificado de Illinois (IL-SCB), sendo calculado a partir da curva carga x deslocamento e fornecendo um critério para identificar misturas frágeis que são propensas a trincamento prematuro. Um resultado típico do teste I-FIT, a curva carga x deslocamento, é mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Resultado típico do teste de IL-SCB ilustrando os parâmetros derivados da curva de deslocamento versus carga.



Fonte: Al-Qadi et al. (2015).

O tamanho da amostra é de 50 mm de largura, 63 mm de altura e 150 mm de comprimento. Os corpos de prova são condicionados a temperatura de 25°C durante 2 horas antes do teste. Aplica-se uma taxa de carga de 50 mm/min.

Propõe-se neste trabalho efetuar os cálculos do índice para o ensaio de RT, conforme procedimento detalhado em Al-Qadi et al. (2015).

### 2.2.3 Resistência à deformação permanente

Em relação a este tema, Sousa, Craus e Monismith (1991) definem deformação permanente em materiais de pavimentação como depressões longitudinais nas trilhas

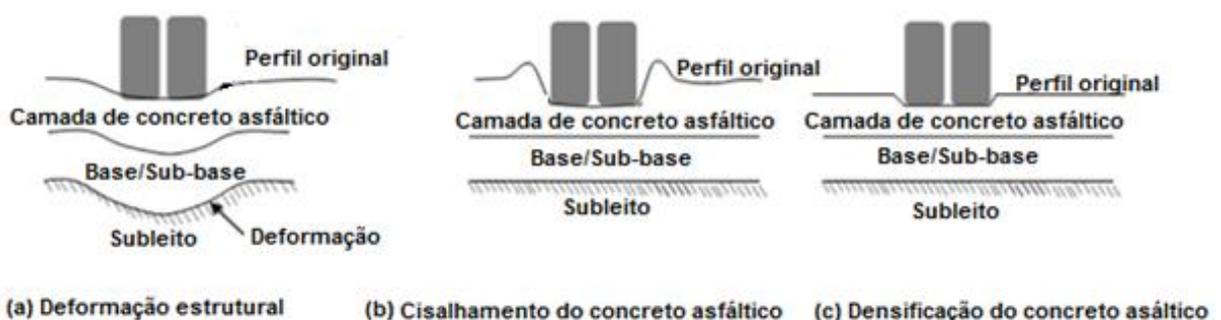
de rodas. Ela é causada por uma combinação de densificação (diminuição de volume e, portanto, aumento da densidade) e deformação de cisalhamento, podendo ocorrer em qualquer uma ou mais das camadas do pavimento, bem como no subleito. Essas depressões podem ou não estar acompanhadas de solevamento, apresentando-se na forma de afundamento plástico ou consolidação.

Muraya (2007) define a deformação permanente nas camadas de concreto asfáltico como a deformação cumulativa irrecuperável que ocorre, principalmente, em temperaturas elevadas, nas trilhas de roda, como resultado da repetição de cargas oriundas do tráfego.

De acordo com a norma DNIT 005/2003 – TER, são afundamentos por consolidação as depressões que ocorrem por densificação diferencial, podendo ser localizados quando a extensão não supera 6m, ou longitudinal, nas trilhas de roda, nos casos que exceda 6m de extensão; ou afundamentos plásticos, em que as depressões são decorrentes principalmente da fluência do revestimento asfáltico, podendo ser localizado ou longitudinal nas trilhas de roda. Em geral, neste último tipo de afundamento, há certa compensação volumétrica, com solevamento da massa asfáltica junto às bordas do afundamento.

Os três tipos básicos de deformações permanentes são ilustrados na Figura 16: deformação estrutural, cisalhamento da camada de revestimento asfáltico e densificação da camada de concreto asfáltico, respectivamente.

Figura 16 - Tipos de deformação permanente em pavimentos flexíveis



Fonte: Adaptado de Thao e Luu (2016).

Atualmente, diante do aumento do volume de tráfego e das cargas por eixo dos caminhões, tem-se percebido um aumento das deformações permanentes e afundamentos plásticos, advindos exclusivamente da camada de revestimento

asfáltico (MEDINA; MOTA, 2015). A patologia reduz a vida de serviço útil do pavimento, o conforto ao rolamento, a segurança do usuário e aumenta os custos operacionais.

A deformação permanente em trilha de roda, segundo Joliet e Mallot (2000) apud Moura (2010), é um processo que ocorre de forma simultânea, envolvendo deformações viscosas do ligante e plásticas da estrutura mineral da mistura asfáltica. Estes autores comentam que, tanto o ligante quanto o agregado exercem papel fundamental no desempenho das misturas asfálticas: o ligante com o resultado de sua consistência e reologia, e o agregado com as forças de fricção interna entre suas partículas (ângulo de atrito interno advindo do entrosamento).

A deformação permanente, em misturas asfálticas, apresenta-se em dois estágios: no primeiro, há uma variação de volume, sendo a deformação plástica, na trilha de roda, maior que a do seu redor; no segundo estágio, ocorre um deslocamento lateral da massa asfáltica devido ao cisalhamento da mesma. Embora a densificação da mistura (alteração de volume) tenha algum efeito, a deformação permanente é causada principalmente por deformações de cisalhamento repetitivas sob carga de tráfego.

Conforme Moura (2010, p. 26):

A camada asfáltica bem dosada e bem executada, no início da vida de serviço, está sujeita a uma pequena deformação permanente caracterizada mais por consolidação que por características viscosas do ligante asfáltico. Essa deformação inicial deve ser pequena ou inexpressiva. Mesmo reduzida, ela possibilita um fechamento da mistura com uma pequena redução do volume de vazios. Já a deformação permanente causada pela viscosidade do ligante asfáltico associada à lubrificação das partículas é mais pronunciada ao longo da vida de serviço da mistura asfáltica. Evidentemente que nas misturas asfálticas mal dosadas e com ligantes inadequados ao clima e ao tráfego solicitante, as deformações causadas pela lubrificação e viscosidade podem ser importantes já no início da vida de serviço. Camadas asfálticas mal executadas também poderão rapidamente mostrar problemas de deformação permanente nos primeiros meses de abertura ao tráfego, seja por consolidação, seja por fluência.

Medina e Mota (2015) apresentam várias sugestões propostas por outros pesquisadores para minorar esse defeito, melhorando a dosagem das misturas, tais como: escolher adequadamente o esqueleto pétreo, utilizando o método Bailey, a fim de ajustar a composição granulométrica; selecionar agregados angulosos e com textura rugosa; evitar o uso de areia natural; escolher o ligante de acordo com a temperatura máxima esperada para o pavimento, eventualmente sendo necessário o

uso de ligante modificado; selecionar o teor de ligante, de forma a obter um volume de vazios suficientes para prevenir exsudação e uma possível pós-compactação pelo tráfego; submeter as misturas, durante a dosagem, a ensaios de deformação permanente.

Há também a metodologia de Faixa de Agregados Dominantes (FAD), para escolha de faixas granulométricas, proposta por Kim (2006), com propósito de avaliar a formação do esqueleto pétreo quanto à resistência à deformação permanente.

Apesar de a deformação permanente poder resultar da influência de todas as camadas do pavimento, o presente trabalho avalia apenas a da camada de revestimento asfáltico, sendo, então, necessário o entendimento dos fatores e propriedades dos materiais que influenciam na resistência dos concretos asfálticos a este tipo de dano.

### *2.2.3.1 Fatores que influenciam a deformação permanente em concretos asfálticos*

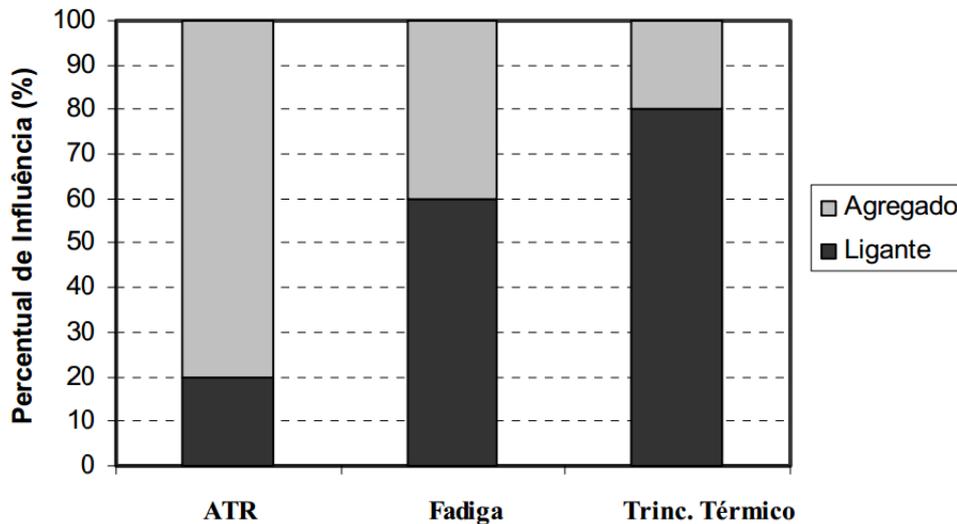
Para Sousa, Craus e Monismith (1991), os principais fatores que afetam a resistência à deformação permanente em misturas asfálticas são as características dos agregados, ligantes asfálticos e da própria mistura, além das condições de campo.

#### *2.2.3.1.1 Influência dos agregados*

Para Roberts et al. (1996), é consenso entre os especialistas que a deformação permanente em trilha de roda é a propriedade mais afetada pelos agregados. De acordo com a FHWA – *Federal Highway Administration* (2002), os agregados respondem por 80% da resistência à deformação permanente e os ligantes, apenas 20% (Figura 17).

De acordo com a literatura, as características mais importantes dos agregados na influência à resistência à deformação permanente são: textura superficial, graduação, forma e tamanho dos agregados.

Figura 17 - Influência dos agregados e do ligante nos defeitos de misturas asfálticas



Fonte: FHWA (2002).

Para Sousa, Craus e Monismith (1991), são desejáveis graduações de agregados densos a fim de mitigar os efeitos da deformação permanente em camadas de concreto asfáltico. Quando compactada adequadamente, a mistura com uma graduação de agregado densa e contínua tem menos vazios e mais pontos de contato entre partículas de agregado que as misturas abertas. A textura do agregado também é importante, e uma textura áspera é requerida, particularmente, em camadas mais grossas ligadas ao asfalto em climas mais quentes. As misturas feitas a partir de agregados angulares (obtidos por esmagamento) são mais estáveis que as obtidas de agregados arredondados.

Para utilização em misturas asfálticas, a forma recomendada é a cúbica, sendo as partículas achatadas e alongadas indesejáveis para esse caso. Já as planas e alongadas frequentemente tendem a ficar apoiadas com suas faces planas quando compactadas, o que resulta em uma mistura com menores vazios do agregado mineral. Essas partículas de agregados apresentam maior superfície específica que as de forma cúbica, o que leva, necessariamente, a consumos maiores de asfalto (PAZOS, 2015).

Davis (1988 apud MAHMOUD; BAHIA, 2004), concluiu que a utilização de um tamanho de agregado máximo maior (cerca de dois terços da espessura da camada) é benéfica na redução da propensão à deformação permanente de misturas sujeitas a elevadas pressões dos pneus.

A utilização de quantidades elevadas de areia natural ou agregados não britados ocasionam misturas mais suscetíveis ao afundamento por trilha de roda, devido à forma dos grãos, normalmente arredondadas (ROBERTS et al., 1996). Essas partículas arredondadas possuem melhor trabalhabilidade e requerem menor esforço de compactação para se atingir a densidade necessária, porém, essa facilidade de se compactar pode continuar a densificar a mistura sob ação do tráfego, causando deformação permanente (PAZOS, 2015).

Schuster (2016), ao avaliar a influência da areia natural nas propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica, concluiu que porcentagens acima de 3% de areia mostram-se significativas na redução da resistência a deformação permanente tendo como parâmetro o FN. Quando os percentuais atingem 4% de adição, a taxa de decréscimo do número de ciclos para atingir a zona terciária e a ruptura por cisalhamento a volume constante aumenta rapidamente, levando as misturas com mais areia acrescida a deformarem-se precocemente quando comparadas a misturas sem areia. Foi possível observar que a partir de percentuais de areia acima de 4% a mistura é extremamente comprometida frente ao afundamento de trilha de roda.

Já a adição de cal em misturas asfálticas, além de melhorar a adesividade agregado-ligante, enrijece o ligante asfáltico e a própria mistura, tornando-a mais resistente às deformações permanentes (LITTLE; EPPS; SEBAALY, 2006).

Existem alguns métodos para a escolha adequada do esqueleto pétreo, durante o processo de dosagem das misturas, com o objetivo de alcançar uma mistura mais resistente à deformação permanente: o método Bailey e a Porosidade FAD.

#### 2.2.3.1.1.1 Método Bailey

Em contraponto aos tradicionais métodos de escolha da granulometria das misturas asfálticas, que consideram as características dos agregados utilizados de forma indireta e por tentativas, surgiu o método Bailey para proporcionamento dos agregados, propondo um intertravamento das partículas através de uma graduação contínua e balanceada (MARQUES; MENDES, 2012).

O método está diretamente ligado às características de compactação de cada fração de agregado da mistura, com os vazios no agregado mineral e com os vazios com ar da mistura. Permite-se, então, selecionar uma estrutura de agregados de uma

mistura buscando maior intertravamento dos agregados graúdos e assegurando a resistência à deformação permanente (NASCIMENTO, 2008).

A proporção AG do método é o fator mais importante para a seleção da mistura, uma vez que sua redução aumenta a compactação da porção de agregado fino, ao reduzir o número de partículas passantes pela peneira de controle PM, que são necessárias para limitar a compactação das partículas maiores de agregado miúdo (NASCIMENTO, 2008).

Quando o valor de AG se encontra abaixo da faixa recomendada, as misturas resultantes são susceptíveis à segregação, além de precisar de uma estrutura resistente de agregados miúdos para atender às especificações volumétricas solicitadas. Nos casos em que a fração AG atinge valores próximos de 1,0, os vazios no agregado mineral (VAM) também aumentam, uma vez que as partículas passantes pela peneira de controle PM tendem a controlar o esqueleto do agregado graúdo. Assim, altos valores de AG resultam em misturas que apresentam dificuldade de compactação, devido à forma de sua curva granulométrica (MENDES, 2011).

#### 2.2.3.1.1.2 Metodologia Faixa de Agregados Dominantes (FAD)

A metodologia Faixa de Agregados Dominantes foi proposta por Kim (2006), baseada nos conceitos da mecânica dos solos e considera, para todas as misturas de asfalto, que a FAD é a parcela interativa de tamanhos de partículas que forma uma rede estrutural primária de agregados. O autor formulou a hipótese de que a FAD deve ser composta de partículas suficientemente grossas (maiores que 1,18 mm), e a sua porosidade não deve ser superior a 50% para que uma mistura resista eficazmente à deformação permanente. Tamanhos de partícula menores do que os estabelecidos pela FAD servirão para preencher os espaços vazios entre a FAD, sendo esse valor denominado Volume Intersticial (VI), juntamente com ligantes e finos. Partículas maiores que a FAD simplesmente flutuam na matriz e não desempenham um papel importante na estrutura, sendo denominados Agregados Flutuantes.

O conceito utilizado na metodologia FAD é baseado na teoria do empacotamento de partículas esféricas de vários tamanhos, não considerando as características de formas, textura e angularidade dos agregados, sugestão de investigação pelo próprio autor.

Embora a FAD seja a estrutura primária para resistir à deformação permanente, é, a partir da determinação de sua porosidade, que se estima seu potencial de resistência. Uma porosidade FAD inferior a 48% indica composições granulométricas com grande potencial de resistência à deformação permanente. Já valores entre 48 e 52% são chamadas de marginais e indicam composições com contato granular questionável, não sendo possível estimar a resistência à deformação permanente. Desse modo, espera-se baixa resistência à deformação permanente de misturas com porosidade FAD superior a 52% (FERREIRA; BASTOS; SOARES, 2015).

#### 2.2.3.1.2 Influência dos ligantes asfálticos

É nítida a importância dos agregados para a deformação permanente, no entanto, devido ao aumento do volume de tráfego e cargas nos eixos, demandando a utilização de diferentes ligantes modificados, pode-se inferir que as proporções apresentadas pela FHWA – *Federal Highway Administration* (2002) na Figura 17 não representam a realidade atual, com maior relevância ao ligante.

Vários estudos indicam a importância dos ligantes asfálticos na contribuição da resistência à deformação permanente. Viscosidade, teor de asfalto e modificação são alguns dos fatores relevantes. Asfaltos menos viscosos tornam a mistura menos rígida e, portanto, mais susceptível à deformação permanente. Vários pesquisadores buscaram melhorar o desempenho das misturas usando modificadores (polímeros, microfílers etc.), destinados a aumentar a viscosidade do ligante asfáltico a altas temperaturas, sem efeito adverso nas baixas temperaturas (MAHMOUD; BAHIA, 2004). Os asfaltos mais viscosos devem ser usados em pavimentos mais espessos e em climas mais quentes (SOUSA; CRAUS; MONISMITH, 1991).

O excesso do teor de ligante é um dos principais causadores da deformação permanente em trilha de roda nas misturas asfálticas. Brousseau et al. (1993 apud MOURA, 2010), afirmam que não existe uma proporcionalidade entre o aumento do teor de ligante e o da deformação permanente em concretos asfálticos, porém, existem grandes riscos de acontecer essa deformação em trilha de roda com o aumento do teor, ocasionados pela elevação da espessura do filme asfáltico no entorno dos agregados. Isso acaba interferindo na resistência ao cisalhamento resultante do atrito entre os grãos, pois aumenta a mobilidade entre eles devido à lubrificação do contato.

A pesquisa de Almeida Júnior (2015) comparou misturas asfálticas utilizando asfaltos modificados por polímeros (AMP 60/85) e não modificados (CAP 50/70). Os concretos asfálticos modificados apresentaram maior *FLow Number*, com aumento de até quase 8 vezes para misturas dosadas pelo método Marshall. Essa melhora na resistência à deformação permanente ao utilizar-se ligantes modificados pode ser observada também nos trabalhos de Onofre (2012), Borges (2014), Bohn (2016) e Bastos (2016).

#### 2.2.3.1.3 Influência das características da mistura

As principais características das misturas que influenciam na deformação permanente são o volume de vazios de ar, o VAM e o método de compactação.

Conforme Moura (2010), para o clima do país, com temperaturas elevadas, volumes de vazios de 2% ou inferiores são prejudiciais, podendo tornar as misturas asfálticas mais vulneráveis à formação de afundamentos em trilha de roda. Logo, o autor recomenda que a pós-compactação exercida pela ação do tráfego, que ocasione reduções no volume de vazios, deve manter esses níveis em valores superiores a 3%, preferencialmente.

Sousa, Craus e Monismith (1991) afirmam que o VAM não deve ser inferior a 10%, e o volume de vazios, a 3%. Porém, vazios de ar muito altos, em função da baixa compactação, também podem resultar em deformação permanente devido à densificação da camada.

O grau de compactação é um dos principais parâmetros de qualidade dos concretos asfálticos, especialmente para projetos críticos (aqueles com baixo teor de asfalto para proporcionar alta resistência à deformação permanente). A mistura bem produzida e executada tem melhor desempenho (melhor durabilidade e propriedades mecânicas) quando bem compactada (MAHMOUD; BAHIA, 2004).

#### 2.2.3.1.4 Influência das condições de campo

Os principais fatores de campo que afetam a resistência à deformação permanente são a temperatura, as repetições de carga, o estado de tensões e a ação da água.

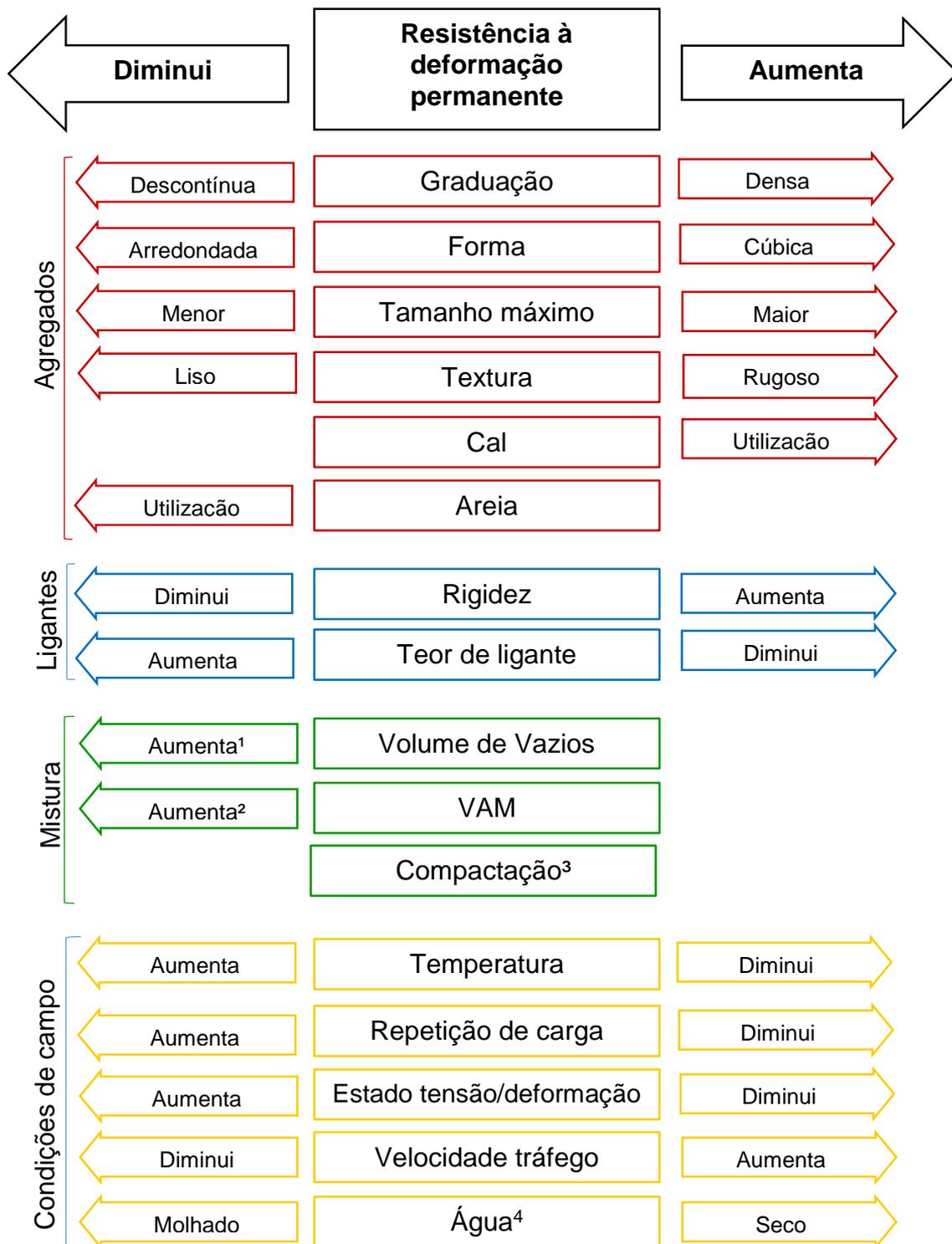
A temperatura de trabalho das misturas asfálticas está associada ao tipo de ligante, devido as mesmas herdarem características viscosas dos ligantes que são mais ou menos susceptíveis à temperatura conforme o tipo (MOURA, 2010). Brosseaud et al (1993), citado por Moura (2010), constataram forte relação entre os aumentos da temperatura e da deformação permanente em trilha de roda dessas misturas.

Conforme Sousa, Craus e Monismith (1991), para análise da deformação permanente, é necessária a realização de ensaios laboratoriais, dentro de um intervalo de temperaturas semelhantes àquelas encontradas no campo. Bonnot (1986 apud SOUSA; CRAUS; MONISMITH, 1991) selecionou a temperatura de 60°C para concretos asfálticos devido ser um valor relativamente alto, que reproduz as condições mais desfavoráveis esperadas na França. Em pesquisa realizada por Blass et al. (2013), na região noroeste do RS, de dezembro a fevereiro de 2010, o autor mediu temperaturas máximas na ordem de até 65°C na camada de revestimento asfáltico.

As mudanças na distribuição do tráfego, especialmente as maiores proporções de caminhões pesados, podem aumentar a taxa de deformação, mesmo se o pavimento foi originalmente bem projetado e construído. Cargas de roda maiores e grandes pressões de inflação de pneus aumentam a taxa de deformação do pavimento (SOUSA; CRAUS; MONISMITH, 1991).

Nesse sentido, a Figura 18 sintetiza os principais fatores que influenciam as deformações permanentes em concretos asfálticos, tendo como base as pesquisas bibliográficas anteriormente referenciadas.

Figura 18 - Fatores que afetam a resistência à deformação permanente das camadas de concreto asfáltico



<sup>1</sup> Quando Vv menor que 3%, a propensão à deformação permanente aumenta

<sup>2</sup> VAM's muito baixos (menores que 10%) devem ser evitados

<sup>3</sup> O método de compactação pode influenciar a propensão aos afundamentos plásticos

<sup>4</sup> Exerce influência se a mistura é sensível à água.

Fonte: Do autor (2018).

### 2.2.3.2 Ensaios

Existem diversos métodos de ensaio disponíveis para avaliar a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas, tais como: ensaios de comportamento reológico tipo *creep* dinâmico e *Flow Number* (FN), modelos desenvolvidos a partir de resultados obtidos com equipamentos simuladores de tráfego e correlações entre tráfego e afundamentos na trilha de roda. O parâmetro FN tem se tornado um dos mais comuns para quantificar a deformação permanente acumulada sob cargas repetidas em temperatura elevada (60°C). Além disso, será o critério utilizado no novo método de dimensionamento, então, necessita de validação para sua adequada utilização.

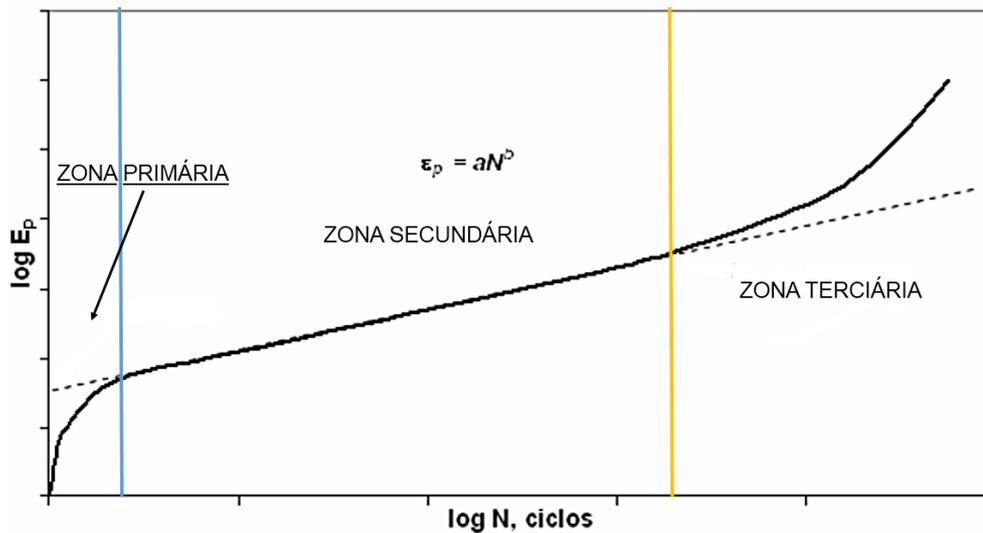
#### 2.2.3.2.1 Parâmetro *Flow Number* e correlações

O *Flow Number* é um parâmetro oriundo do ensaio uniaxial de carga repetida que melhor se relaciona com a deformação permanente, segundo o Report 465 (WITCZAK et al., 2002).

Para medir as características dessa deformação, o ensaio realiza várias repetições de carga de compressão corpo de prova, registrando essa deformação em função do número de ciclos de carga. Os resultados de testes de carga repetidos são tipicamente apresentados em termos de deformação versus o número de ciclos de carga, conforme ilustrado na Figura 19. Semelhante ao teste de fluência, a curva da deformação permanente acumulada ( $\epsilon_p$ ) pode ser dividida em três zonas: primária, secundária e terciária. O número do ciclo, no qual o fluxo terciário começa, é referido como o *Flow Number* (WITZACK et al., 2002).

Na Figura 19 é ilustrada essa divisão, onde a primeira é a região primária, em que a densificação da amostra ensaiada ocorre a uma taxa elevada. Em seguida, encontra-se a região secundária, na qual a taxa de deformação é praticamente constante, e, enfim, a região terciária, a região em que a amostra já se encontra rompida. A partir do ciclo referente ao FN, que está justamente na fronteira entre a região secundária e a terciária, a deformação ocorre a volume constante e a taxa de deformação volta a subir, visto que a amostra não oferece mais resistência aos carregamentos (ONOFRE, 2012).

Figura 19 - Deformação permanente durante o ensaio uniaxial de carga repetida e obtenção do FN



Fonte: Adaptado de Nascimento (2008).

O ensaio já é normatizado no Brasil pela Norma ABNT NBR 16505:2016, que especifica os corpos de prova moldados com grau de compactação de  $97\% \pm 0,5\%$ . Já a norma americana que normatiza o ensaio (AASHTO TP 79-15), apresenta como parâmetro a ser controlado o volume de vazios dos CPs, que deve ser de  $7\% \pm 0,5\%$ . Tanto para o DNIT quanto o DAER, o valor mínimo de grau de compactação em campo para as misturas asfálticas é de 97%. Então, o ensaio, de acordo a norma brasileira, analisa a situação de compactação mínima em campo, ou seja, a mais crítica.

Algumas pesquisas têm buscado correlacionar o critério de FN para misturas asfálticas para diferentes níveis de tráfego, sugerindo valores de referência do FN, como é observado na Tabela 4.

Dentre as pesquisas brasileiras, a de Nascimento (2008) foi a primeira a recomendar limites de FN para misturas asfálticas densas utilizadas como camada de revestimento em rodovias brasileiras, com base na avaliação de 09 misturas asfálticas, de acordo com o proposto por Witczak et al. (2002). Essas misturas eram compostas de diferentes agregados minerais, granulometrias e ligantes. Recentemente, Bastos et al. (2017), propôs alterações nos critérios propostos por Nascimento (2008), com base na análise de 12 misturas e seus respectivos trechos monitorados em diferentes locais do Brasil, sendo 3 desses trechos localizados no estado do Rio Grande do Sul, considerando como valor crítico o ATR de 12,5 mm.

Tabela 4 - Critérios de FN para diferentes níveis de tráfego da literatura

Pesquisas / Níveis de Tráfego (número N USACE)	Vv (%)	Temp. (°C)	Tensão (kPa)	Leve	Médio	Pesado	Extremamente pesado
				$3 \times 10^6$	$[3 \times 10^6;$ $1 \times 10^7]$	$[1 \times 10^7;$ $3 \times 10^7]$	$> 3 \times 10^7$
AAT (2011)	4,7 a 8,2	31,3 a 54,3	600	-	53	190	740
Bonaquist (2012)	6,0 a 7,3	49,6	600	15	50	135	415
AASHTO TP 79-15	$7 \pm 0,5$	-	600	-	30	190	740
Nascimento (2008)	6,5 a 7,5	60,0	204	-	300	750	-
Bastos et al. (2017)	5,5 a 7,5	60,0	204	-	100	300	>1000

Fonte: Adaptado de Bastos, Ferreira e Soares (2016).

Percebe-se que os limites de *FN* propostos por Nascimento (2008), para tráfegos médios e pesados, são quase 6 vezes maiores que os critérios indicados para misturas asfálticas norte-americanas por Bonaquist (2012), por exemplo. Dadas as proporções de tensão, a tensão adotada por Nascimento (2008) (204 kPa) é quase 3 vezes menor que a adotada por Bonaquist (2012) (600 kPa) e, para a temperatura de ensaio, Nascimento (2008), utilizou uma temperatura cerca de 20% maior que Bonaquist (2012). Com isso, Bastos, Ferreira e Soares (2016), afirma que esses resultados sugerem que o critério de Nascimento é mais conservador em relação aos demais.

Pesquisas nacionais e internacionais têm buscado correlacionar os resultados de FN com as diferentes propriedades das misturas e dos seus materiais constituintes, como exemplo a proporção AG, a porosidade FAD, a morfologia dos agregados, as propriedades dos ligantes, a rigidez, entre outras. Com isso, entender a influência dessas variáveis no desempenho a deformação permanente e, também, propor modelos para prever o FN.

O parâmetro FN foi correlacionado com os resultados da porosidade FAD por Ferreira, Bastos e Soares (2015), sendo que os autores analisaram oito misturas asfálticas produzidas com materiais de diferentes regiões do Brasil. Eles encontraram boa correlação entre a metodologia e o ensaio, mostrando o potencial do método FAD como indicador de resistência à deformação permanente.

Para a pesquisa de Bastos, Ferreira e Soares (2016), observa-se certa correlação entre a porosidade FAD e o FN quando se considera todas as misturas e uma forte correlação quando se exclui as porosidades marginais. Segundo a autora,

esses resultados indicam a potencialidade do método FAD como um parâmetro indicador simples da resistência à deformação permanente em misturas asfálticas.

Analisando o parâmetro AG e correlacionando-o com o FN, Ferreira, Bastos e Soares (2015), diferentemente da porosidade FAD, onde todas as suas previsões de comportamento mecânico foram confirmadas para as misturas estudadas, as avaliações segundo o Método Bailey não foram totalmente coerentes com aquilo que é estabelecido. Observou-se na pesquisa que os intervalos para seus parâmetros são difíceis de serem integralmente obedecidos, mesmo para misturas com bom resultado no ensaio uniaxial de carga repetida.

Pazos (2015), ao avaliar a influência das propriedades morfológicas dos agregados no comportamento mecânico utilizando o ensaio AIMS, conclui que as três propriedades dos agregados que melhor se correlacionaram com os resultados de *Flow Number* são a textura, a angularidade-textura do agregado graúdo e angularidade do agregado graúdo.

Almeida Jr et al. (2018), ao avaliarem 24 misturas com mesmo agregado, três ligantes asfálticos, 50/70, AMP 60/85 e o *Highly Modified Asphalt (HiMA)*, quatro granulometrias, sendo duas Faixa B e duas C, e dois métodos de dosagem (Marshall e Superpave), concluíram que a mudança no tipo e teor de ligante asfáltico é consideravelmente a mais influente, com embasamento nas fortes correlações encontradas entre os parâmetros reológicos e o teor de ligante com o *FN* das misturas. Também, concluíram que as metodologias Bailey e FAD apresentaram resultados satisfatórios, principalmente o método Bailey com aumento dos *FNs* das misturas.

Bastos (2016), de posse dos resultados da avaliação dos ligantes, por meio do ensaio *Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)*, e das misturas asfálticas, por meio do ensaio uniaxial de carga repetida, avaliou a relação dos resultados de resistência à deformação permanente de ligantes asfálticos com o desempenho das misturas asfálticas. Dentre as conclusões da autora, destacam-se a fraca relação ( $r^2 < 0,3$ ) entre os parâmetros do *MSCR* ( $J_{nr\ 3200}$  e  $R_{3200}$ ) e o *Flow Number* das correspondentes misturas asfálticas. Por outro lado, o parâmetro  $J_{nr, diff}$  do *MSCR* apresentou uma melhor correlação com o *FN* da mistura ( $r^2 > 0,8$ ). De acordo com os resultados, o ensaio *MSCR* pode ser usado para evitar a seleção de ligantes que podem levar à deformação permanente. Em geral, o ensaio classifica os ligantes da mesma forma que o desempenho em campo. A autora destaca, também, certa discordância dos resultados, apontando-se que somente a caracterização do ligante asfáltico não é

suficiente para estimar o comportamento da correspondente mistura asfáltica, provavelmente por causa do importante papel dos agregados.

Bastos (2016) avaliou a correlação de 7 misturas com FN e teor, parâmetros de granulometria e características de forma (AIMS), propondo um modelo preditivo para os resultados de *FN* em laboratório. Os parâmetros considerados no modelo foram a proporção AG e a forma 2D, encontrando  $r^2$  de 0,82, demonstrando boa previsão para o universo de misturas analisadas.

Apeagye (2017), ao avaliar a influência das propriedades volumétricas e dos ligantes nos resultados de *Flow Number*, propôs um modelo preditivo para o FN com base na avaliação de 13 misturas asfálticas. Os resultados mostraram que o parâmetro estava fortemente correlacionado ( $r^2 = 0,94$ ) a  $G^* / \sin \delta$ , teor de ligante efetivo, vazios de ar e relação de pó/ligante efetivo. Os resultados demonstram uma ligação clara entre FN e as propriedades volumétricas e dos ligantes da mistura.

Com base nessas pesquisas, percebe-se que o ligante apresenta papel principal na correlação com os resultados de FN. O estudo das correlações e modelos preditivos de FN podem ser muito úteis para otimizar o processo de projeto de mistura de laboratório, relacionando diretamente determinados parâmetros que podem ser incorporados em especificações relacionadas à resistência à deformação permanente da mistura.

#### 2.2.3.2.2 ATR em campo, medidas e previsão

O perfil transversal de um pavimento é útil principalmente para a verificação de deformações superficiais plásticas, que se formam nas trilhas de roda e apresentam sérios riscos à segurança, quando o pavimento está molhado, pois, em tais deformações, pode haver acúmulo de água superficial, o que facilita a perda do contato pneu/pavimento. Esse perfil pode também ser usado para a medida da condição de drenagem superficial da pista (SEVERO et al., 2004).

Os afundamentos de trilha de roda podem ser medidos de diversas formas, sendo que uma das mais tradicionais é a utilização de treliça metálica, e uma das mais produtivas e atuais é o uso de perfilômetros inerciais, também conhecidos como perfilômetros laser ou barra laser.

A avaliação dos afundamentos plásticos, nas trilhas de roda, além da questão de segurança e conforto, é de suma importância para validação dos ensaios de

previsão de comportamento quanto à deformação permanente para misturas asfálticas, como o ensaio de *Flow Number*.

Para os trechos concedidos no estado do RS, a ANTT, por meio dos seus programas de exploração de rodovias (PER) especifica o limite de 5,0 mm como valor máximo da flecha admissível para a rodovia BR-290, sob concessão da CONCEPA, e para as rodovias BR-116 e BR-392, o limite de 7,0 mm (trecho sob concessão da Ecosul). Caso seja ultrapassado, é necessária intervenção na pista.

O DAER, no seu programa de Restauração e CREMA em andamento, especifica que, no período de manutenção, os limites de afundamentos individuais medidos na trilha de roda deverão ser menores que 7,0 mm para 95% dos resultados e menor que 10,0 mm para 100% das medidas obtidas. Por sua vez, o DNIT, para os contratos CREMA, não admite, a partir da recuperação da pista, flechas nas trilhas de roda maiores que 10 mm. No manual de restauração do referido órgão, é apresentado o valor de 13 mm como o crítico para o fenômeno de hidroplanagem.

No estado de São Paulo, a Agência de Transporte do Estado de São Paulo (ARTESP) tem especificado nos últimos editais de concessão que o afundamento de trilha de roda máximo deve ser de 7 mm.

Diante disso, percebe-se a necessidade de padronizar o limite crítico de ATR para as rodovias do RS, a fim de definir critérios para o parâmetro FN que atendam às exigências contratuais, além do conforto e segurança.

Para prever a evolução das trilhas de roda, existem diversos modelos de previsão. Conforme Mattos (2014), destacam-se os modelos utilizados no guia da AASHTO (NCHRP, 2004), que são empregados no software M-EPDG e foi o escolhido por Franco (2007) para ser usado no software SisPav. Para os modelos desenvolvidos no Brasil, destacam-se os elaborados por Queiroz (1981 apud ALBUQUERQUE, 2007) e Paterson (1987 apud ALBUQUERQUE, 2007), incorporados ao *Highway Design and Management* (HDM) com algumas adaptações, além dos desenvolvidos por Marcon (1996) e Yshiba (2003), elaborados com dados de pavimentos dos Estados de Santa Catarina e Paraná, respectivamente.

Porém, alguns desses tipos de modelos, como o de Marcon (1996), não levam em conta as características dos materiais, o que os tornam inviáveis, principalmente devido à evolução das modificações dos ligantes asfálticos que ocasionam diferentes desempenhos em campo.

Para que os modelos sejam adequados à realidade das rodovias do estado do Rio Grande do Sul, necessita-se a calibração de fatores campo-laboratório para a realidade local.

O modelo de deformação permanente denominado *Shift Model*, desenvolvido por Subramanian (2011) e simplificado por Choi et al. (2012), inserido no programa LVECD (*Layered Viscoelastic Continuum Damage*) (ESLAMINIA et al., 2012; CHOI e KIM, 2014), permite a previsão de desempenho de pavimentos asfálticos quanto à deformação permanente. Bastos, Ferreira e Soares (2016) observou-se boa concordância entre a previsão de desempenho do LVECD (usando propriedades viscoplásticas obtidas no ensaio triaxial de varredura de tensões (*Triaxial Stress Sweep – TSS*) e medições de ATR nos trechos experimentais da sua pesquisa.



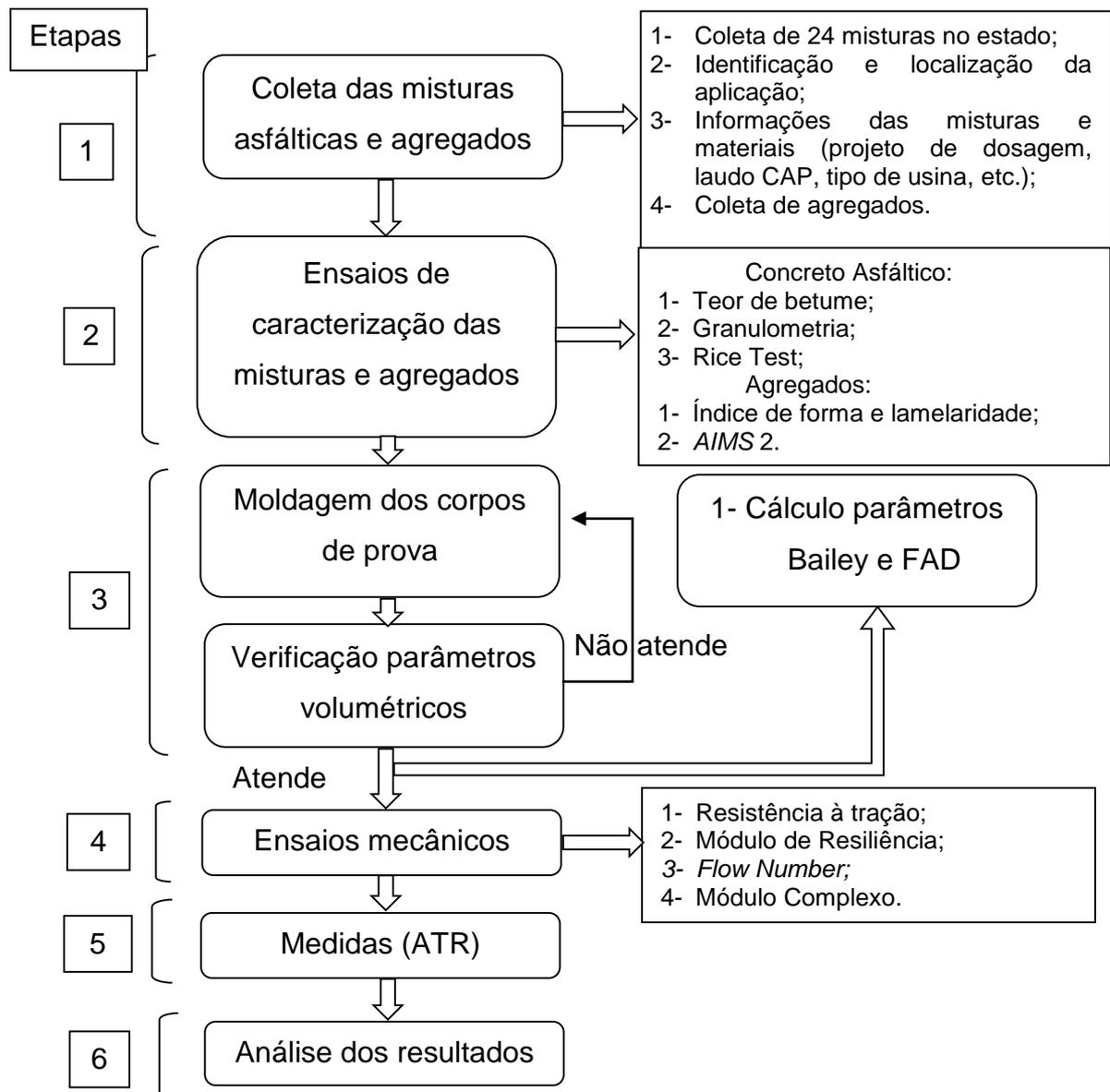
### 3 METODOLOGIA DA PESQUISA

No presente capítulo, são apresentados o planejamento da pesquisa, os métodos e procedimentos, bem como os materiais utilizados.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, a pesquisa foi dividida em seis etapas, apresentadas no fluxograma da Figura 20.

Figura 20 - Fluxograma da pesquisa

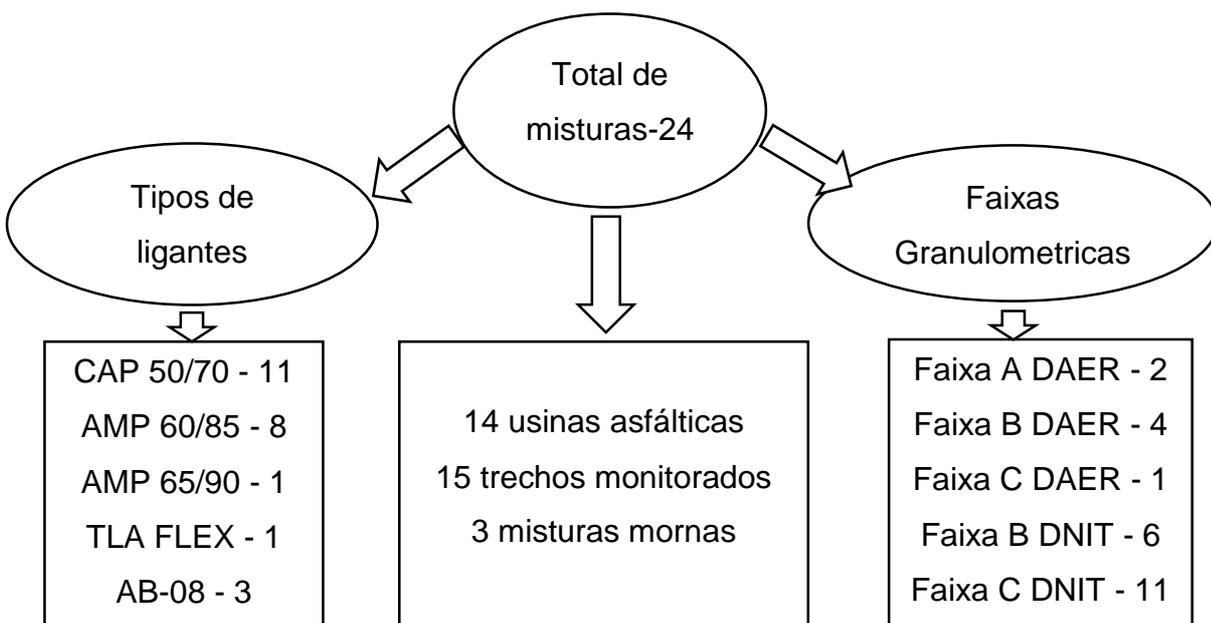


Fonte: Do autor (2018).

A maioria das pesquisas recentes e em andamento sobre misturas asfálticas no estado do Rio Grande do Sul, principalmente dentre as universidades inseridas no Programa Rede Temática de Asfalto, a UFSM e a UFRGS, analisam concretos asfálticos produzidos em laboratório, podendo-se citar as pesquisas de Almeida Júnior (2016), Bohn (2017) Paniz (2018), Mensch (2017), Barros (2017). A fim de entender o comportamento mecânico e desempenho em campo de misturas efetivamente utilizadas no estado, a metodologia foi ajustada para uma adequada análise dos concretos asfálticos utilizados na construção e recuperação de rodovias no estado.

Diante disso, com objetivo de avaliar o comportamento mecânico dos concretos asfálticos em utilização no estado do Rio Grande do Sul, esta pesquisa analisou vinte e quatro misturas asfálticas densas, conforme apresentado no resumo dos materiais utilizados na Figura 21.

Figura 21 - Resumo dos materiais coletados



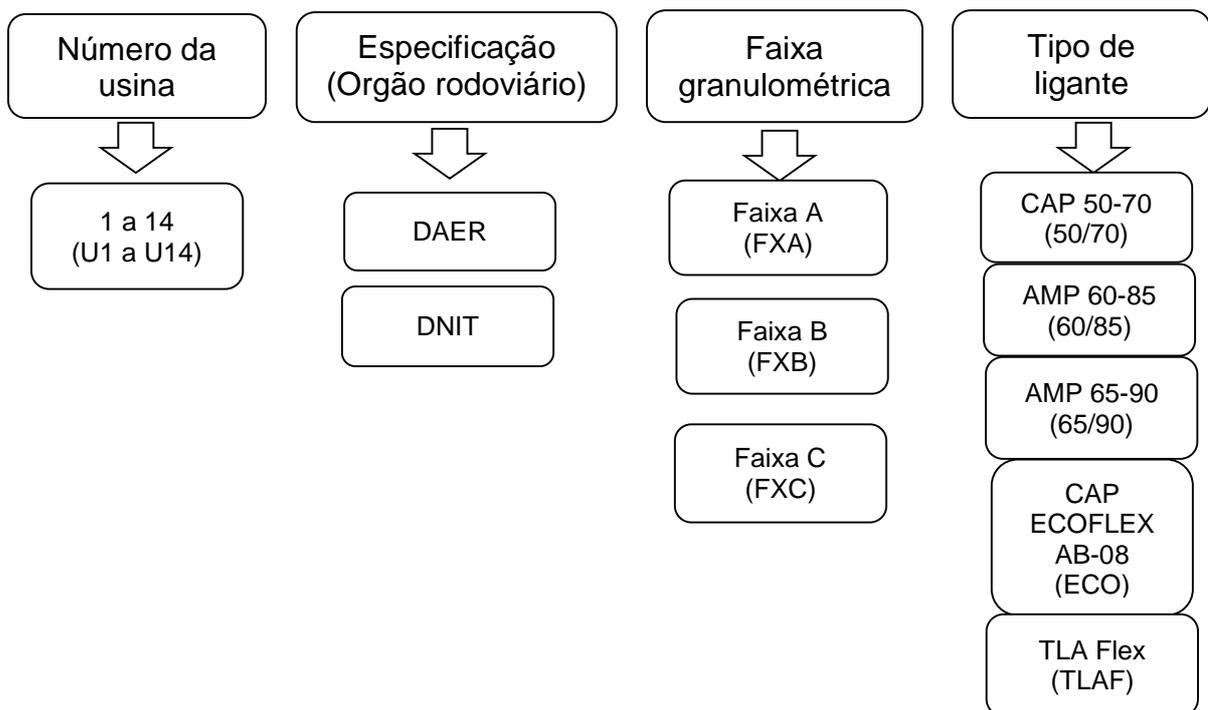
Fonte: Do autor (2018).

As coletas foram realizadas nas unidades de produção em que se localizam as usinas de asfalto e instalações de britagem, onde, para cada mistura, foram coletados aproximadamente cem quilos de massa e agregado suficiente para a realização dos ensaios de caracterização. Além disso, foram obtidos os parâmetros dos projetos de dosagem das misturas, dados de tráfego da rodovia e características dos ligantes e

agregados juntamente aos órgãos rodoviários, empreiteiras e supervisoras responsáveis pela produção e fiscalização dos respectivos concretos asfálticos.

As misturas foram designadas conforme abreviatura proposta na Figura 22, a fim de facilitar a análise dos dados no decorrer do trabalho, de acordo com a usina de produção, especificação do órgão rodoviário utilizado para elaboração do traço, tipo de faixa granulométrica e ligante asfáltico.

Figura 22 - Modelo genérico da abreviatura das misturas asfálticas



Exemplo: U1-DAER-FXA-50/70.  
Fonte: Do autor (2018).

Todos os ensaios mecânicos e de caracterização das misturas foram executados no LMCC da UFSM, sendo o quantitativo apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Quantidade de amostras por ensaio

Ensaio	Quantidade de amostras por	Total de
Rice Test	3	72
Teor de betume e granulometria	3	72
MR/RT	3	72
E*	2	48
FN	3	72
<b>Total de amostras</b>		<b>336</b>

Fonte: Do autor (2018).

Além disso, foram realizadas medidas de ATR em 15 trechos, com frequência de medições de, aproximadamente, seis meses após a liberação do tráfego, com a utilização de treliça metálica.

Os agregados coletados foram ensaiados para obtenção do índice de forma e lamelaridade no LMCC da UFSM, e amostras foram enviadas para a COPPE, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, para realização do ensaio *AIMS 2*.

### 3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

As coletas das misturas asfálticas foram realizadas no caminhão ou na pista, conforme preconiza a norma DNER – PRO 013/94, e armazenadas em bandejas de alumínio, a fim de facilitar o manuseio em laboratório, conforme Figura 23.

A coleta dos agregados foi efetuada diretamente dos montes, sendo armazenados em sacos plásticos.

Figura 23 - Procedimento de coleta das misturas asfálticas



Fonte: Do autor (2018).

#### 3.2.1 Ensaios de caracterização morfológica dos agregados

Foram realizados os seguintes ensaios de caracterização de propriedades morfológicas dos agregados: os recomendados nas especificações de serviço do DAER e DNIT: lamelaridade e índice de forma, respectivamente, além do sistema *AIMS 2*, para a caracterização de propriedades de forma, angularidade e textura.

### 3.2.1.1 *Ensaio especificações brasileiras*

Foram utilizados os agregados das frações 3/4" e 3/8", que compõem as misturas asfálticas para determinação do índice de forma e lamelaridade.

Para o DNIT, a forma das partículas é caracterizada pela determinação do índice de forma (f), de acordo com o ensaio descrito no método DNER-ME 086/94. Esse índice varia de 0,0 a 1,0, sendo o agregado considerado de ótima cubicidade, quando  $f = 1,0$ , e lamelar, quando  $f = 0,0$ . O ensaio consiste em avaliar a forma dos agregados, por meio da relação entre suas arestas, analisando-se a cubicidade através da passagem dos agregados por uma sequência de crivos de abertura circular e, posteriormente, o seu achatamento, passando-os por um crivo linear.

Já para o DAER, o ensaio para determinar o índice de lamelaridade é o exigido pela norma DAER/RS-EL 108 de 2001. A lamelaridade pode ser definida como um parâmetro de forma, que visa determinar se as partículas são alongadas (lamelares) ou não; quanto maior o valor, mais alongadas elas são. Essa norma propõe analisar as partículas, passando-se uma amostra por uma placa com aberturas padronizadas, classificando-as como retidas e passantes das aberturas correspondentes.

### 3.2.1.2 *Ensaio usando o sistema AIMS 2*

O AIMS 2 ainda não possui norma americana ou brasileira. No entanto, o ensaio vem sendo realizado de acordo com a classificação de agregados desenvolvida por Al Rousan (2004 apud BASTOS; FERREIRA; SOARES, 2015).

O equipamento utilizado para ensaio é o AIMS 2 (Figura 24), versão mais moderna do equipamento com configuração de plataforma giratória para posicionamento dos agregados, disponível no laboratório da COPPE. O sistema possui engrenagens e um motor, que fornecem uma plataforma robusta necessária para posicionar o material na área apropriada de captura de imagens (PAZOS, 2015).

Desse modo, os procedimentos foram os mesmos usados por Pazos (2015), consistindo nas seguintes etapas: os agregados utilizados na composição das misturas asfálticas foram lavados e separados, de acordo com as quantidades mínimas de partículas por peneira, sugeridas pelo manual do equipamento e indicadas na Tabela 6. Durante os ensaios, as partículas de agregados foram posicionadas nas ranhuras de bandejas circulares, como mostrado na Figura 24. Depois do alinhamento

das partículas nas bandejas, a câmera de alta resolução e o sistema de iluminação do *AIMS 2* foram usados para capturar imagens dos agregados.

Figura 24 - Equipamento *AIMS 2*



Fonte: Pazos (2015).

Partículas em contato não foram consideradas na análise, uma vez que o sistema *AIMS 2* possui um algoritmo que desconsidera as que se tocam, para evitar que sejam interpretadas pelo sistema como uma única partícula com propriedades diferentes. Como resultados, o sistema *AIMS 2* fornece informações de angularidade, esfericidade, características de achatamento, alongamento e textura, para os agregados grãos, ou seja, partículas medindo entre 4,75 mm e 37,5 mm, e angularidade e forma, para os agregados medindo entre 0,075 mm e 4,75 mm.

Tabela 6 - Quantidades mínimas de partículas para ensaios no sistema *AIMS 2*

<b>Tamanho da peneira</b>	<b>Número de partículas sugerido</b>
19,0 mm (3/4")	50
12,5 mm (1/2")	50
9,5 mm (3/8")	50
4,75 mm (#4)	50
2,36 mm (#8)	150
1,18 mm (#16)	150
0,60 mm (#30)	150
0,30 mm (#50)	150
0,15 mm (#100)	150
0,075 mm (#200)	150

Fonte: Pazos (2015).

### 3.2.2 Ensaio de caracterização das misturas asfálticas

Em laboratório, as misturas foram aquecidas até uma temperatura de aproximadamente 135°C em estufa e quarteadas até obter-se amostras com as quantidades requeridas para realização dos ensaios de caracterização – extração de betume, granulometria e densidade específica máxima, conforme Figura 25.

Figura 25 - Preparação das amostras



Fonte: Do autor (2018).

#### 3.2.2.1 Densidade máxima da mistura

Foi determinada a densidade específica máxima para cada mistura, sob procedimento especificado na norma NBR 15619 – Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas (método Rice).

Esse parâmetro é útil para o cálculo da densidade efetiva dos agregados e dos outros parâmetros volumétricos das misturas. Optou-se pela utilização da DMM para todas as misturas, e não o uso da densidade máxima teórica, conforme o DAER recomenda, pois, esta última não engloba os poros dos agregados preenchidos pelo ligante.

Conforme a NBR 15619, a DMM da mistura asfáltica deve ser a média de, no mínimo, três determinações que não diverjam  $\pm 0,02$  da média. A diferença entre dois

ensaios sucessivos, obtidos pelo mesmo operador e aparelhagem, sob condições constantes de operação e em amostras de materiais idênticos, com a execução correta e normal deste método, pode exceder o valor de 0,023 somente em um caso em cada 20.

### 3.2.2.2 Teor de betume

Em cada mistura, foram realizados três ensaios de extração de betume, conforme norma DNER-ME 053/94, utilizando o aparelho Rotarex.

Para os asfaltos modificados por borrachas de pneus, foi utilizado um fator de correção no cálculo do teor de ligante (Tabela 7), de acordo com os valores recomendados nos laudos fornecidos pelas distribuidoras de asfalto. Esse fator corresponde ao ajuste no valor devido à presença de partes insolúveis de pó de pneu, nos filtros do equipamento.

Tabela 7 - Fatores de correção do teor de ligante para asfalto borracha

<b>Mistura</b>	<b>Fator multiplicador de correção</b>
U3-DAER-FXB-ECO	1,07
U5-DNIT-FXB-ECO	1,04
U5-DAER-FXB-ECO	

Fonte: Do autor (2018).

### 3.2.2.3 Granulometria das misturas

Com os agregados das amostras do ensaio com Rotarex, secos em estufa até adquirirem constante peso, foram efetuados os ensaios de granulometria, segundo a norma DAER/RS EL 102/01 – Análise granulométrica de agregados –, que especifica a lavagem do material no peneiramento, objetivando aumentar a precisão dos resultados. Desse modo, os resultados apresentados são a média de três amostras para cada mistura.

#### 3.2.2.3.1 Parâmetros Bailey e FAD

Com os resultados de granulometria das amostras, calculou-se os valores de PCP, PCT e PM, que são obtidos a partir do TMN, conforme demonstram as Tabelas

8 e 9. Dessa forma, a mistura foi classificada quanto ao comportamento graúdo e miúdo da mistura, de acordo com a quantidade do material passante na PCP (ASPHALT INSTITUTE, 2011):

- a) se 49,9% ou menos da mistura ficam retidos na PCP, considerou-se graúda;
- b) se 50% ou mais da mistura passam na PCP, considerou-se miúda.

Tabela 8 - Peneiras de controle do Método Bailey para misturas de comportamento graúdo

Controles	Tamanho Máximo Nominal (TMN), em mm					
	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75
PM	19,0	12,5	9,5	6,25	4,75	2,36
PCP	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
PCS	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,3
PCT	0,60	0,30	0,30	0,150	0,150	0,075

Fonte: Vavrik, Huber e Pine (2002).

Tabela 9 - Peneiras de controle do Método Bailey para misturas de comportamento miúdo

Controles	Tamanho Máximo Nominal (TMN), em mm					
	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75
PCP Original	9,5	4,75	4,75	2,36	2,36	1,18
PM Nova	4,75	2,36	2,36	1,18	1,18	0,60
PCP Nova	2,36	1,18	1,18	0,60	0,60	0,3
PCS Nova	0,60	0,30	0,30	0,150	0,150	0,075
PCT Nova	0,15	0,075	0,075	-	-	-

Fonte: Vavrik, Huber e Pine (2002).

Obteve-se, então, as peneiras de controle e foi realizada a análise da mistura, por meio dos critérios estabelecidos pelo método Bailey, através dos três parâmetros (Proporção AG, GAF e FAF) calculados pelas Equações 9, 10 e 11, respectivamente.

$$\text{Proporção AG} = \frac{\% \text{ passante PM} - \% \text{ passante PCP}}{100 - \% \text{ passante PM}} \quad (9)$$

$$\text{Proporção GAF} = \frac{\% \text{ passante PCS}}{\% \text{ passante PCP}} \quad (10)$$

$$\text{Proporção FAF} = \frac{\% \text{ passante PCT}}{\% \text{ passante PCP}} \quad (11)$$

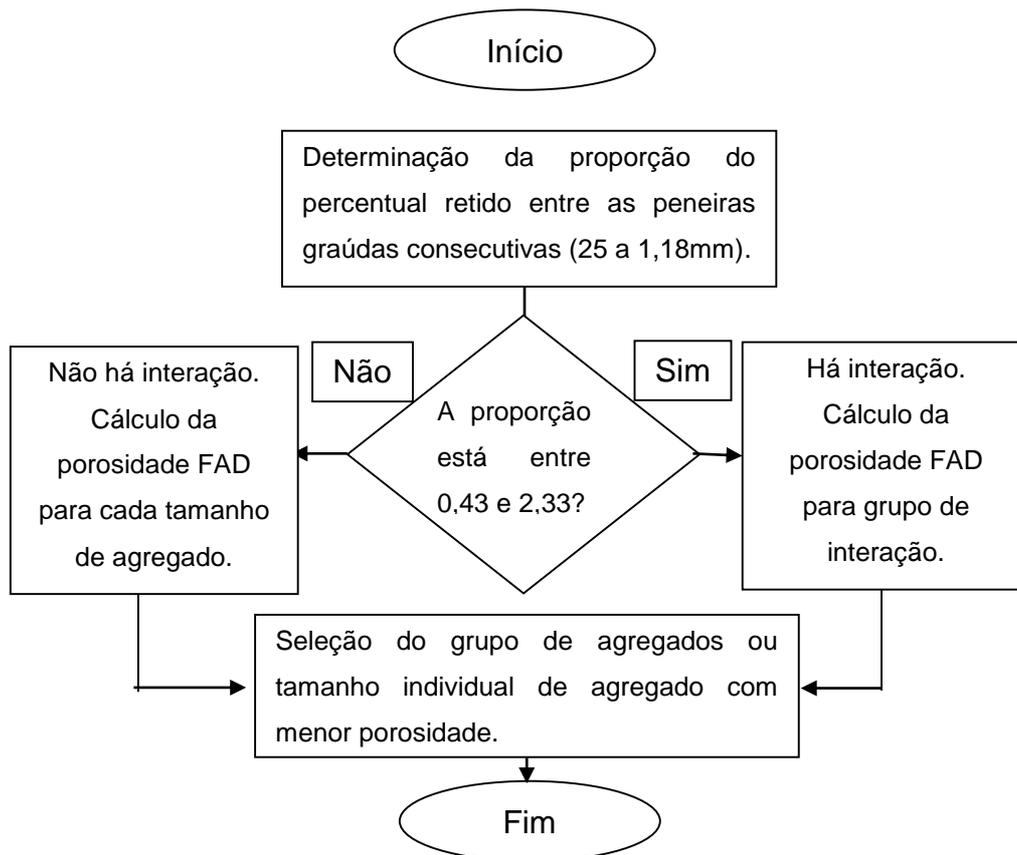
### 3.2.2.3.2 Porosidade FAD

Com os resultados de granulometria das misturas asfálticas, o procedimento de cálculo da porosidade FAD foi realizado conforme o fluxograma na Figura 26.

Primeiramente, determinou-se o diagrama de interações, o qual indica se ocorre ou não interação entre as peneiras graúdas consecutivas (25 a 1,18 mm). O cálculo da interação é feito dividindo-se o percentual retido da maior peneira pelo da menor. Os agregados passantes na peneira 1,18 mm não compõem a FAD.

Caso ocorra interação, foi calculada para o grupo de agregados que estão contribuindo para a formação da FAD, sendo a porosidade calculada conforme a Equação 12:

Figura 26 - Fluxograma cálculo da porosidade FAD



Fonte: Adaptado de Greene, Kim e Choubane (2011).

$$FAD = \frac{Vv(FAD)}{VT(FAD)} = \frac{VIC, ag + VAM}{V_{tm} - V_{ag} > FAD} \quad (12)$$

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

V<sub>tm</sub> = volume total da mistura

V<sub>ag>FAD</sub> = volume de agregados flutuantes (maiores do que a FAD)

### 3.2.3 Moldagens corpos de prova

As misturas coletadas foram levadas à estufa para aquecimento até atingirem a temperatura de compactação indicada nos projetos de dosagem e laudos do ligante para moldagem dos corpos de prova. Foi admitida uma tolerância de +/- 3C° na temperatura de compactação, conforme especifica a norma NBR 15897- Misturas asfálticas a quente – Preparação de corpos-de-prova com compactador giratório Superpave (CGS). Devido a essas misturas já terem passado pelo processo de envelhecimento, na usinagem, não foi necessário fazer essa simulação em laboratório.

A mistura já aquecida na temperatura de compactação, então, foi levada para o processo de remistura, no qual se foi utilizado o misturador da marca *Infratest testing system* (Figura 27), modelo *Bituminous Laboratory Mixer 30 Liter Special Version*, para obter uma mistura mais homogênea, evitando segregação e mantendo a sua temperatura uniforme durante as moldagens.

Após isso, os corpos de prova foram moldados em um compactador giratório Superpave, equipamento que tem a capacidade de moldar amostras com diâmetros de 100 mm e 150 mm. Para este trabalho, foram moldados com 100 mm de diâmetro, dimensão especificada para os ensaios mecânicos a serem realizados. A compactação no CGS, durante todo o processo de moldagem das amostras, foi executada com pressão aplicada de 0,60 MPa, ângulo de rotação externo de 1,25° e velocidade constante de 30 rpm.

Figura 27 - Misturador *Infratest testing system*



Fonte: Do autor (2018).

A Figura 28 mostra o CGS utilizado, bem como os moldes e corpos de prova.

Figura 28 - CGS, computador de aquisição de dados e amostras da dosagem Superpave



Fonte: Do autor (2018).

A quantidade de massa foi fixada para cada tipo de ensaio, com o número de giros variando de forma a obter o volume de vazios e a altura necessária para atender os requisitos dos ensaios. Na Tabela 10, são apresentados os parâmetros dos CPs, que serviram de base para o cálculo da quantidade de massa em cada um destes.

Os corpos de prova para ensaios de  $E^*$  e FN foram moldados com 160 mm para posterior faceamento (Figura 29), a fim de obter um melhor paralelismo das

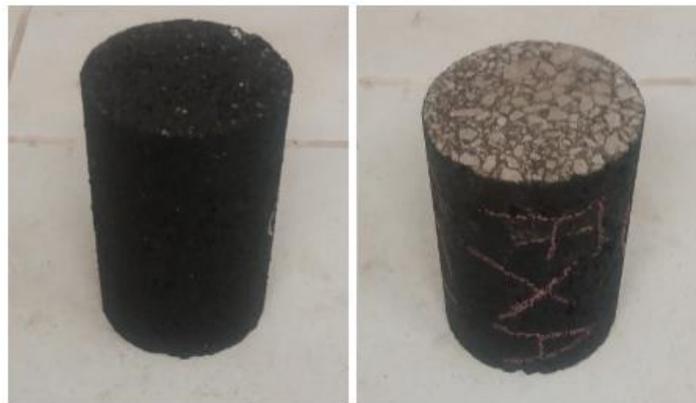
faces, proporcionando uma melhor distribuição das tensões quando da execução dos ensaios.

Tabela 10 - Parâmetros corpos de prova a serem ensaiados

Ensaio	Dimensão do CP (mm)	Volume de Vazios (Vv) (%)	Tolerância Vv (%)
MR/RT	100X64	4,00	1,0
E*	10X150	5,50	0,5
FN	10X150	7,00	0,5

Fonte: Do autor (2018).

Figura 29 - Corpos de prova antes e após o faceamento



Fonte: Do autor (2018).

### 3.2.4 Parâmetros volumétricos das misturas

Com as amostras já moldadas no compactador giratório, foi determinada a densidade específica aparente ( $G_{mb}$ ) de todos os corpos de prova para verificação quanto ao atendimento do volume de vazios especificado. Este procedimento foi realizado segundo a norma AASHTO T 166-05, onde o volume aparente inclui o volume de agregado sólido adicionado ao volume de poros superficiais contendo água, parcela desconsiderada nas normas de ensaio do DAER e DNIT.

Com os dados de densidade aparente e DMM, foi possível obter os parâmetros volumétricos das amostras e conferir se o volume de vazios especificado estava de acordo com o requerido para cada ensaio. Corpos de prova que não atenderam a tolerância desse dado, foram moldados novamente sem utilizar a mesma massa do

CP com volume de vazios inadequado, evitando o envelhecimento do ligante novamente.

Assim que atenderam os requisitos, os CPs foram identificados; os corpos de prova de E\* e FN faceados e, então calculados os parâmetros volumétricos das misturas (Vv, VAM e RBV), além da densidade aparente dos agregados para cálculo da porosidade FAD.

### 3.2.5 Ensaios mecânicos

Para verificar o comportamento mecânico das 24 misturas asfálticas, foram realizados ensaios de Módulo de Resiliência, Resistência à Tração por Compressão Diametral, Módulo Complexo e *Flow Number*, os quais têm os procedimentos descritos neste item.

#### 3.2.5.1 Módulo de resiliência

O ensaio de módulo de resiliência seguiu as prescrições da norma DNIT-ME 135/2010 – Pavimentação asfáltica – Mistura Asfáltica – Determinação do Módulo de Resiliência. O equipamento utilizado para realização deste ensaio foi a prensa hidráulica modelo *Universal Test Machine* - UTM 25 da IPC Global, a qual é composta por um pistão acoplado a um regulador de tempo e frequência (Figura 30), que possibilita a execução do ensaio em diversas temperaturas e frequências de carregamento.

Para cada mistura, foram ensaiados três corpos de prova, sendo cada amostra ensaiada em duas direções, 0° e 90°, conforme mostra a Figura 30, e condicionados por um período de, no mínimo, 12 horas, a fim de atingir a temperatura uniforme especificada.

O MR foi determinado na temperatura de  $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , por meio da aplicação de carga repetida de compressão ao longo do plano diametral, considerando um coeficiente de Poisson de 0,30, conforme recomendação da norma para esta temperatura.

Figura 30 - Prensa UTM 25 e corpo de prova durante ensaio em duas direções



Fonte: Do autor (2018).

A carga aplicada no CP gera uma tensão de tração transversalmente ao plano de aplicação da carga. Mede-se, então, o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal correspondente à tensão gerada, por meio de LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*), nas duas faces do corpo de prova. A frequência de aplicação da carga é de 60 ciclos por minuto, com o tempo de aplicação de carga de 0,10 segundo e, portanto, 0,90 segundo de repouso ou descarregamento (Figura 30).

Com os valores de carga aplicada e deslocamentos horizontais recuperáveis obtidos, é calculado o módulo de resiliência, por meio da Equação 26. O valor é apresentado diretamente pelo software.

$$MR = \frac{P}{\Delta \cdot H} \cdot (0,9976 \cdot \mu + 0,2692) \quad (26)$$

Onde:

MR = módulo de resiliência, MPa;

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

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

H = altura do corpo-de-prova;

$\mu$  = coeficiente de Poisson.

### 3.2.5.2 Resistência à tração por compressão diametral

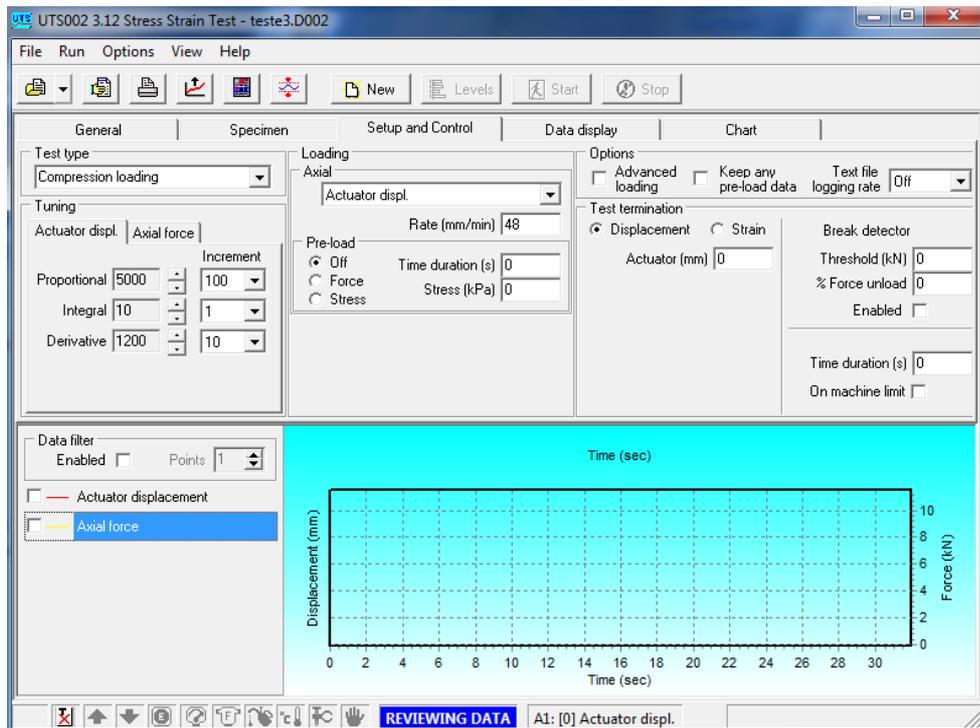
Após a realização dos ensaios de MR, os mesmos corpos de prova foram ensaiados quanto à resistência à tração por compressão diametral. O ensaio para a determinação da RT seguiu as prescrições da norma DNIT 136/2010. Para cada mistura, foram ensaiados três corpos de prova que passaram por um pré-condicionamento de 12 horas, a  $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$ , na mesma prensa utilizada no ensaio de MR. Esta e seu software possibilitam a medição do deslocamento vertical e da carga em função do tempo. Realizaram-se os testes com deformação controlada vertical, aplicando-se uma taxa de deslocamento de 48 mm/min (0,8 mm/s). Nesse sentido, a Figura 31 ilustra a montagem do corpo de prova, e as Figuras 32 e 33 mostram a tela de entrada de dados e a interface gráfica de saída dos resultados do ensaio de RT, respectivamente. Este procedimento foi desenvolvido no presente trabalho.

Figura 31 - Ensaio RT por compressão diametral



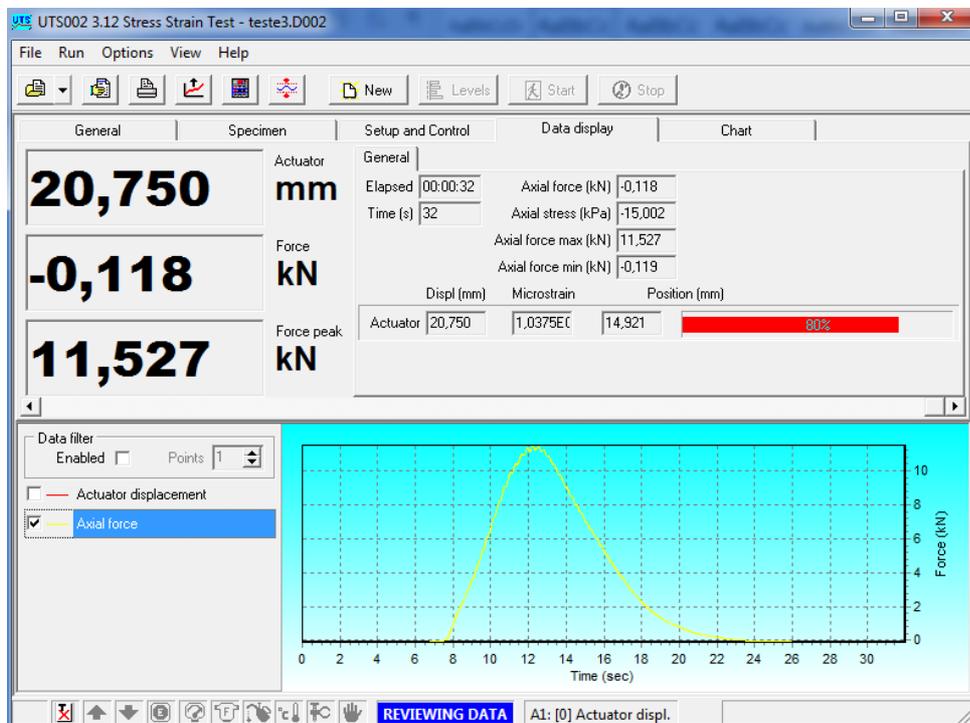
Fonte: Do autor (2018).

Figura 32 - Tela de entrada de dados



Fonte: Do autor (2018).

Figura 33 - Interface gráfica do ensaio



Fonte: Do autor (2018).

Então, obtém-se a força de ruptura (F) do CP, necessária ao cálculo dos valores de RT (Equação 27).

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad (27)$$

Onde:

$\sigma_R$  = resistência à tração, em MPa;

F = carga de ruptura, em N;

D = diâmetro do corpo de prova, em cm;

H = Altura do corpo de prova, em cm.

Além disso, com as medidas de deslocamento vertical e força a cada 0,01 segundo, calculam-se os parâmetros de Tenacidade, Índice de Tenacidade, bem como a Energia de Fratura. Também foi avaliada a utilização do Índice de Flexibilidade, adaptando-o ao ensaio brasileiro.

### 3.2.5.3 Módulo Complexo

O ensaio para a determinação do módulo complexo ( $E^*$ ) seguiu as prescrições da AASHTO T 342 – 11 – *Determining Dynamic Modulus of Hotmix Asphalt Concrete Mixtures*, onde são utilizadas amostras com as seguintes dimensões de tamanho do corpo de prova: diâmetro entre 100 e 104 mm, altura entre 147,5 e 152,5 mm e tamanho máximo nominal de 37,5 mm, moldados no compactador giratório, ensaiados e condicionados na prensa hidráulica UTM-25. O módulo complexo foi determinado após aplicação de carga nas frequências de 25Hz, 20Hz, 10Hz, 5Hz, 2Hz, 1Hz, 0,5Hz, 0,2Hz, 0,1Hz e 0,01Hz, e nas temperaturas de -10°C, 4°C, 21°C, 37°C e 54°C.

Cada amostra foi ensaiada para cada combinação de frequência e temperatura, começando com o menor valor desta. Após as amostras já faceadas e as dimensões medidas, cola-se, nas amostras, os pinos que serviram para fixar um conjunto de três LVDTs. Neste caso, para cada mistura, também foram ensaiados três corpos de prova, que passaram por um pré-condicionamento, conforme o tempo mínimo recomendado para equilíbrio da temperatura (Tabela 11).

Tabela 11 - Tempo mínimo para o equilíbrio da temperatura dos corpos de prova para ensaio de  $E^*$

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

Fonte: Adaptado de AASHTO T 342 – 11.

Ao atingir a temperatura especificada, a amostra foi ajustada na prensa, colocando-se três LVDTs em geratrizes igualmente espreçadas do CP, conforme ilustrado na Figura 33. Então, é aplicado um carregamento senoidal axialmente nos corpos de prova não confinados, e, a partir da média dos deslocamentos desses três sensores, são calculadas as deformações axiais. Assim, o valor de módulo dinâmico para uma dada frequência e temperatura é calculado conforme representa a Equação 28.

$$|E^*(w)| = \frac{|\sigma|}{|\varepsilon|} \quad (28)$$

Onde:

$|E^*(w)|$  = valor de módulo dinâmico para a frequência  $w$  em MPa;

$|\sigma^*|$  = amplitude de tensão em MPa;

$|\varepsilon^*|$  = amplitude de deformação axial média.

Em relação ao módulo dinâmico, Cavalcanti (2010) define como a relação entre a tensão dinâmica máxima e a deformação axial recuperável também máxima. A defasagem entre a aplicação de carga e a resposta da amostra é definida como ângulo de fase da mistura asfáltica ( $\phi$ ), que é calculado conforme Equação 29.

$$\phi = \frac{t_i}{t_p} \times 360 \quad (29)$$

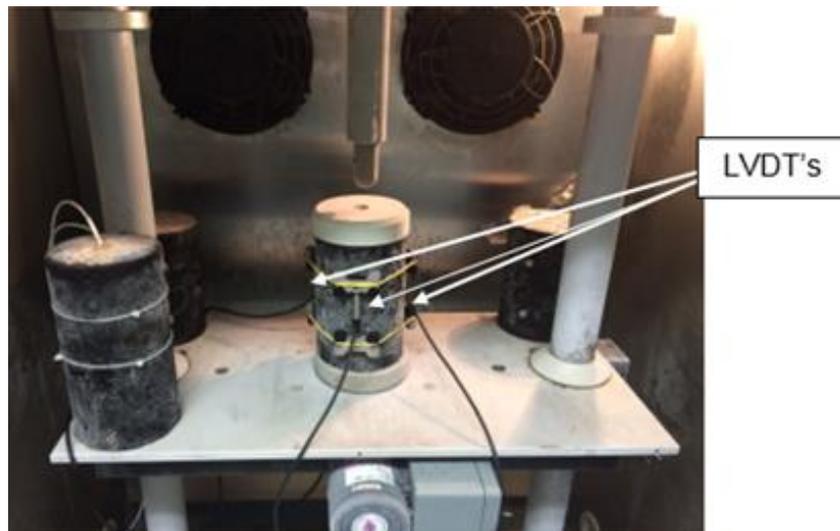
Onde:

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

$t_p$  = tempo de um ciclo de carga;  
 $i$  = número imaginário.

A deformação foi limitada à faixa de 50 a 75 micro-strain, no intuito de representar o regime de viscoelasticidade linear. A Figura 34 mostra os corpos de prova durante o condicionamento e o ensaio a  $-10^\circ\text{C}$ .

Figura 34 - Ensaio de módulo dinâmico na temperatura de  $-10^\circ\text{C}$



Fonte: Do autor (2018).

Após os resultados obtidos com o ensaio de módulo complexo, foi realizada uma modelagem física-matemática para obter as propriedades viscoelásticas das misturas em frequências e temperaturas que não foram ensaiadas, sem necessidade de realização de novos ensaios, sendo estes apresentados através de curvas no plano Cole Cole, Espaço Black, curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase, todas calibradas através do modelo 2S2P1D.

#### 3.2.5.4 Flow Number

O ensaio de *Flow Number* seguiu as prescrições da norma americana AASHTO TP 79-15, porém com carga de 204 KPa, sendo realizado na *Universal Test Machine (UTM)* da IPC Global, disponível no laboratório da LMCC. Para cada mistura, também serão ensaiadas três amostras.

Este ensaio já é normatizado no Brasil pela Norma ABNT NBR 16505:2016 Misturas asfálticas – Resistência à deformação permanente, utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida, porém, essa norma foi publicada em 10/08/16 e a pesquisa já se encontrava em andamento.

O ensaio consiste na aplicação de cargas repetidas de 204 KPa em corpos de prova não confinados a uma temperatura de 60 °C, aplicado com tempo de pulso de 0,1 s e repouso de 0,9 s, até a ruptura da amostra.

Neste ensaio, utilizaram-se duas membranas de látex, de espessura aproximada de 1 mm, em cada extremidade do corpo de prova para evitar o efeito de fricção, procedimento este utilizado em outras pesquisas como de Almeida Jr. (2015) e Centofante (2016).

O corpo de prova é colocado na prensa, dois LVDTs são posicionados na parte superior para medida dos deslocamentos verticais gerados pelo carregamento axial cíclico de compressão. A Figura 35 mostra o corpo de prova antes e após a realização do ensaio, e os LVDTs posicionados. O critério adotado para o término do ensaio foi quando a mistura atingiu 10.000 ciclos ou 5% da deformação.

Figura 35 - Corpo de prova antes e após a realização do ensaio



Fonte: Do autor (2018).

Com a média dos deslocamentos dos dois LVDTs, a deformação plástica vertical uniaxial de cada corpo de prova é ajustada ao modelo matemático de Francken, usado para representar o comportamento de ensaios de carga repetida, de modo a reduzir as variabilidades encontradas nos ensaios laboratoriais. Esse modelo é formado pela soma entre uma função de potência e uma função exponencial,

conforme a Equação 30. A parcela formada pela função de potência e pelos coeficientes A e B está relacionada às zonas primária e secundária, enquanto a função exponencial e os coeficientes C e D estão ligados ao comportamento da zona terciária. O parâmetro N, então, é definido como o número do ciclo de carregamento.

$$\varepsilon_p = AN^B + C(e^{DN} - 1) \quad (30)$$

Onde:

N = Número de ciclos;

A, B, C, D = Constantes do modelo de Francken determinadas para cada CP;

Para determinar os coeficientes A, B, C e D, da Equação 14, para cada CP, é utilizada uma otimização numérica em planilha eletrônica, método dos mínimos quadrados, de forma a se obter uma curva de deformação plástica vertical semelhante à obtida experimentalmente.

Após a determinação dos coeficientes, obteve-se a derivada primeira e segunda da curva de deformação plásticas, apresentadas, respectivamente, pelas Equações 31 e 32.

$$\frac{d\varepsilon_p}{dN} = ABN^{B-1} + CD e^{DN} \quad (31)$$

$$\frac{d^2\varepsilon_p}{dN^2} = AB(B-1)N^{B-2} + CD^2 e^{DN} \quad (32)$$

Desse modo, o valor do FN do CP é o ciclo no qual a derivada segunda (Equação 32) é igual à zero, ou quando o valor da segunda derivada muda de positivo para negativo.

Assim, a norma admite uma tolerância de coeficiente de variação, com base no número de amostras, conforme representada na Tabela 12.

Tabela 12 - Coeficiente de variação de média das propriedades de FN

Número de amostras	Coeficiente de variação por média (%)	
	Deformação permanente antes de atingir o FN	Flow Number
2	10,6	14,1
3	8,7	11,5
4	7,5	10,0
5	6,7	8,9
6	6,1	8,2
7	5,7	7,6
8	5,3	7,1
9	5,0	6,7
10	4,7	6,4

Fonte: adaptado de AASHTO T 79 (2015).

### 3.2.6 Ensaios de campo

Nos locais onde as misturas foram utilizadas nas rodovias em camadas de rolamento, para os trechos com tráfego liberado, foram efetuadas medidas do perfil transversal da rodovia com uso de treliça metálica, para medição do ATR, aproximadamente a cada seis meses após a abertura do tráfego.

#### 3.2.6.1 Medidas de ATR em campo

Para medição do afundamento plástico nas trilhas de roda, foi utilizado um equipamento chamado de “treliça”, com haste móvel central, capaz de medir os afundamentos com a precisão de 0,5 mm e que segue os preceitos da norma DNIT 006/2003-PRO. Os valores de flechas encontrados são a média de leituras na trilha de roda externa a cada 5 metros em toda a extensão monitorada. As extensões dos trechos variam entre 35 e 50 metros.

Cada trecho foi marcado para que as medidas consecutivas fossem obtidas sempre nos mesmos locais. O equipamento é posicionado perpendicularmente ao eixo da pista, sobre cada uma das trilhas de roda, para que o afundamento possa ser medido (Figura 36). O trabalho necessita de interrupção no tráfego e sinalização da via para evitar acidentes.

As medições de ATR foram realizadas a cada 6 meses, aproximadamente, após a liberação do tráfego.

Figura 36 - Medida ATR com treliça metálica



Fonte: Do autor (2018).

### 3.3 MATERIAIS UTILIZADOS

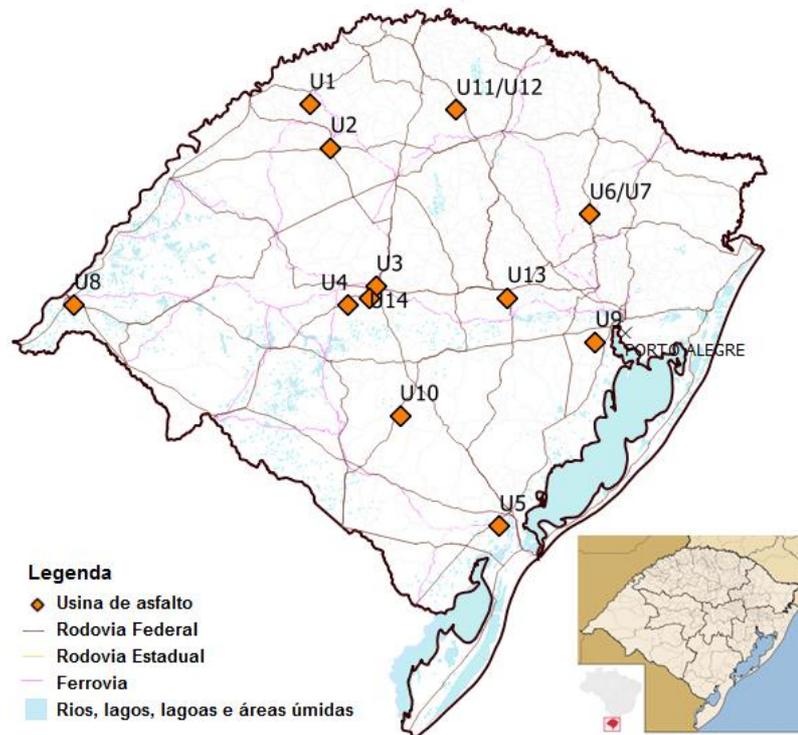
Os materiais empregados nesta pesquisa são misturas asfálticas densas utilizadas em obras de restauração e implantação de rodovias no estado do Rio Grande do Sul, no período de março de 2016 até agosto de 2017, além dos respectivos materiais de sua composição – agregados minerais e ligantes asfálticos.

#### 3.3.1 Ensaios de campo

As misturas foram coletadas em diferentes regiões do RS, objetivando-se caracterizar e avaliar concretos asfálticos com agregados das principais formações geológicas do estado, diferentes faixas granulométricas do DAER e do DNIT, diferentes tipos de ligantes asfálticos e usinas de asfalto em operação, além de situações diversas de tráfego em que as rodovias estaduais são submetidas.

Todas as misturas estudadas foram dosadas pelo método Marshall, conforme informações das empresas executoras. A Tabela 13 apresenta a relação de misturas estudadas, sua respectiva usina, localização, faixa granulométrica e tipo de ligante, além da nomenclatura utilizada no decorrer do trabalho e o mapa na Figura 37 ilustra a localização das usinas estudadas.

Figura 37 - Mapa de localização das usinas amostradas



Fonte: Do autor (2018).

Tabela 13 - Relação de misturas estudadas e nomenclatura utilizada

Usina de asfalto	Município de localização da usina	Faixa granulométrica	Tipo de ligante asfáltico	Nomenclatura utilizada
U1	Santa Rosa	FX A- DAER	50/70	U1-DAER-FXA-50/70
U2	Santo Ângelo	FX B- DAER	50/70	U2-DAER-FXB-50/70
		FX C- DNIT	AMP 60-85	U2-DNIT-FXC-60/85
U3	Itaara	FX C- DNIT	AMP 65-90	U2-DNIT-FXC-65/90
		FX B- DAER	ECOFLEX AB-8	U3-DAER-FXB-ECO
U4	Dilermando de Aguiar	FX C- DNIT	CAP 50/70	U4-DNIT-FXC-50/70
		FX B - DNIT	CAP 50/70	U4-DNIT-FXB-50/70
U5	Capão do Leão	FX B-DNIT	AMP 60-85	U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>
		FX B-DNIT	ECOFLEX AB-8	U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>
		FX B-DAER	ECOFLEX AB-8	U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>
U6	Veranópolis	FX C-DNIT	AMP 60-85	U6-DNIT-FXC-60/85
U7	Veranópolis	FX C-DNIT	AMP 60-85	U7-DNIT-FXC-60/85
U8	Uruguaiana	FX B-DNIT	CAP 50/70	U8-DNIT-FXB-50/70
		FX C-DNIT	CAP 50/70	U8-DNIT-FXC-50/70
U9	Eldorado do Sul	FX C-DNIT	AMP 60-85	U9-DNIT-FXC-60/85
		FX C-DNIT	TLA FLEX	U9-DNIT-FXC-TLAF

(Continua)

Usina de asfalto	Município de localização da usina	Faixa granulométrica	Tipo de ligante asfáltico	Nomenclatura utilizada
U10	Caçapava do Sul	FX C-DNIT	CAP 50/70	U10-DNIT-FXC-50/70
U11	Sarandi	FX A-DAER	CAP 50/70	U11-DAER-FXA-50/70
U12	Sarandi	FX B-DAER	AMP 60/85	U12-DAER-FXB-60/85
		FX C-DAER	AMP 60-85	U12-DAER-FXC-60/85
U13	Santa Cruz do Sul	FX B-DAER	CAP 50/70	U13-DNIT-FXB-50/70
U14	Santa Maria	FXC DNIT	CAP 50/70	U14-DNIT-FXC-50/70
		FXB DNIT	CAP 50/70	U14-DNIT-FXB-50/70
		FXC DNIT	AMP 60-85	U14-DNIT-FXC-60/85

<sup>1</sup> Misturas mornas com aditivo surfactante Evotherm™.  
Fonte: Do autor (2018).

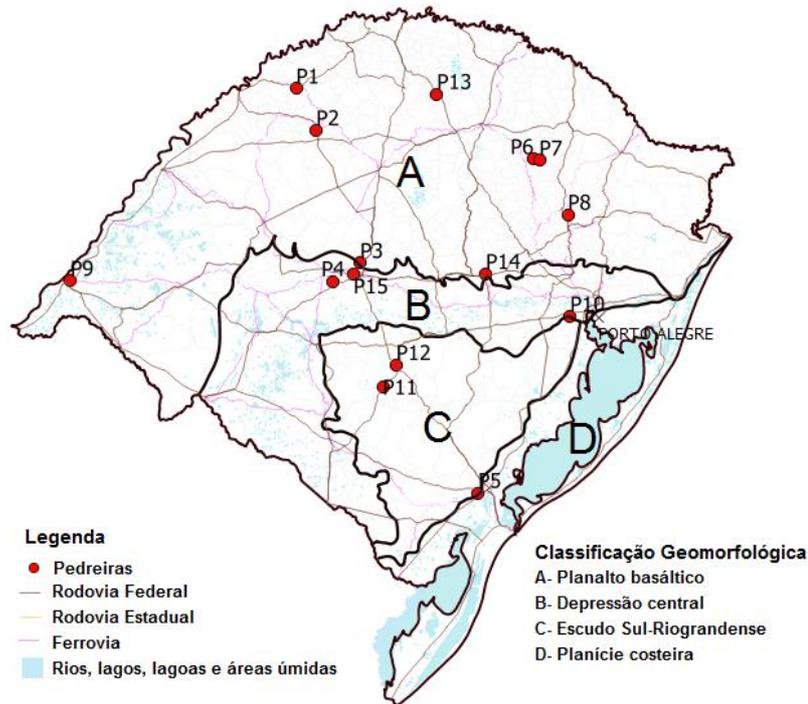
### 3.3.1.1 Agregados minerais

Os materiais granulares utilizados na produção das misturas foram coletados diretamente das unidades de produção, quando efetuada a coleta dos concretos asfálticos. A localização e origem mineralógica dos agregados minerais estão apresentadas nas Figura 38.

De acordo com a Figura 38, algumas áreas de exploração de agregados encontram-se na depressão central. Essas áreas, provavelmente, referem-se a diques, que são fraturas preenchidas por rochas ígneas ou rochas sedimentares clásticas remobilizadas, ou morros testemunhos.

Para as misturas U6-DNIT-FXC-60/85 e U7-DNIT-FXC-60/85, a empresa executora utilizou agregados de 3 britagens diferentes (P6/P7/P8) para a produção das mesmas, sendo o agregado coletado corresponde a essa mistura. Mesma situação ocorre para a mistura U10-DNIT-FXC-50/70, que utiliza agregados de duas britagens diferentes (pó de pedra da P12 e os demais da P11).

Figura 38 - Localização das pedreiras com coleta de material



Fonte: Do autor (2018).

As composições de agregados das misturas coletadas, com os respectivos percentuais, são apresentadas na Tabela 14, juntamente com os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados para Absorção, Abrasão, Equivalente de Areia e Sanidade, conforme valores informados nos projetos de dosagem e ensaios realizados no LMCC.

A geologia das rochas para as respectivas pedreiras, com base na pesquisa de Boeira (2014) e análise visual para as demais, encontra-se na Tabela 15, juntamente com os resultados de morfologia dos agregados para cada fração. As pedreiras estão sendo analisadas pelo grupo de pesquisa GEPPASV para identificação correta da formação geológica das rochas.

É possível perceber que, com exceção da Pedreira P15, que apresenta sanidade de 16,5 %, para todas as demais, os agregados atendem os limites das especificações vigentes no estado para produção de misturas asfálticas.

Tabela 14 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados minerais

Pedreira	Mistura	Percentagem dos agregados por mistura							Absorção (%)	Abrasão (%)	Equivalente de areia (%)	Sanidade (%)
		Brita 1½"	Brita 1"	Brita ¾"	Brita 3/8"	Pó de pedra	Areia	Cal				
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)				
P1	U1-DAER-FXA-50/70	0,0	0,0	0,0	27,0	73,0	0,0	0,0	1,0	23,1	61,4	3,0
P2	U2-DAER-FXB-50/70	0,0	0,0	20,0	16,0	59,0	5,0	0,0	1,4	16,0	56,9	3,2
	U2-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	30,0	20,0	50,0	0,0	0,0	1,4			
	U2-DNIT-FXC-65/90	0,0	0,0	30,0	20,0	50,0	0,0	0,0	1,4			
P3	U3-DAER-FXB-ECO	0,0	0,0	20,0	20,0	58,0	0,0	2,0	2,8	14,5	60,7	0,4
P4	U4-DNIT-FXC-50/70	0,0	0,0	25,0	20,0	55,0	0,0	2,0	1,5	11,0	57,7	1,9
	U4-DNIT-FXB-50/70	0,0	0,0	35,0	15,0	50,0	0,0	0,0	0,3			1,9
P5	U5-DNIT-FXB-60/85¹	0,0	0,0	40,0	15,0	44,0	0,0	1,0	0,5	26,4	71,0	5,4
	U5-DNIT-FXB-ECO¹	0,0	0,0	35,0	18,0	46,0	0,0	1,0	0,5			
	U5-DAER-FXB-ECO¹	0,0	0,0	20,0	25,0	54,0	0,0	1,0	0,5			
P6/P7/P8	U6-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	27,0	20,0	53,0	0,0	0,0	2,9	11,8	62,5	3,7
	U7-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	27,0	20,0	53,0	0,0	0,0	2,9			
P9	U8-DNIT-FXB-50/70	0,0	0,0	31,0	10,0	57,0	0,0	2,0	2,6	12,5	61,7	4,7
	U8-DNIT-FXC-50/70	0,0	0,0	24,0	12,0	62,0	0,0	2,0	2,6			
P10	U9-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	25,0	15,0	60,0	0,0	0,0	1,0	19,8	63,0	4,8
	U9-DNIT-FXC-TLAF	0,0	0,0	25,0	15,0	60,0	0,0	0,0	1,0			
P11/P12	U10-DNIT-FXC-50/70	0,0	0,0	21,0	18,0	60,0	0,0	1,0	0,4	14,8	58,3	4,3
P13	U11-DAER-FXA-50/70	0,0	0,0	0,0	36,0	64,0	0,0	0,0	1,9	16,9	69,9	1,2
	U12-DAER-FXB-60/85	0,0	0,0	20,0	20,0	60,0	0,0	0,0	1,9			
	U12-DAER-FXC-60/85	0,0	6,0	21,0	10,0	59,0	0,0	0,0	1,5			
P14	U13-DNIT-FXB-50/70	0,0	0,0	32,0	28,0	40,0	0,0	0,0	1,0	13,1	60,8	5,8
P15	U14-DNIT-FXC-50/70	0,0	0,0	24,0	25,0	50,0	0,0	1,0	1,0	13,7	63,0	16,5
	U14-DNIT-FXB-50/70	10,0	0,0	44,0	0,0	49,0	0,0	1,0	1,0			
	U14-DNIT-FXC-60/85	0,0	0,0	24,0	25,0	50,0	0,0	1,0	1,0			

Fonte: Do autor (2018).

Tabela 15 - Resultados dos ensaios de morfologia dos agregados minerais

Pedreira	Mineralogia	Propriedades Morfológicas dos Agregados																								
		Índice de forma			Lamelaridade			Esfericidade				Angularidade do Miúdo			Angularidade do Graúdo				Textura				Forma 2D			
		1"	3/4"	3/8"	1"	3/4"	3/8"	1"	3/4"	3/8"	Pó de pedra (grosso)	3/8"	Pó de pedra (grosso)	Pó de pedra (fino)	1"	3/4"	3/8"	Pó de pedra (grosso)	1"	3/4"	3/8"	Pó de pedra (grosso)	3/8"	Pó de pedra (grosso)	Pó de pedra (fino)	
P1	Basalto	-		0,79	-	-	25,90	-	-	0,71	0,70	2858,32	2741,14	-	-	-	2618,07	2890,27	-		679,72	724,27	7,64	7,72	-	
P2	Basalto	-	0,77	0,55	-	25,80	50,80	-	-	0,55	0,58	3290,70	3408,00	-	-	3000,50	3133,70	3183,20	-	737,00	774,10	753,70	9,27	8,39	-	
P3	Riodacito	-	0,94	0,78	-	9,20	27,40	-	0,75	0,80	-	3214,14	3200,44	-	-	2915,36	3081,58	-	-	349,39	369,26	-	7,80	8,00	-	
P4	Basalto <sup>1</sup>	-	0,87	0,75	-	14,80	17,80	-	0,77	0,80	0,82	2765,35	3434,19	-	-	2762,40	2759,03	2634,29	-	506,51	624,88	704,88	7,38	8,49	-	
P5	Granítica	-	0,84	0,70	-	20,70	37,00	-	0,64	0,64	0,66	3691,08	2971,48	-	-	3088,08	3286,51	3418,22	-	211,71	196,41	168,45	9,15	8,56	-	
P6/P7/P8	Basalto <sup>1</sup>	-	0,81	0,78	-	20,80	19,20	-	0,67	0,72	-	2844,29	3065,07	-	-	2970,39	2973,40	-	-	561,62	465,37	-	7,83	8,66	-	
P9	Basalto <sup>1</sup>	-	0,94	0,72	-	9,70	27,80	-	0,72	0,72	0,73	3011,00	3101,40	-	-	2619,62	2816,03	2745,10	-	527,88	567,00	521,91	8,59	7,99	-	
P10	Granítica	-	0,87	0,81	-	18,30	28,70	-	0,64	0,65	0,69	3605,24	3016,53	-	-	3160,87	3219,58	3200,04	-	354,79	253,47	240,18	9,64	8,74	-	
P11/P12	Rocha metamórfica	-	0,76	0,79	-	29,70	17,60	-	0,63	0,65	-	3278,34	2791,68	-	-	3265,86	2956,56	-	-	470,97	485,59	-	9,20	8,36	-	
P13	Diabásio	0,80	0,92	0,82	23,40	8,20	12,50	0,66	0,73	0,76	0,68	3060,42	2764,61	2765,70	2837,62	2478,66	2592,01	3198,96	533,58	614,57	661,48	653,84	7,44	8,11	7,96	
P14	Basalto <sup>1</sup>	-	0,83	0,71	-	24,50	29,50	-	0,65	*	-	*	*	-	-	2829,41	*	-	-	701,66	*	-	*	*	-	
P15	Basalto <sup>1</sup>	0,70	0,73	0,66	28,90	26,25	32,60	-	0,70	0,73	0,69	3001,70	2696,17	-	-	2863,51	2735,66	3046,18	-	608,65	428,74	532,43	8,00	8,10	-	

\*Amostras serão ensaiadas novamente  
 Fonte: Do autor (2018).

### 3.3.1.2 Ligantes asfálticos

Os ligantes asfálticos utilizados são o CAP 50/70, o AMP 60-85, o AMP 65-90, o TLA FLEX e o AB-08. Algumas misturas utilizaram o aditivo surfactante Evotherm™ para produção de misturas asfálticas mornas, acrescido em função do peso do ligante. As informações a respeito deste aditivo e outras observações relevantes são apresentadas na Tabela 16.

Os resultados da caracterização dos ligantes foram obtidos dos laudos fornecidos pela distribuidora de material para a obra e disponibilizados pelas empreiteiras ou órgãos rodoviários, sendo apresentados nas Tabelas 17, 18, 19, 20 e 21, respectivamente. As especificações de qualidade dos materiais asfálticos foram atendidas segundo especificações em vigor.

Tabela 16 - Ligantes asfálticos utilizados nas misturas

Mistura	Tipo de Ligante	Observações
U1-DAER-FXA-50/70	CAP 50-70	-
U2-DAER-FXB-50/70	CAP 50-70	-
U2-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	-
U2-DNIT-FXC-65/90	AMP 65-90	-
U3-DAER-FXB-ECO	ECOFLEX AB-08	0,03 % dope
U4-DNIT-FXC-50/70	CAP 50-70	-
U4-DNIT-FXB-50/70	CAP 50-70	-
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>	AMP 60-85	0,4% Evhoterm™
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	ECOFLEX AB-08	0,4% Evhoterm™
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	ECOFLEX AB-08	0,4% Evhoterm™
U6-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	Modificado na obra
U7-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	Modificado na obra
U8-DNIT-FXB-50/70	CAP 50/70	-
U8-DNIT-FXC-50/70	CAP 50/70	-
U9-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	0,05 % dope
U9-DNIT-FXC-TLAF	TLA FLEX	0,04 % dope
U10-DNIT-FXC-50/70	CAP 50/70	-
U11-DAER-FXA-50/70	CAP 50/70	-
U12-DAER-FXB-60/85	AMP 60-85	-
U12-DAER-FXC-60/85	AMP 60-85	-
U13-DNIT-FXB-50/70	CAP 50/70	-
U14-DNIT-FXC-50/70	CAP 50/70	-
U14-DNIT-FXB-50/70	CAP 50/70	-
U14-DNIT-FXC-60/85	AMP 60-85	-

Tabela 17 - Propriedades dos ligantes asfálticos convencionais (CAP 50-70)

Misturas	Propriedades / Especificações (DNIT 095/2006 – EM)						
	Penetração (0,1 mm) NBR 6576	Ponto de Amolecimento (°C) NBR 6560	Viscosidade Brookfield 135 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 150 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 177 °C (cp) NBR 15184	Ponto de Fulgor (°C) NBR 11341	Densidade Relativa NBR 6296
	50 a 70	46 min	274 min	112 min	57 a 285 min	235 min	
U1-DAER-FXA-50/70	55	50	348	174	65	>236	1,003
U2-DAER-FXB-50/70	60	49,4	335	169	64	>236	1,002
U4-DNIT-FXC-50/70	60	49,4	335	169	64	>236	1,002
U4-DNIT-FXB-50/70	51	49,4	335	162	64	>236	1,001
U8-DNIT-FXB-50/70	51	50,8	282	162	63	>236	1,000
U8-DNIT-FXC-50/70	57	48,2	335	162	66	>236	1,000
U10-DNIT-FXC-50/70	57	48,2	335	162	66	>236	1,000
U11-DAER-FXA-50/70	56	49,5	343	161	65	>236	1,000
U13-DNIT-FXB-50/70	57	48,2	355	162	66	>236	1,000
U14-DNIT-FXC-50/70	52	48,6	328	163	64	>236	1,001
U14-DNIT-FXB-50/70	58	49,4	295	152	60	>236	1,001

Fonte: Laudos fornecidos pelas distribuidoras (2018).

Tabela 18 - Propriedades dos ligantes asfálticos modificados (AMP 60-85)

Misturas	Propriedades / Especificações (DNIT 129/2011 – EM)							Densidade Relativa NBR 6296
	Penetração (0,1 mm) NBR 6576	Ponto de Amolecimento (°C) NBR 6560	Viscosidade Brookfield 135 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 150 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 177 °C (cp) NBR 15184	Recuperação elástica Ductilometro (%) NBR-15086	Ponto de Fulgor (°C) NBR 11341	
	40 a 70	60 min	3.000,0 máx	2.000,0máx	1.000,0máx	85 mín	235 min	
U2-DNIT-FXC-60/85	56	68	991	466	168	86	>236	1,005
U5-DNIT-FXB-60/85	51	65,2	1850	739	199	86	>236	1,008
U6-DNIT-FXC-60/85	48	66	1395	705	384	87	>236	1,028
U7-DNIT-FXC-60/85	48	66	1395	705	384	87	>236	1,028
U9-DNIT-FXC-60/85	56,5	72	1115	471	170	86,5	>236	-
U12-DAER-FXB-60/85	52	72	1610	620	340	88,5	>240	1,01
U12-DAER-FXC-60/85	52	72	1610	620	340	88,5	>240	1,01
U14-DNIT-FXC-60/85	56	73	1252	581	208	86,5	>236	1,003

Fonte: Laudos fornecidos pelas distribuidoras (2018).

Tabela 19 - Propriedades do ligante asfáltico modificado (AMP 65-90)

Misturas	Propriedades / Especificações (DNIT 129/2011 – EM)							Densidade Relativa NBR 6296
	Penetração (0,1mm) NBR 6576	Ponto de Amolecimento (°C) NBR 6560	Viscosidade Brookfield 135 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 150 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 177 °C (cp) NBR 15184	Recuperação elástica Ductilometro (%) NBR-15086	Ponto de Fulgor (°C) NBR 11341	
	50 a 70	65 min	3.000,0 máx	2.000,0máx	1.000,0máx	90 mín	235 min	
U2-DNIT-FXC-65/90	50	87,5	1448	842	302	91	>236	1,006

Fonte: Laudos fornecidos pelas distribuidoras (2018).

Tabela 20 - Propriedades dos ligantes modificados por borracha (ECOFLEX AB-08)

Misturas	Propriedades / Especificações (DNIT 111/2009 – EM)					
	Penetração (0,1 mm) NBR 6576	Ponto de Amolecimento (°C) NBR 6560	Viscosidade Brookfield 175 °C – spindle 3,20 rpm NBR 15529	Recuperação elástica Ductilometro (%) NBR-15086	Ponto de Fulgor (°C) NBR 11341	Densidade Relativa NBR 6296
	30 a 70	50 min	800-2000	50 min	235 min	
U3-DAER-FXB-ECO	53	63	1850	70	>240	1,01
U5-DNIT-FXB-ECO	48	56,3	1318	68	279	1,019
U5-DAER-FXB-ECO	48	56,3	1318	68	279	1,019

Fonte: Laudos fornecidos pelas distribuidoras (2018).

Tabela 21 - Propriedades do ligante asfáltico modificado (TLA FLEX)

Misturas	Propriedades / Especificações (Informação fornecida pela distribuidora do ligante)							
	Penetração (0,1 mm) NBR 6576	Ponto de Amolecimento (°C) NBR 6560	Viscosidade Brookfield 135 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 150 °C (cp) NBR 15184	Viscosidade Brookfield 177 °C (cp) NBR 15184	Recuperação elástica Ductilometro (%) NBR-15086	Ponto de Fulgor (°C) NBR 11341	Densidade Relativa NBR 6296
	20 a 40	60 min	1000 a 5000	500 a 2500	100 a 1600	60 mín	235 min	
U9-DNIT-FXC- TLA	29	70,6	1528	698	249	80	>236	1,094

Fonte: Laudos fornecidos pelas distribuidoras (2018).

### 3.3.1.3 Parâmetros volumétricos e características dos concretos asfálticos

Os parâmetros volumétricos e as características das misturas coletadas, conforme projetos de dosagem estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Parâmetros volumétricos e características das misturas

Mistura	Teor de ligante (%)	Vv (%)	VAM (%)	RBV (%)	DMM <sup>1</sup> ou DMT <sup>2</sup>	Gmb	Estabilidade (Kg)	Fluência 1/100" (mm)	RT (MPa)
U1-DAER-FXA-50/70	5,03	4,00	16,70	76,00	2,640 <sup>1</sup>	2,535	1145,00	3,30	1,31
U2-DAER-FXB-50/70	5,10	4,00	17,20	76,10	2,678 <sup>2</sup>	2,568	1385,00	3,11	-
U2-DNIT-FXC-60/85	5,15	4,00	18,00	76,00	2,669 <sup>1</sup>	2,590	1630,00	3,56	2,10
U2-DNIT-FXC-65/90	5,15	4,00	18,00	76,00	2,669 <sup>1</sup>	2,590	-	-	-
U3-DAER-FXB-ECO	6,76	4,10	18,60	78,30	2,393 <sup>1</sup>	2,215	1287,00	3,20	-
U4-DNIT-FXC-50/70	5,10	3,70	16,50	78,00	2,635 <sup>1</sup>	2,537	1027,00	2,92	-
U4-DNIT-FXB-50/70	4,70	3,49	15,10	78,00	2,670 <sup>2</sup>	2,551	1230,00	2,10	1,19
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>	4,80	4,00	15,10	75,00	2,442 <sup>1</sup>	2,345	1190,00	3,30	-
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	6,20	4,00	18,00	78,00	2,388 <sup>2</sup>	2,293	710,00	2,79	-
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	6,02	4,00	17,30	76,70	2,389 <sup>1</sup>	2,293	1351,00	2,55	1,30
U6-DNIT-FXC-60/85	5,40	4,50	18,80	75,00	2,354 <sup>1</sup>	2,254	1750,00	3,56	2,15
U7-DNIT-FXC-60/85	5,40	4,50	18,80	75,00	2,354 <sup>1</sup>	2,254	1750,00	3,56	2,15
U8-DNIT-FXB-50/70	4,60	5,03	16,25	69,05	2,584 <sup>2</sup>	2,454	1042,00	3,15	-
U8-DNIT-FXC-50/70	5,00	4,05	16,30	75,15	2,568 <sup>2</sup>	2,464	1210,00	3,04	-
U9-DNIT-FXC-60/85	5,24	3,57	16,32	78,20	2,374 <sup>1</sup>	2,289	1292,00	2,96	-
U9-DNIT-FXC-TLAF	5,49	3,47	16,37	78,85	2,376 <sup>1</sup>	2,293	1542,00	2,99	-
U10-DNIT-FXC-50/70	4,84	3,71	15,81	76,16	2,590 <sup>1</sup>	2,491	1495,00	3,02	-
U11-DAER-FXA-50/70	5,55	4,00	17,00	76,00	2,674 <sup>2</sup>	2,562	1390,00	3,30	1,68
U12-DAER-FXB-60/85	5,00	4,00	15,80	75,00	2,688 <sup>2</sup>	2,580	1450,00	3,05	1,79
U12-DAER-FXC-60/85	5,15	4,00	17,20	77,00	2,692 <sup>2</sup>	2,584	1765,00	3,30	1,60
U13-DNIT-FXB-50/70	4,83	4,80	16,20	71,02	2,602 <sup>1</sup>	2,485	1132,85	2,70	1,10
U14-DNIT-FXC-50/70	5,00	4,07	15,47	81,26	2,627 <sup>2</sup>	2,520	1234,43	3,11	1,19
U14-DNIT-FXB-50/70	4,60	4,31	14,78	79,25	2,666 <sup>2</sup>	2,551	1192,82	2,73	1,12
U14-DNIT-FXC-60/85	5,10	3,93	15,47	82,22	2,640 <sup>2</sup>	2,552	1244,30	3,20	1,20

<sup>1</sup> Misturas mornas com aditivo surfactante Evotherm™  
 Fonte: Do autor (2018).

Como é possível observar, alguns projetos de dosagens não apresentavam valores para a RT. Além disso, 12 projetos utilizam o DMT para dosagem, o que pode ser explicado pelo fato de os órgãos rodoviários não exigirem o cálculo utilizando a DMM e a maioria das empreiteiras não disponibilizam do equipamento.

### 3.3.1.4 Usinas asfálticas

As características e os tipos das usinas amostradas, fabricantes dos equipamentos, assim como as capacidades de produção estão apresentados na Tabela 23 e foram retirados de consultas aos catálogos técnicos dos fabricantes dos respectivos equipamentos.

Tabela 23 - Características das usinas asfálticas

<b>Usina</b>	<b>Tipo de usina</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Capacidade de Produção (Toneladas/hora)</b>
U1	Contínua contrafluxo	LINTEC-IXON	80
U2	Contínua contrafluxo	Ciber	80-120
U3	Contínua contrafluxo	LINTEC-IXON	80
U4	Contínua fluxo paralelo	Cifali*	100-150
U5	Contínua contrafluxo	Ciber	80-120
U6	Contínua contrafluxo	Terex	80
U7	Contínua contrafluxo	Ticel	100
U8	Contínua contrafluxo	Terex	140
U9	Gravimétrica	Ciber	100-140
U10	Gravimétrica	Cifali*	60-80
U11	Contínua contrafluxo	LINTEC-IXON	40-60
U12	Gravimétrica	Ciber	60-80
U13	Contínua contrafluxo	Terex	80
U14	Contínua contrafluxo	AMMANN	100

\* A Cifali não existe mais, sendo que a sua unidade industrial agora é propriedade da BOMAG Marini Latin America.

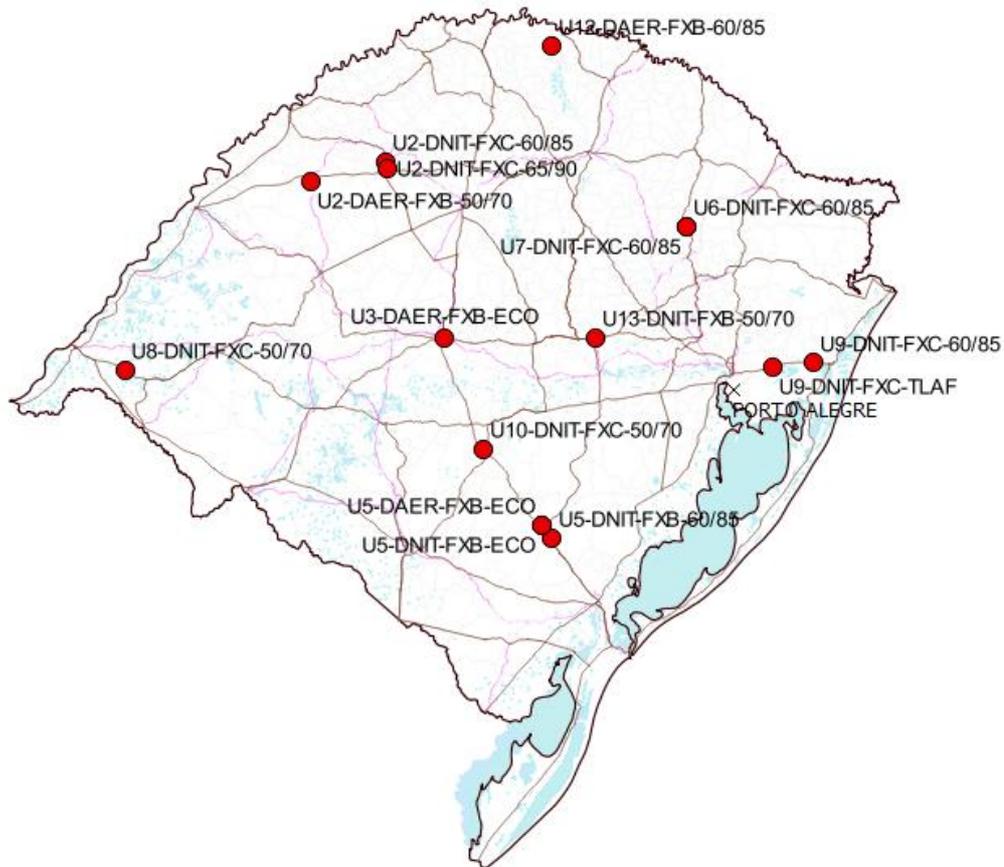
Fonte: Do autor (2018).

A partir dessas informações, percebe-se a predominância na utilização de usinas contínuas contrafluxo.

### 3.3.1.5 Trechos monitorados

As misturas analisadas foram utilizadas em diferentes trechos de rodovias do estado, sendo que quinze dessas tiveram seus trechos identificados por meio de Sistema de Posicionamento Global (GPS) e marcação na pista para acompanhamento da evolução do ATR. As localizações dos trechos monitorados estão apresentadas na Figura 39.

Figura 39 - Localização dos trechos monitorados



Fonte: Do autor (2018).

As características das rodovias monitoradas para avaliação do desempenho quanto à deformação permanente, suas localizações, tipos de obras, espessuras das camadas de revestimento e a data construção são apresentadas na Tabela 24. As demais misturas avaliadas neste trabalho, também apresentadas na Tabela 24, no entanto, não tiveram monitoração em função de suas características, como as camadas de binder e reperfilagem, por exemplo.

Para os dados de tráfego, que serão apresentados juntamente com o desempenho em campo, com exceção das rodovias concedidas, foram utilizadas as contagens disponíveis nos projetos das respectivas obras, fornecidos pelos órgãos rodoviários e disponíveis nos projetos de engenharia ou em contagens realizadas pelo grupo de pesquisa GEPPASV. Então, o número de solicitações foi projetado adotando-se uma taxa de 3% ao ano até a data de abertura do tráfego e posteriormente até as leituras de ATR.

Com os dados obtidos nestes levantamentos, foi possível estimar o número de solicitações de um eixo Padrão (N) durante o período de monitoramento dos trechos. Na realização do cálculo do número de solicitações de eixo padrão (N), foi seguida as orientações do Manual de Tráfego do DNIT (2006) para o cálculo do FEC sugeridos pela USACE, utilizando como premissa que todos os veículos passavam no trecho com a carga máxima legal do eixo, já que não existiam dados de pesagem disponíveis.

Para os trechos das misturas U5 e U9, solicitou-se às concessionárias responsáveis por cada trecho os dados da praça de pedágio mais próxima do trecho. Esses dados apresentam algumas limitações, mas servem como uma boa base de informações para estimar o número N.

Para os trechos da usina U9, conforme pesquisa de Mattos (2014), ao avaliar dois trechos na mesma rodovia, o autor considerou a estimativa de que 15% do tráfego de veículos comerciais deve ser reduzido para representar a parcela de tráfego noturno que trafega pela faixa central e não passa pela faixa dos trechos monitorados.

Tabela 24 - Localização e características dos trechos estudados

Mistura	Rodovia	Coordenadas Km inicial		Km inicial	Obra	Camada/ espessura total da camada	Características do local	Data da construção
		SIRGAS 2000 X	SIRGAS 2000 Y					
U1-DAER-FXA-50/70	ERS-344	-	-	-	Restauração	Reperfilagem	-	08/07/16
U2-DAER-FXB-50/70 <sup>1</sup>	ERS-168	-28.459094	-54.954046	75+220 LD	Restauração	Rolamento/ 4cm	Região plana	24/08/16
U2-DNIT-FXC-60/85 <sup>1</sup>	ERS-344	-28.305725	-54.281266	603+020 LD	Restauração	Rolamento/ 4cm	Rampa ascendente	03/06/16
U2-DNIT-FXC-65/90 <sup>1</sup>	ERS-344	-28.358246	-54.268361	597+310 LD	Restauração	Rolamento/ 4cm	Região plana	29/04/16
U3-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	ERS-509	-29,694034	-53,758394	2+000 LD	Duplicação	Rolamento/ 10 cm	Região plana	31/03/16
U4-DNIT-FXC-50/70	BR-287	-	-	-	Manutenção	Tapa buracos	-	16/10/16
U4-DNIT-FXB-50/70	BR-287	-	-	-	Duplicação	Binder	-	19/04/17
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>	BR-392	-31.246653	-52.796652	139+650 LD	Restauração	Rolamento/ 9 cm	Região plana	08/09/16
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	BR-392	-31.146907	-52.882510	154+510 LD	Restauração	Rolamento/ 9 cm	Rampa ascendente	25/08/16
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	BR-392	-31.146055	-52.883335	154+570LD	Restauração	Rolamento/ 9 cm	Rampa ascendente	25/08/16
U6-DNIT-FXC-60/85 <sup>1</sup>	RS-470	-28,819714	-51,591321	161+655 LE	Restauração	Rolamento/ 9 cm	Região plana	02/12/16
U7-DNIT-FXC-60/85 <sup>1</sup>	RS-470	-28,818664	-51,592976	161+540 LE	Restauração	Rolamento/ 9 cm	Região plana	02/12/16
U8-DNIT-FXB-50/70	BR-290	-	-	-	Restauração	Binder	-	24/02/17
U8-DNIT-FXC-50/70 <sup>1</sup>	BR-290	-29,944434	-56,614221	672+755 LE	Restauração	Rolamento/ 10 cm	Região plana	02/03/17
U9-DNIT-FXC-60/85 <sup>1</sup>	BR-290	-29,889350	-50,461229	20+640 LD	Manutenção	Remendos / 5 cm	Região Plana	23/02/17
U9-DNIT-FXC-TLAF <sup>1</sup>	BR-290	-30,033613	-51,325860	111+000 LE	Restauração	Rolamento/ 5 cm	Região Plana	07/03/17
U10-DNIT-FXC-50/70 <sup>1</sup>	BR-392	-30,558370	-53,408503	247+700 LE	Manutenção	Remendos/ 5 cm	Região plana	14/03/17
U11-DAER-FXA-50/70	Ruas Prefeitura	-	-	-	Manutenção	Tapa buracos	-	21/03/17
U12-DAER-FXB-60/85 <sup>1</sup>	RS-406	-27,292398	-52,692403	1+960	Restauração	Rolamento/ 4 cm	Região plana	22/03/17
U12-DAER-FXC-60/85	RS-406	-	-	-	Restauração	Binder	-	21/03/17
U13-DNIT-FXB-50/70 <sup>1</sup>	RS-287	-29,690117	-52,406432	-	Duplicação	Rolamento/ 10 cm	Região Plana	05/04/17
U14-DNIT-FXC-50/70	RS-287	-	-	-	Duplicação	Binder	-	22/04/17
U14-DNIT-FXB-50/70	RS-287	-	-	-	Duplicação	Binder	-	27/07/17
U14-DNIT-FXC-60/85 <sup>2</sup>	RS-287	-	-	-	Duplicação	Rolamento	-	01/08/17

<sup>1</sup> Trechos que tiveram o ATR monitorado

<sup>2</sup> O trecho ainda não foi liberado ao tráfego

Fonte: Do autor (2018).

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos todos os resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa, seguindo os procedimentos previstos na metodologia. Os resultados experimentais contemplam as características das misturas estudadas, bem como os resultados das propriedades mecânicas obtidos por meio dos ensaios de MR, RT, módulo complexo e *Flow Number*. Além disso, é abordado o desempenho em campo para a deformação permanente.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS ENSAIADAS

#### 4.1.1 Teor, granulometria e densidade máxima da mistura

Para os concretos asfálticos analisados nesta pesquisa, tomando como referência o projeto de dosagem utilizado para produção das mesmas, percebem-se consideráveis variações quanto ao teor de ligante asfáltico e Densidade Máxima da Mistura, os quais são apresentadas na Tabela 25.

Para as 24 misturas estudadas, 12 apresentaram teor fora dos limites aceitáveis para as especificações de serviço no país,  $\pm 0,3\%$ , com diferenças de até 1% de teor de ligante. Na pesquisa de Moura (2010), ao avaliar 10 misturas produzidas em usina de asfalto utilizando o ensaio do método soxlet (refluxo), o autor encontrou como resultado todos os teores fora dos limites normativos.

Para a Densidade Máxima da Mistura, quando se utilizou a DMT na dosagem, a comparação fica prejudicada, já para as demais, considerando a DMM, é possível observar variações consideráveis de densidade, que podem ser explicadas em função das variações de teor e granulometria.

Apresentam-se nas Figuras 40 a 63 as distribuições granulométricas encontradas para cada mistura, a distribuição granulométrica de projeto, bem como às suas respectivas faixas. Dentre as 24 misturas, apenas 8 apresentam os percentuais de todas as peneiras dentro das faixas de trabalho dos projetos de dosagem.

Sabe-se que os resultados de teor e granulometria utilizando o Rotarex apresentam elevada variação e dispersão de resultados, fato comprovado na pesquisa de Gonçalves (2017), na qual o autor avaliou misturas de diferentes

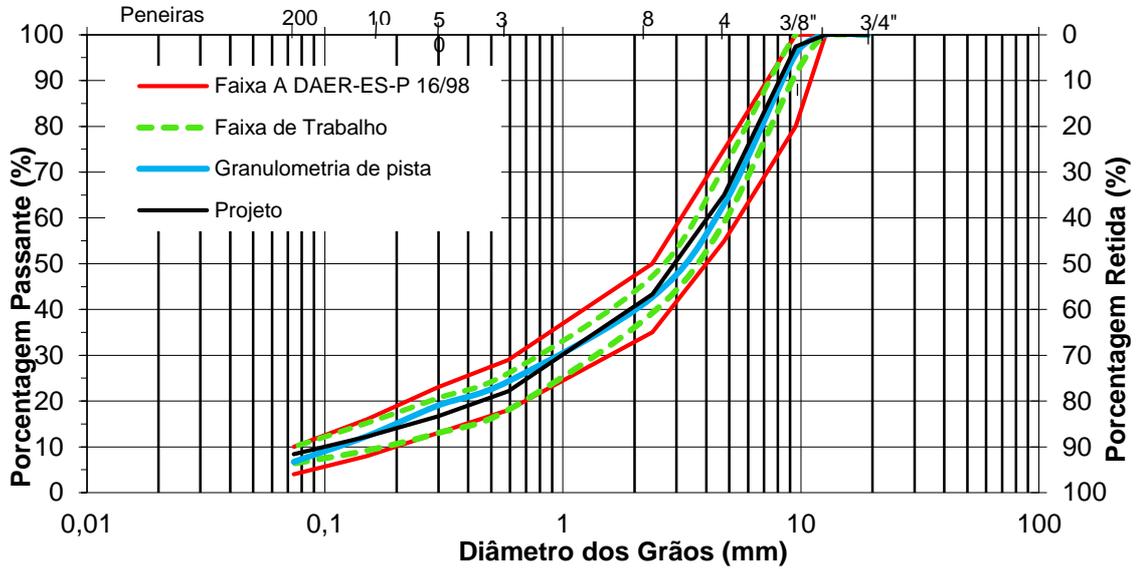
formações geológicas do RS e dois tipos de ligante asfáltico – CAP 50/70 e AMP 60-85. Para a presente pesquisa, no entanto, os desvios podem ser ocasionados tanto devido à variabilidade de ensaio como devido à coleta ou produção.

Tabela 25 - Variações do teor de ligante e Densidade Máxima das misturas

Mistura	Teor de ligante (%)			Densidade Máxima da mistura		
	Projeto	Mistura	Diferença (%)	DMT (projeto)	DMM (projeto)	DMM (ensaio)
U1-DAER-FXA-50/70	5,03	5,84	0,81		2,640	2,708
U2-DAER-FXB-50/70	5,10	5,15	0,05	2,678		2,735
U2-DNIT-FXC-60/85	5,15	4,31	-0,84		2,669	2,752
U2-DNIT-FXC-65/90	5,15	5,18	0,03		2,669	2,743
U3-DAER-FXB-ECO	6,76	6,80	0,04		2,393	2,348
U4-DNIT-FXC-50/70	5,10	6,16	1,06		2,635	2,637
U4-DNIT-FXB-50/70	4,70	5,46	0,76	2,670		2,677
U5-DNIT-FXB-60/85	4,80	4,85	0,05		2,442	2,438
U5-DNIT-FXB-ECO	6,20	5,75	-0,45	2,388		2,414
U5-DAER-FXB-ECO	6,02	5,91	-0,11		2,389	2,391
U6-DNIT-FXC-60/85	5,40	5,53	0,13		2,354	2,429
U7-DNIT-FXC-60/85	5,40	5,60	0,20		2,354	2,371
U8-DNIT-FXB-50/70	4,60	4,71	0,11	2,584		2,669
U8-DNIT-FXC-50/70	5,00	5,12	0,12	2,568		2,664
U9-DNIT-FXC-60/85	5,24	5,87	0,63		2,374	2,428
U9-DNIT-FXC-TLAF	5,49	5,27	-0,22		2,376	2,430
U10-DNIT-FXC-50/70	4,84	5,33	0,49		2,590	2,597
U11-DAER-FXA-50/70	5,55	4,97	-0,58	2,674		2,700
U12-DAER-FXB-60/85	5,00	5,67	0,67	2,688		2,696
U12-DAER-FXC-60/85	5,15	5,44	0,29	2,692		2,719
U13-DNIT-FXB-50/70	4,83	5,42	0,59		2,602	2,652
U14-DNIT-FXC-50/70	5,00	5,39	0,39	2,627		2,551
U14-DNIT-FXB-50/70	4,60	5,13	0,53	2,666		2,623
U14-DNIT-FXC-60/85	5,10	4,81	-0,29	2,640		2,650

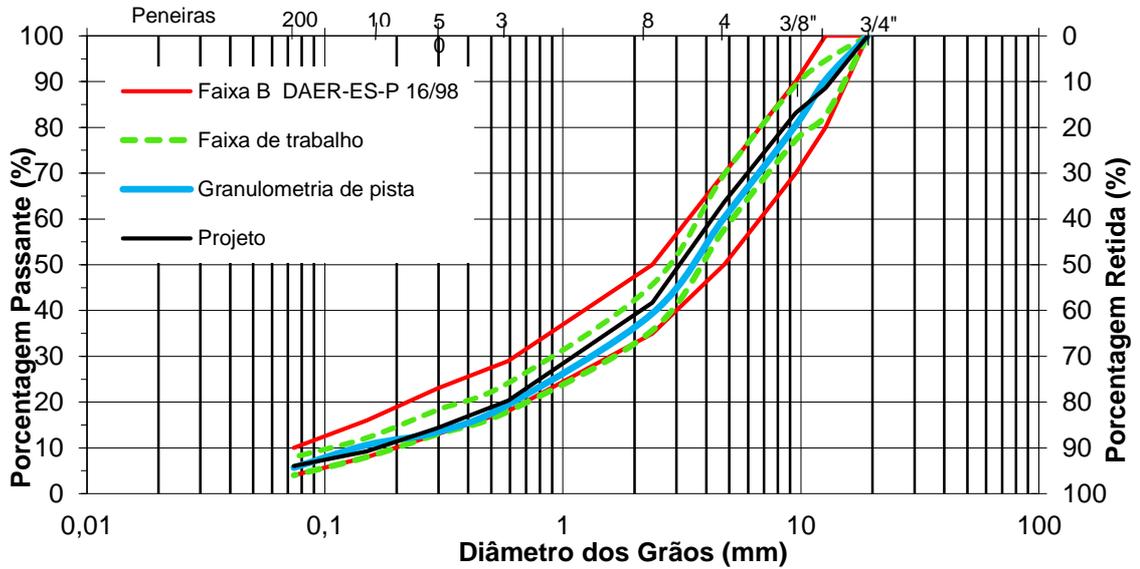
Fonte: Do autor (2018).

Figura 40 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura da U1-DAER-FXA-50/70



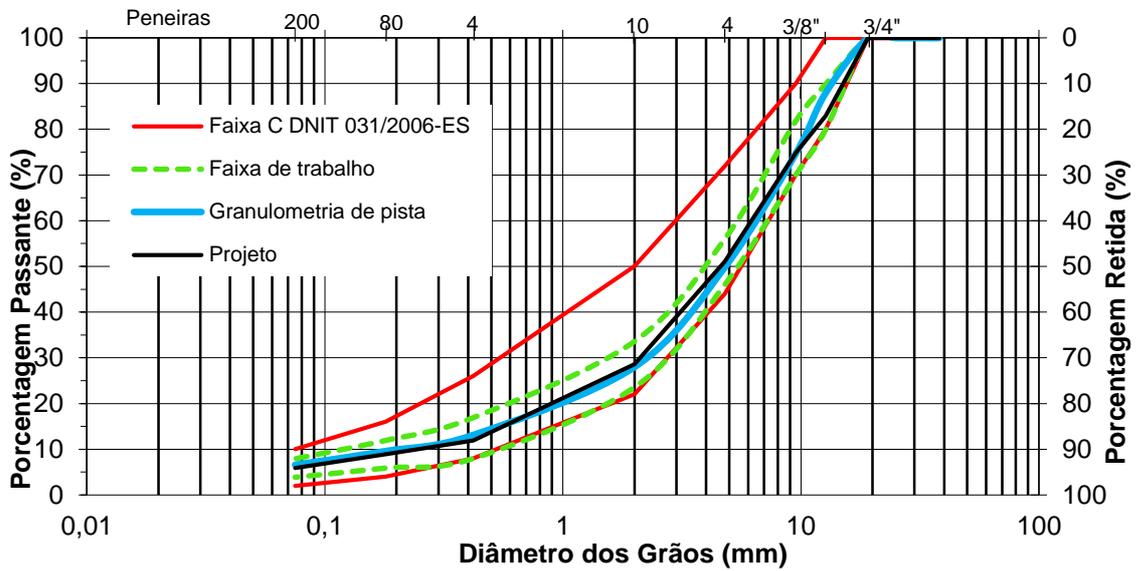
Fonte: Do autor (2018).

Figura 41 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho mistura U2-DAER-FXB-50/70



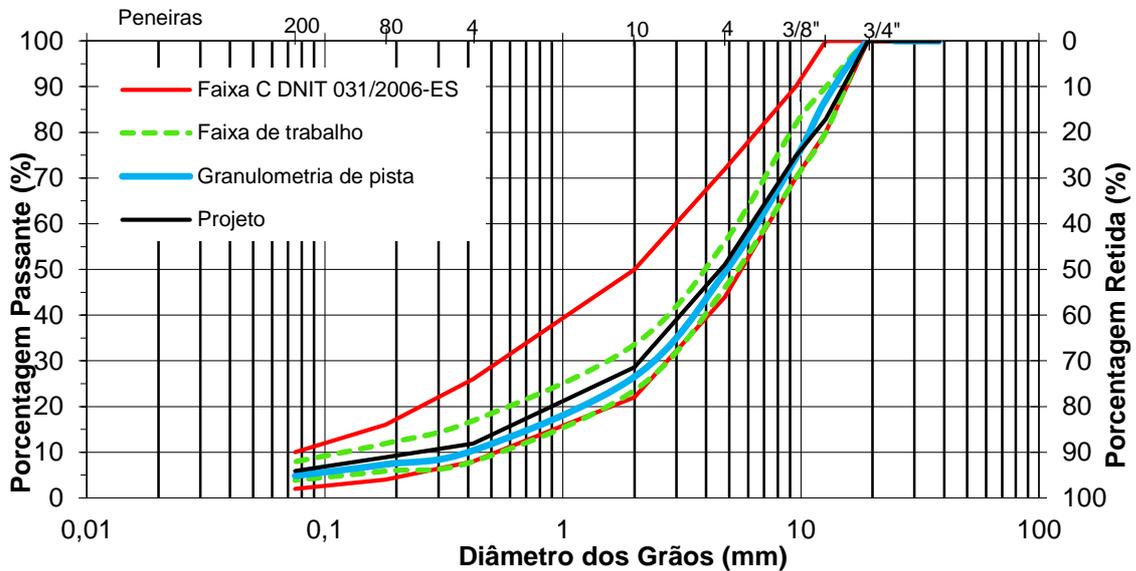
Fonte: Do autor (2018).

Figura 42 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U2-DNIT-FXC-60/85



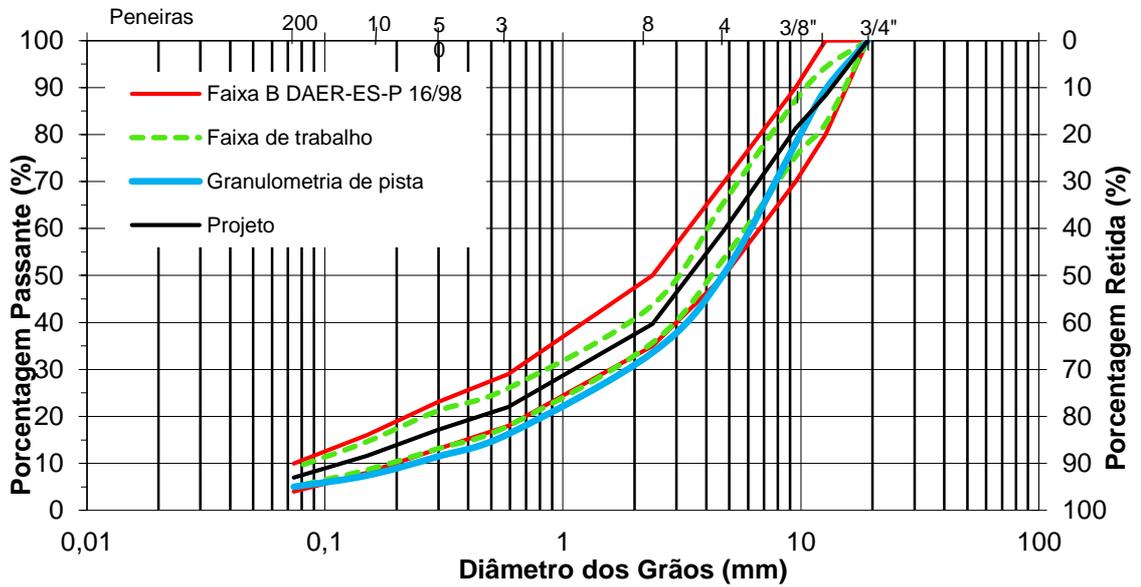
Fonte: Do autor (2018).

Figura 43 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U2-DNIT-FXC-65/90



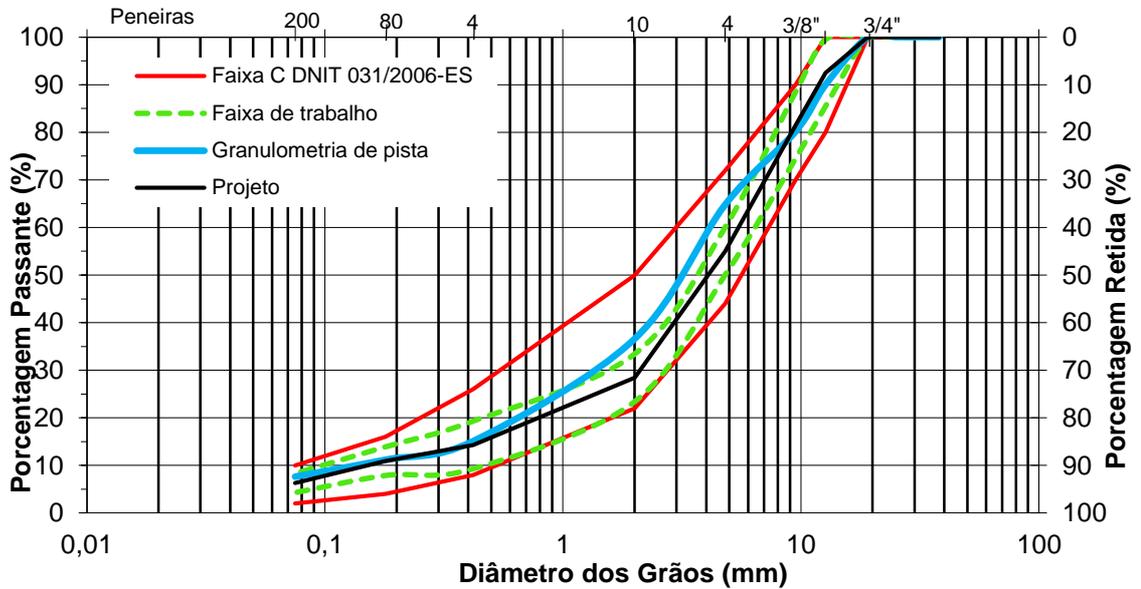
Fonte: Do autor (2018).

Figura 44 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U3-DAER-FXB-ECO



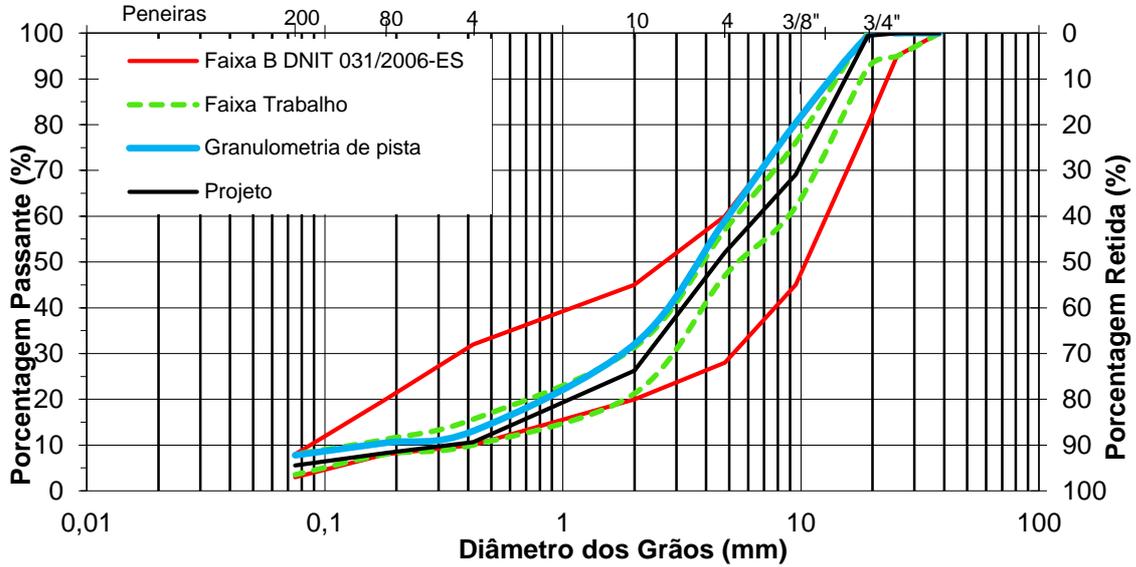
Fonte: Do autor (2018).

Figura 45 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U4-DNIT-FXC-50/70



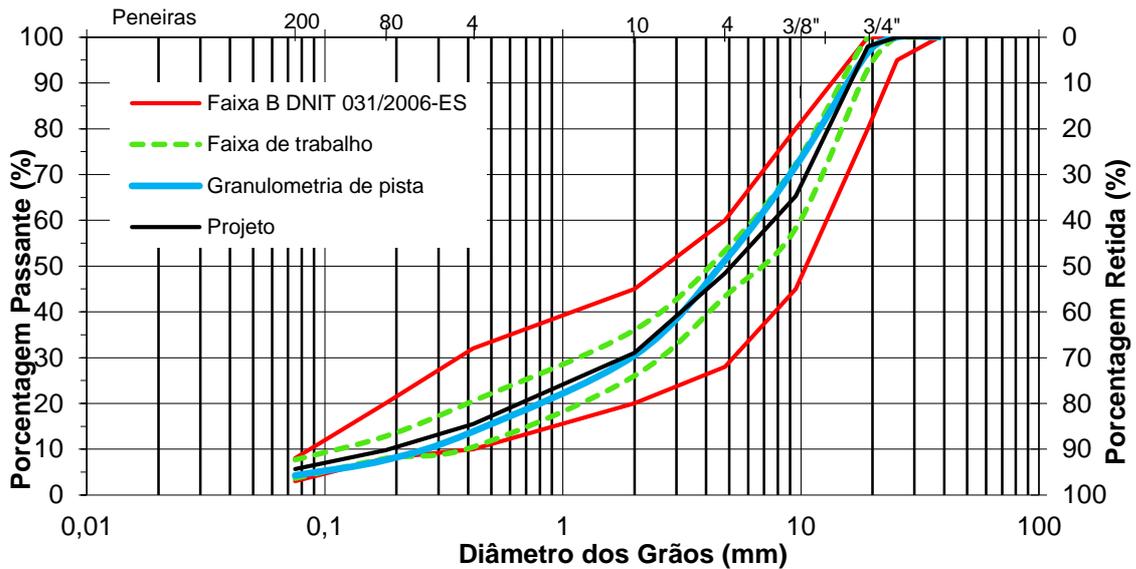
Fonte: Do autor (2018).

Figura 46 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U4-DNIT-FXB-50/70



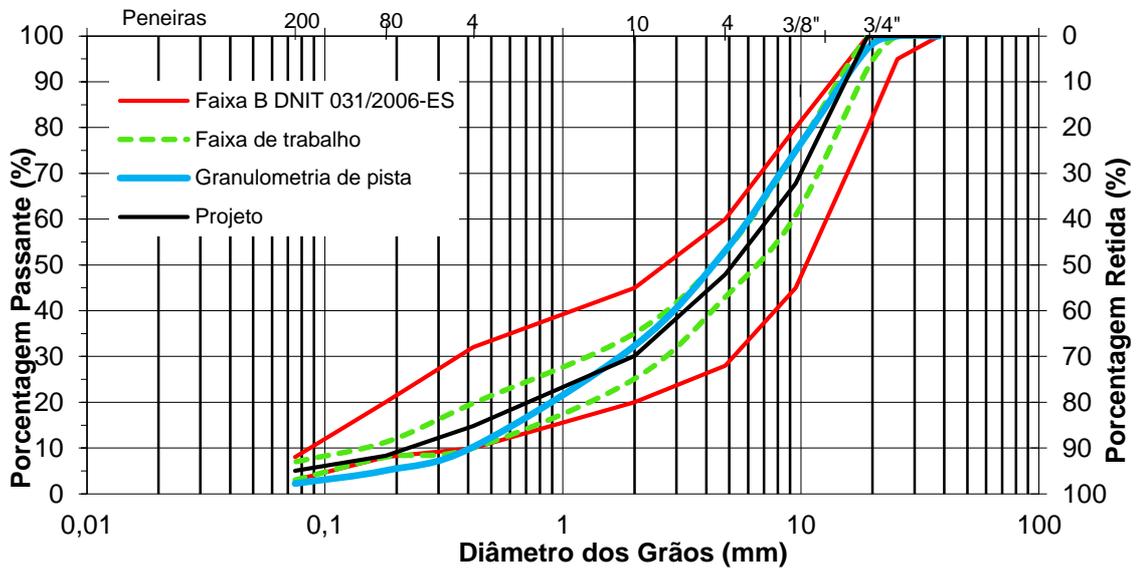
Fonte: Do autor (2018).

Figura 47 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U5-DNIT-FXB-60/85



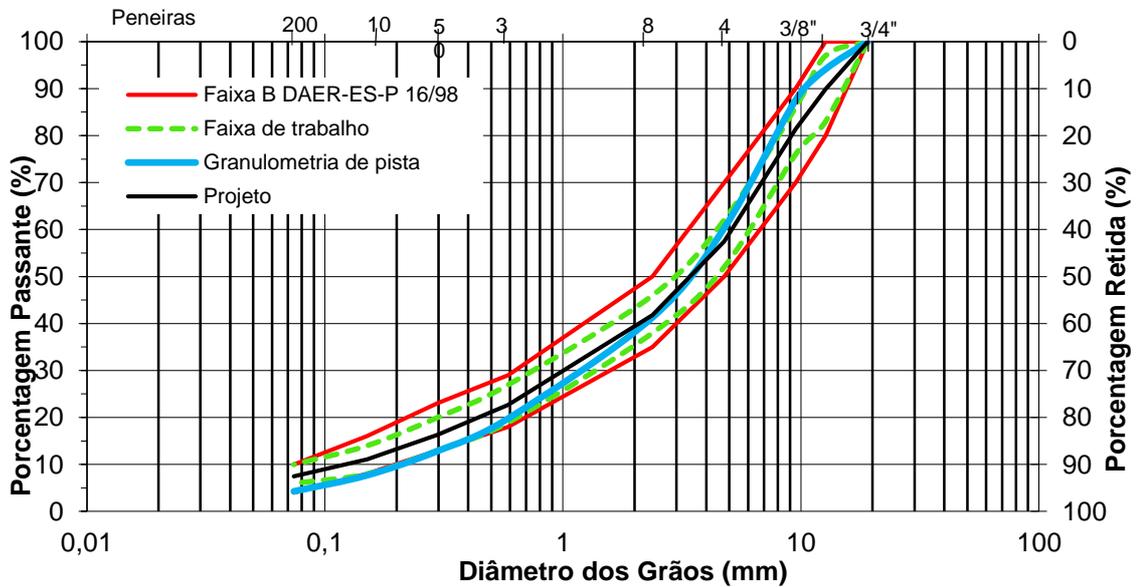
Fonte: Do autor (2018).

Figura 48 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U5-DNIT-FXB-ECO



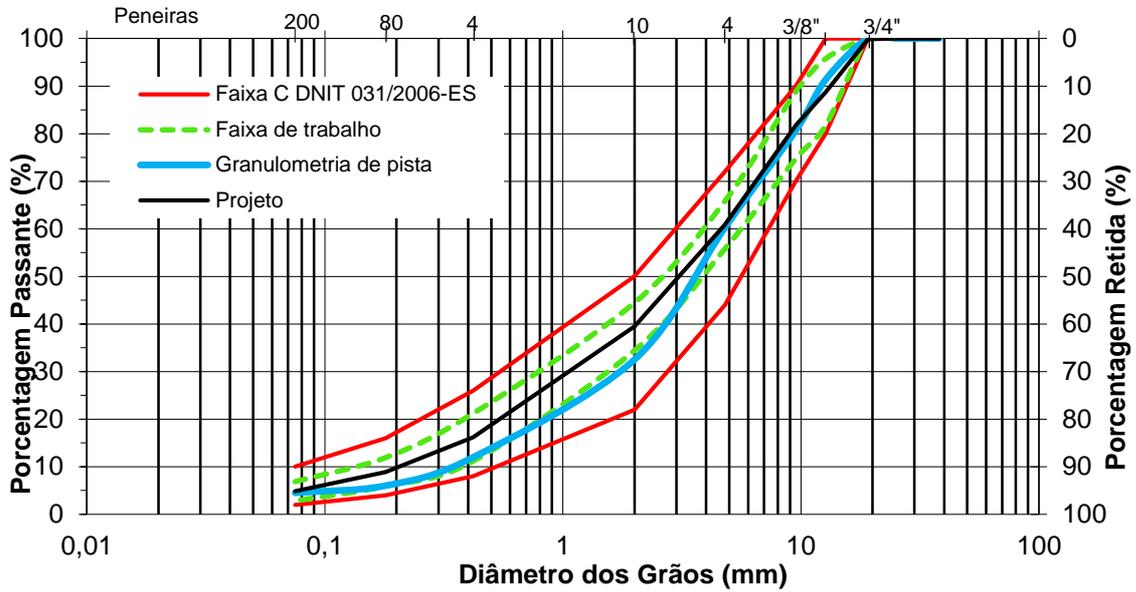
Fonte: Do autor (2018).

Figura 49 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U5-DAER-FXB-ECO



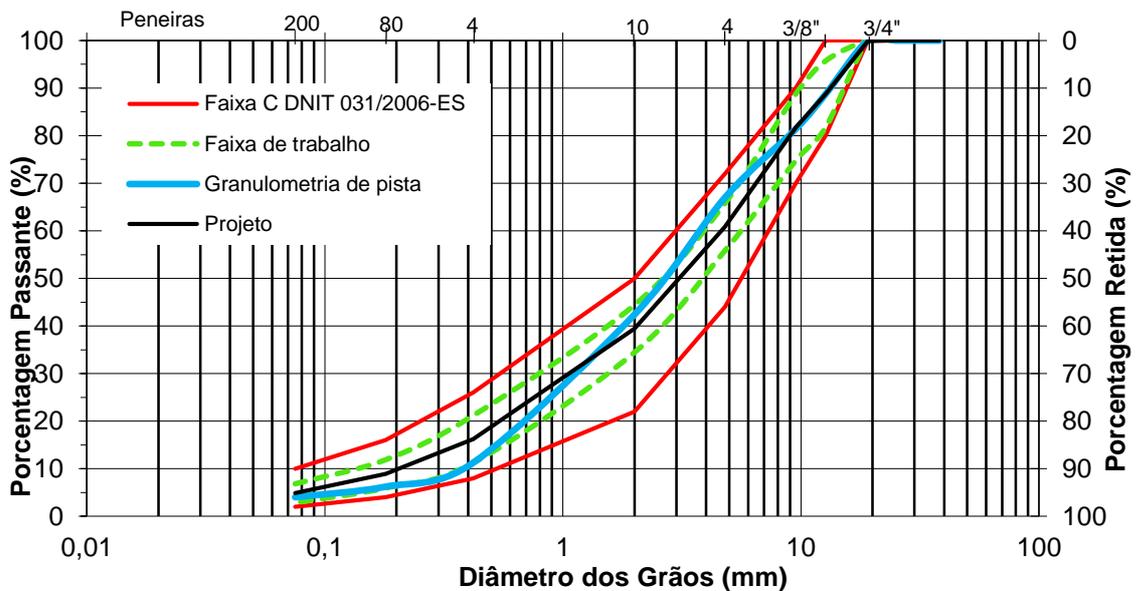
Fonte: Do autor (2018).

Figura 50 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U6-DNIT-FXC-60/85



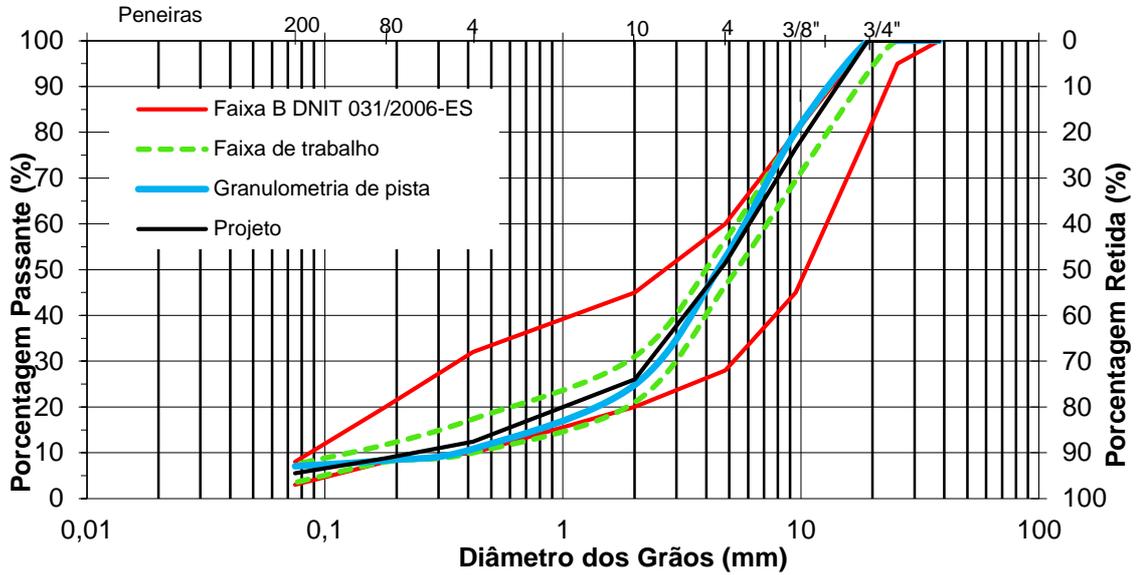
Fonte: Do autor (2018).

Figura 51 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U7-DNIT-FXC-60/85



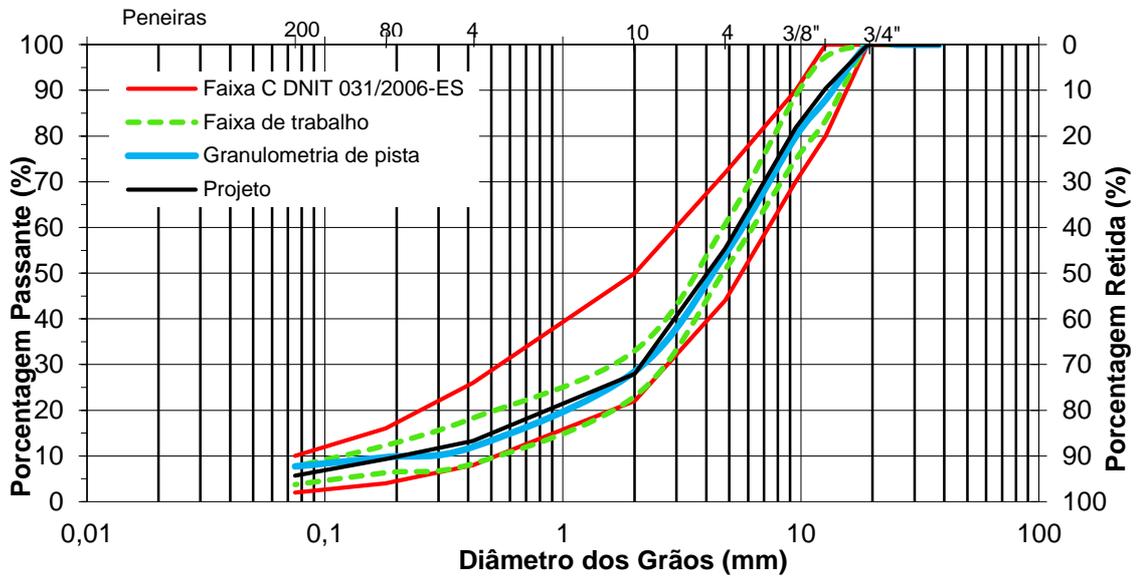
Fonte: Do autor (2018).

Figura 52 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U8-DNIT-FXB-50/70



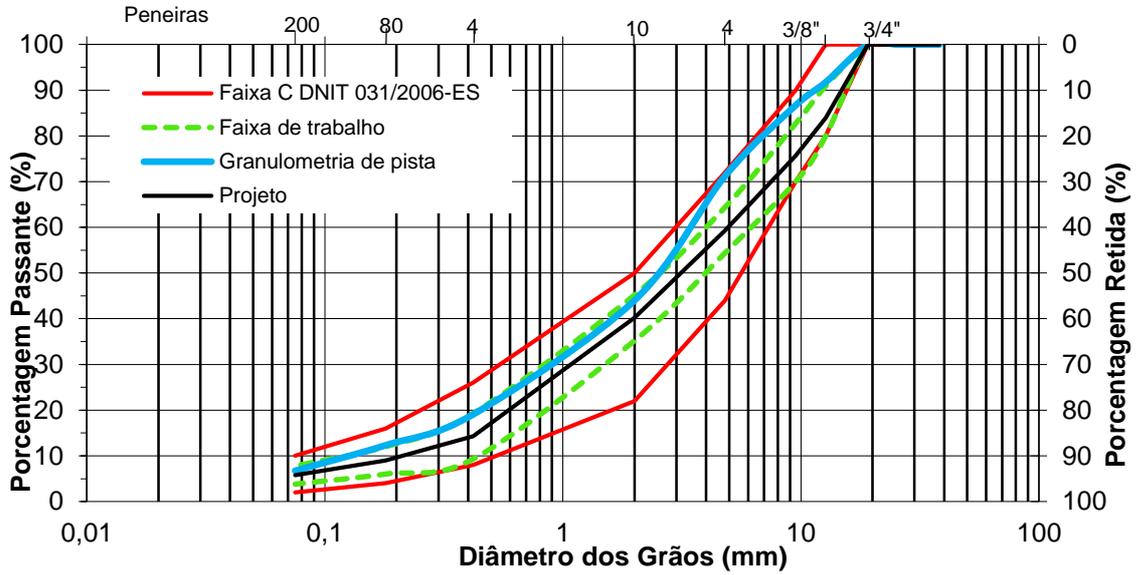
Fonte: Do autor (2018).

Figura 53 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U8-DNIT-FXC-50/70



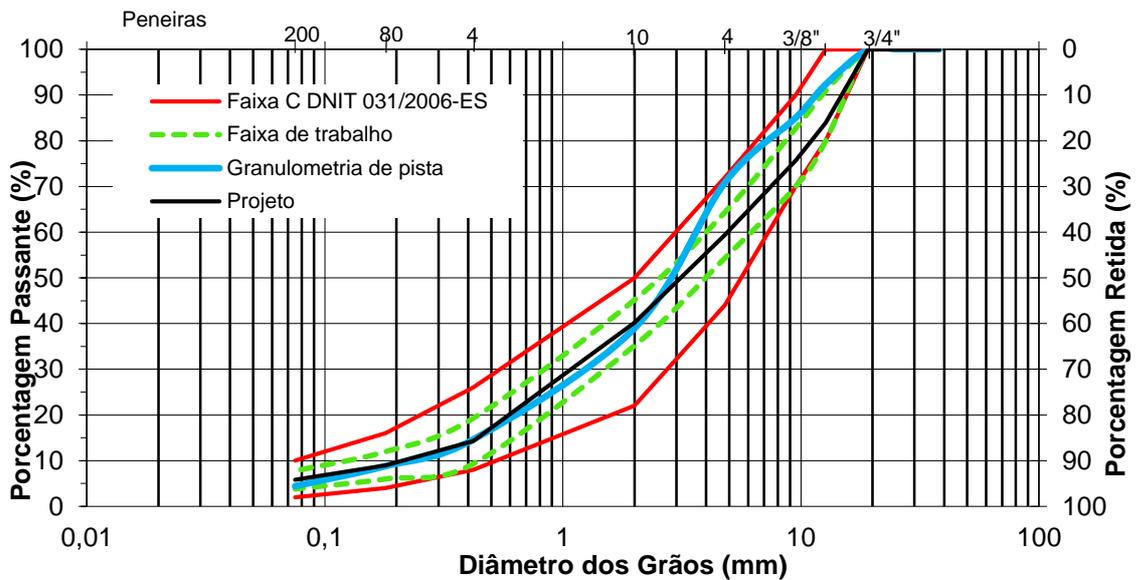
Fonte: Do autor (2018).

Figura 54 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U9-DNIT-FXC-60/85



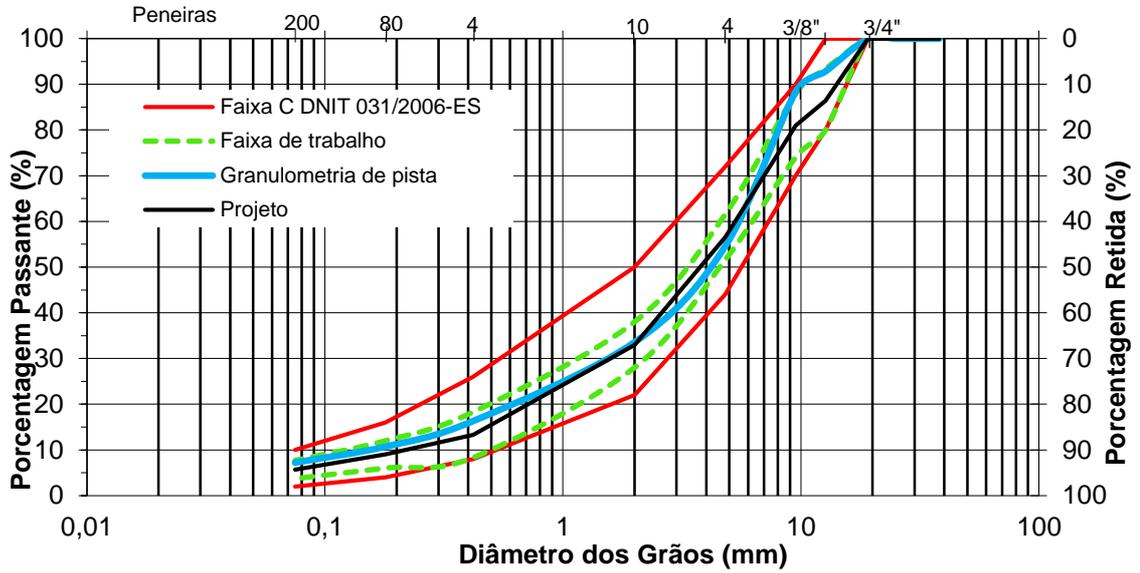
Fonte: Do autor (2018).

Figura 55 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U9-DNIT-FXC-TLAF



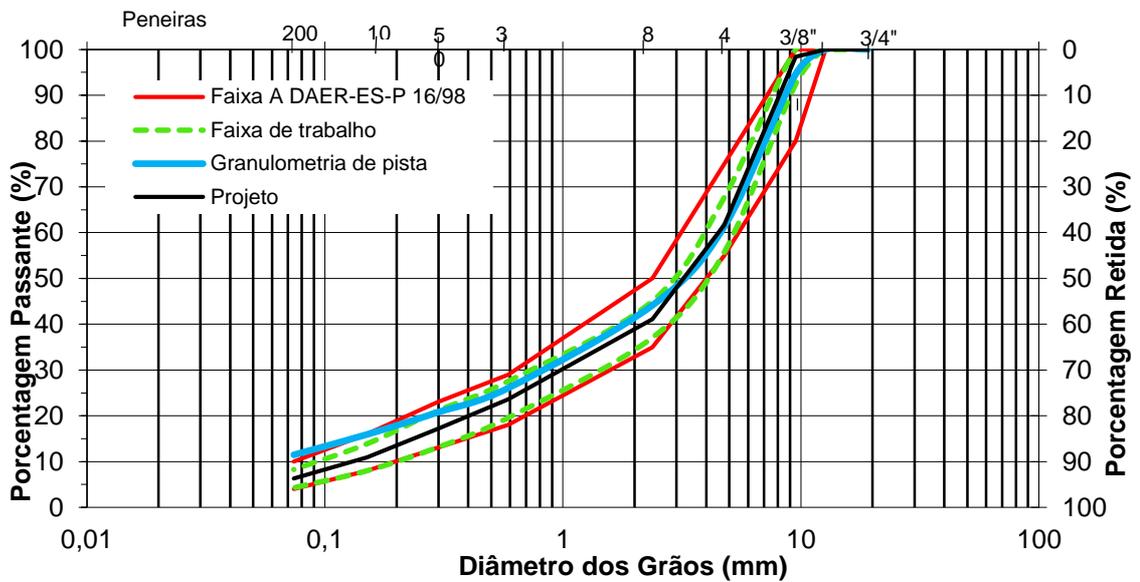
Fonte: Do autor (2018).

Figura 56 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U10-DNIT-FXC-50/70



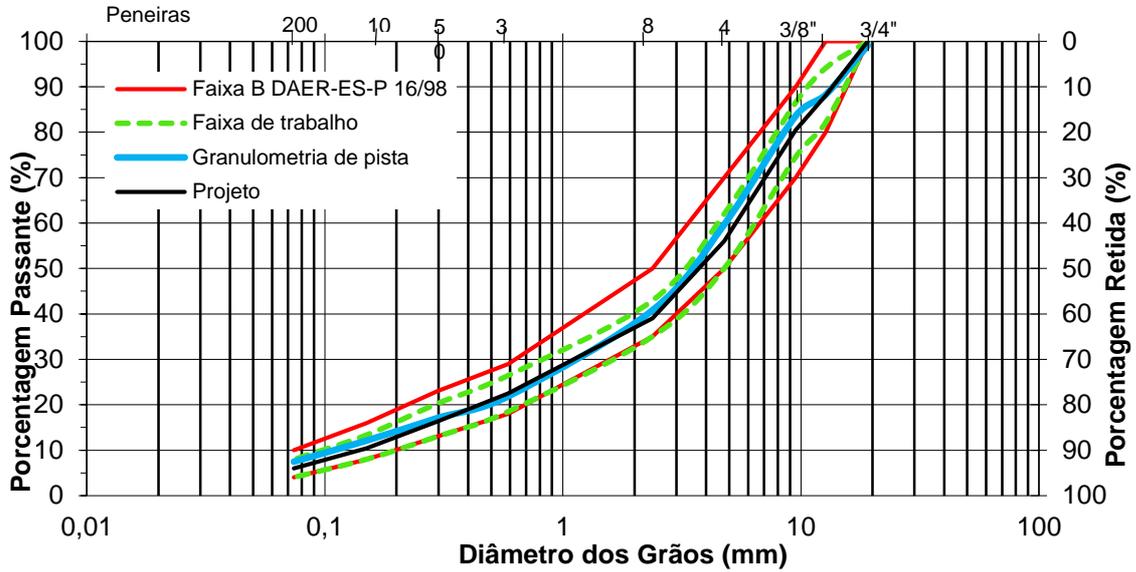
Fonte: Do autor (2018).

Figura 57 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U11-DAER-FXA-50/70



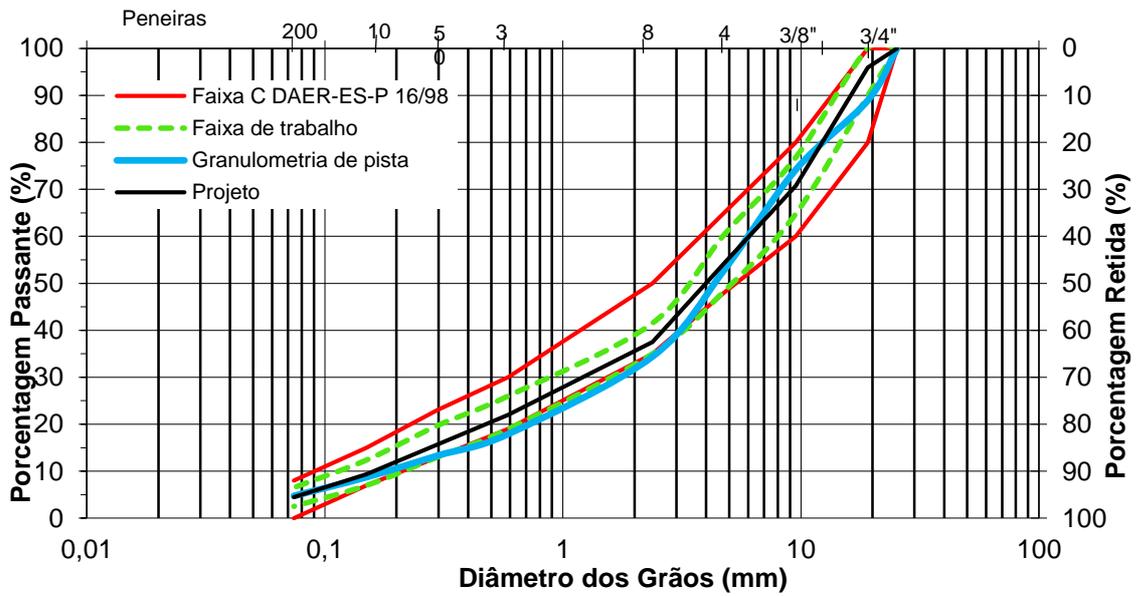
Fonte: Do autor (2018).

Figura 58 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U12-DAER-FXB-60/85



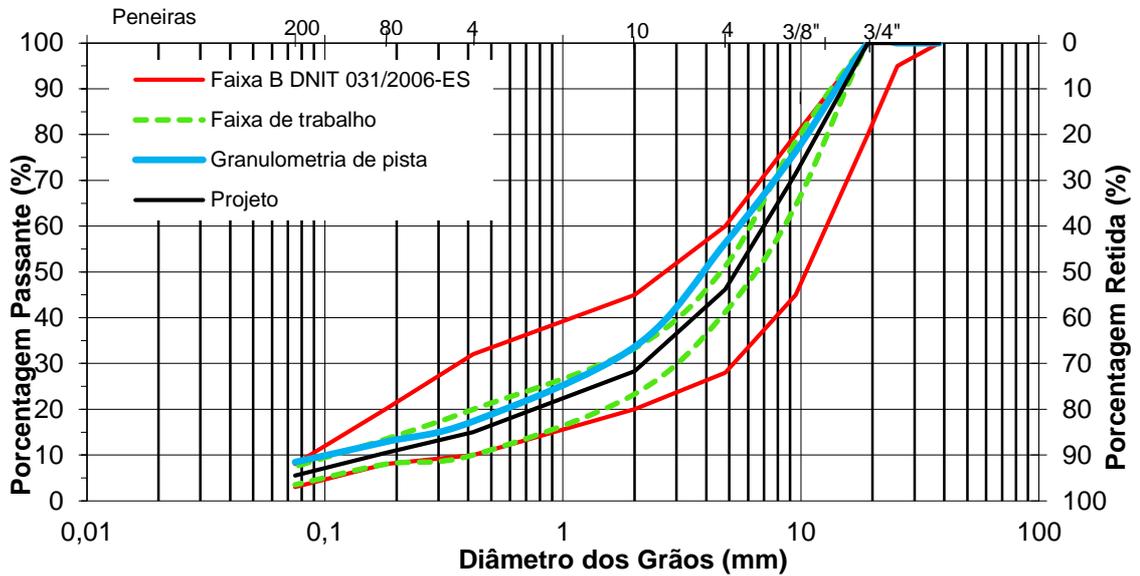
Fonte: Do autor (2018).

Figura 59 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U12-DAER-FXC-60/85



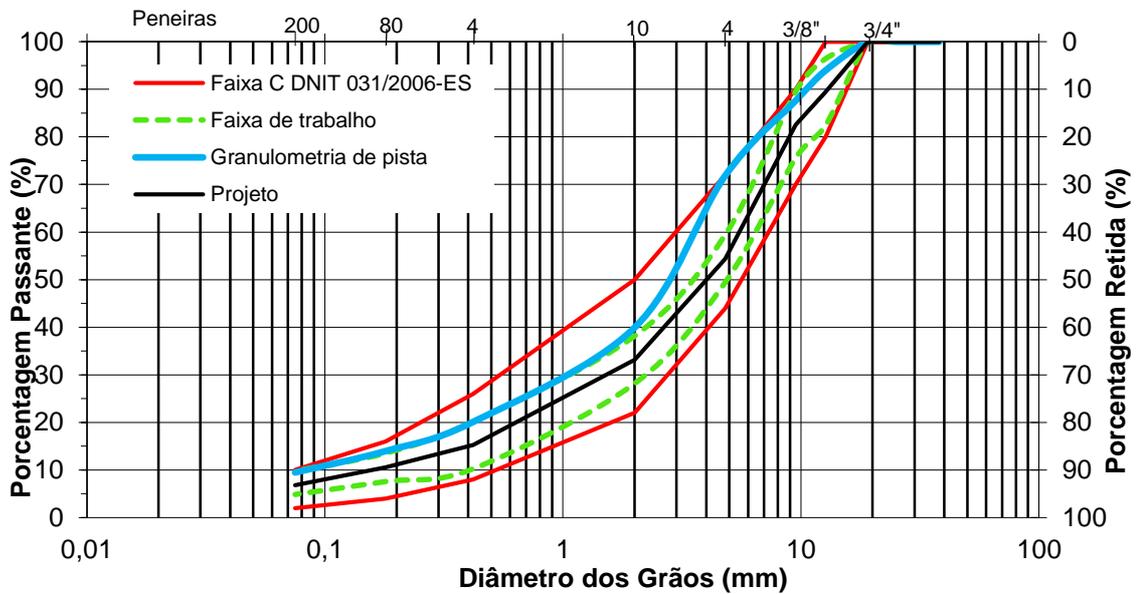
Fonte: Do autor (2018).

Figura 60 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U13-DNIT-FXB-50/70



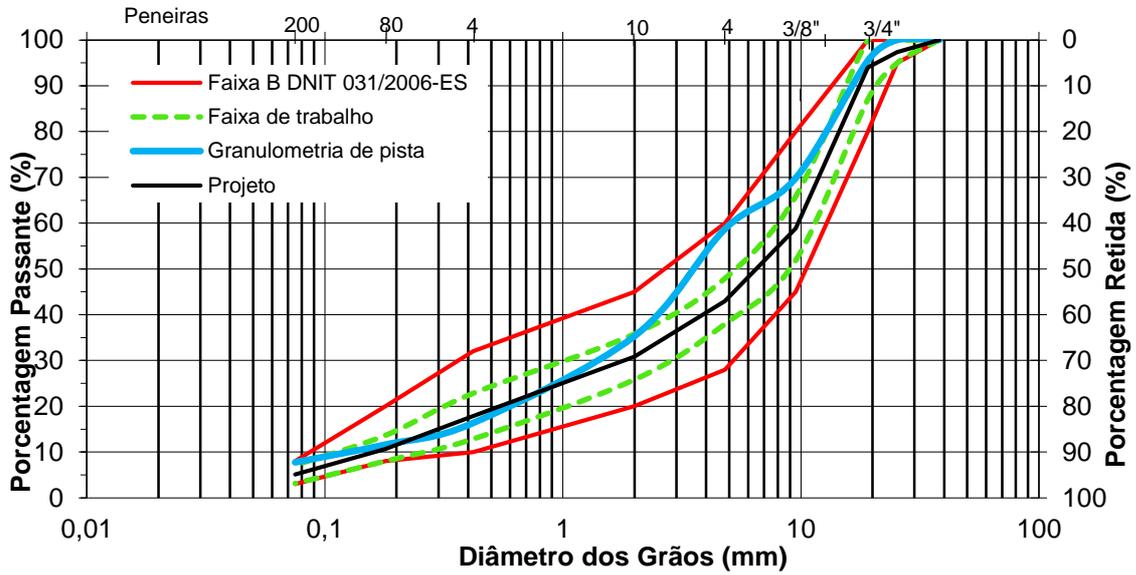
Fonte: Do autor (2018).

Figura 61 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U14-DNIT-FXC-50/70



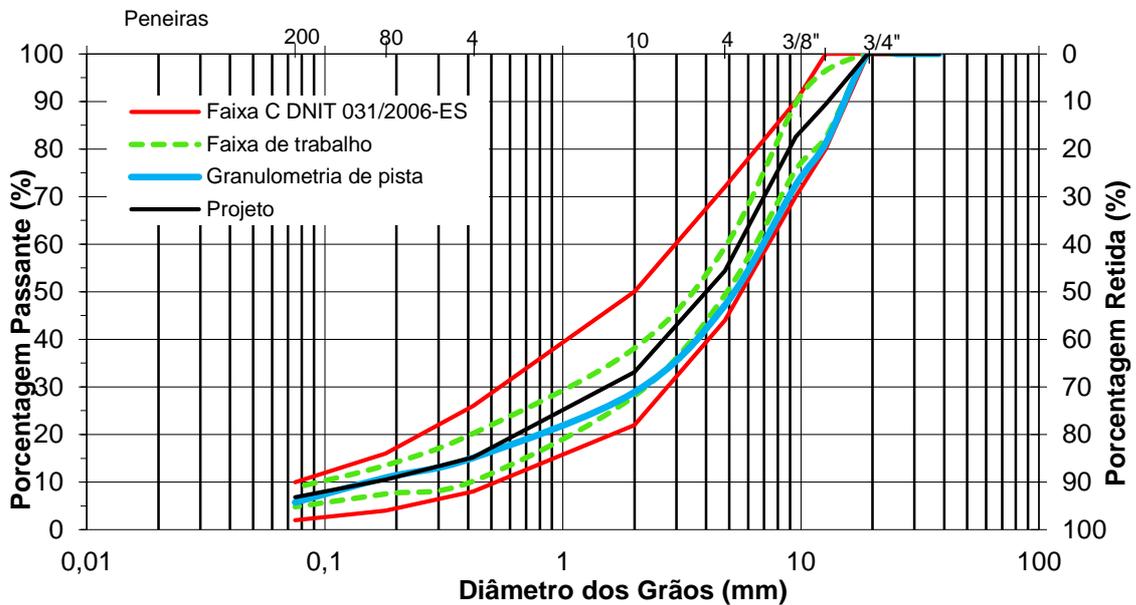
Fonte: Do autor (2018).

Figura 62 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U14-DNIT-FXB-50/70



Fonte: Do autor (2018).

Figura 63 - Granulometria de pista, projeto e faixa de trabalho da mistura U14-DNIT-FXC-60/85



Fonte: Do autor (2018).

Com os resultados de granulometria, foram calculados os parâmetros do método Bailey, assim como a porosidade FAD, os quais são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 - Parâmetros das misturas dentro da especificação Bailey e resultados da porosidade FAD

Misturas TMN 9,5 mm	Proporção de Agregados - Especificação Bailey				FAD (%)
	Limites AG	AG	GAF (0,35 a 0,55)	FAF (0,35 a 0,55)	
U1-DAER-FXA-50/70 <sup>1</sup>	0,4 a 0,55	1,15	0,57	0,51	45,4%
U11-DAER-FXA-50/70 <sup>1</sup>	0,4 a 0,55	0,98	0,59	0,61	45,6%
Misturas TMN 12,5 mm	Limites AG	AG	GAF (0,35 a 0,55)	FAF (0,35 a 0,55)	-
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	0,5 a 0,65	0,89	0,48	0,39	44,1%
U6-DNIT-FXC-60/85 <sup>1</sup>	0,5 a 0,65	0,91	0,40	0,39	35,5%
U9-DNIT-FXC-TLAF <sup>1</sup>	0,5 a 0,65	1,30	0,40	0,44	38,1%
U10-DNIT-FXC-50/70 <sup>1</sup>	0,5 a 0,65	0,82	0,50	0,53	41,5%
U14-DNIT-FXC-50/70 <sup>1</sup>	0,5 a 0,65	1,40	0,51	0,57	46,6%
Misturas TMN 19 mm	Limites AG	AG	GAF (0,35 a 0,55)	FAF (0,35 a 0,55)	-
U2-DAER-FXB-50/70 <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,64	0,52	0,42	39,1%
U2-DNIT-FXC-60/85 <sup>1</sup>	0,6 a 0,75	0,98	0,41	0,56	36,2%
U2-DNIT-FXC-65/90 <sup>1</sup>	0,6 a 0,75	0,97	0,37	0,49	36,5%
U3-DAER-FXB-ECO <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,69	0,52	0,44	45,2%
U4-DNIT-FXC-50/70 <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,60	0,52	0,58	39,9%
U4-DNIT-FXB-50/70 <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,57	0,53	0,66	42,9%
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,62	0,49	0,40	44,6%
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,78	0,37	0,29	43,7%
U7-DNIT-FXC-60/85 <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,90	0,33	0,46	39,0%
U8-DNIT-FXB-50/70 <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,45	0,55	0,73	37,8%
U8-DNIT-FXC-50/70 <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,53	0,54	0,71	40,4%
U9-DNIT-FXC-60/85 <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,69	0,51	0,43	48,5%
U12-DAER-FXB-60/85 <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,67	0,61	0,44	48,1%
U13-DNIT-FXB-50/70 <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,58	0,60	0,56	48,4%
U14-DNIT-FXB-50/70 <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,63	0,55	0,55	39,8%
U14-DNIT-FXC-60/85 <sup>1</sup>	0,6 a 0,75	0,91	0,46	0,60	44,9%
Misturas TMN 25 mm	Limites AG	AG	GAF (0,35 a 0,55)	FAF (0,35 a 0,55)	-
U12-DAER-FXC-60/85 <sup>2</sup>	0,6 a 1,0	0,60	0,57	0,36	37,4%

Nota: <sup>1</sup> Misturas com comportamento graúdo; <sup>2</sup> Misturas com comportamento miúdo.  
Fonte: Do autor (2018).

Conforme os dados apresentados na Tabela 26, percebe-se que a maioria das misturas não atendem o parâmetro AG para os limites propostos na especificação (grifados em vermelho). Apenas 10 das 24 misturas estudadas atendem ao parâmetro, que é considerado um indicador para a deformação permanente. Tal fato pode ser explicado devido a não utilização do método pela maioria dos projetistas. Além disso, já que os cálculos foram efetuados com base nas granuloletrias das extrações, possíveis desvios de granulometria podem alterar esses parâmetros.

Para a porosidade FAD, com exceção de três misturas (grifadas em vermelho na Tabela 26), que são consideradas marginais, todas as demais misturas apresentaram porosidade abaixo de 48%, indicando que devem resistir eficazmente à deformação permanente, de acordo com Kim (2006).

## 4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Neste item, serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização mecânica das misturas asfálticas, ensaios estes que seguiram a metodologia apresentada anteriormente.

### 4.2.1 Propriedades de rigidez das misturas

Serão abordados os resultados de avaliação da rigidez das misturas estudadas, obtidos por meio dos ensaios de módulo de resiliência e módulo dinâmico.

#### 4.2.1.1 *Módulo de resiliência*

Os resultados de módulo de resiliência são apresentados na Tabela 27 e ilustrados na Figura 64, sendo formados pela média de três amostras ensaiadas, além do desvio padrão e o coeficiente de variação (CV).

Tabela 27 - Valores de módulo de resiliência a 25°

Mistura	Média VV (%)	MR @25°C (MPa)	DP @25°C	CV @25°C
U1-DAER-FXA-50/70	3,28	6675	318	4,77
U2-DAER-FXB-50/70	3,70	8210	401	4,88
U2-DNIT-FXC-60/85	3,56	9222	566	6,13
U2-DNIT-FXC-65/90	3,29	7262	317	4,37
U3-DAER-FXB-ECO	3,62	4966	249	5,01
U4-DNIT-FXC-50/70	3,20	7377	320	4,34
U4-DNIT-FXB-50/70	3,16	9826	650	6,62
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>	3,78	8054	297	3,69
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	4,07	5431	300	5,52
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	4,07	4738	206	4,35
U6-DNIT-FXC-60/85	4,13	8576	538	6,28
U7-DNIT-FXC-60/85	3,78	10377	756	7,29
U8-DNIT-FXB-50/70	4,14	10399	478	4,60
U8-DNIT-FXC-50/70	4,45	9707	536	5,52
U9-DNIT-FXC-60/85	3,88	7406	423	5,71
U9-DNIT-FXC-TLAF	4,54	9590	387	4,04
U10-DNIT-FXC-50/70	3,09	8297	489	5,90
U11-DAER-FXA-50/70	4,40	8277	386	4,67
U12-DAER-FXB-60/85	3,63	8390	453	5,40
U12-DAER-FXC-60/85	4,14	7890	323	4,09
U13-DNIT-FXB-50/70	3,66	7410	364	4,91
U14-DNIT-FXC-50/70	4,34	8576	516	6,02
U14-DNIT-FXB-50/70	4,34	10076	560	5,55
U14-DNIT-FXC-60/85	4,48	11520	633	5,49

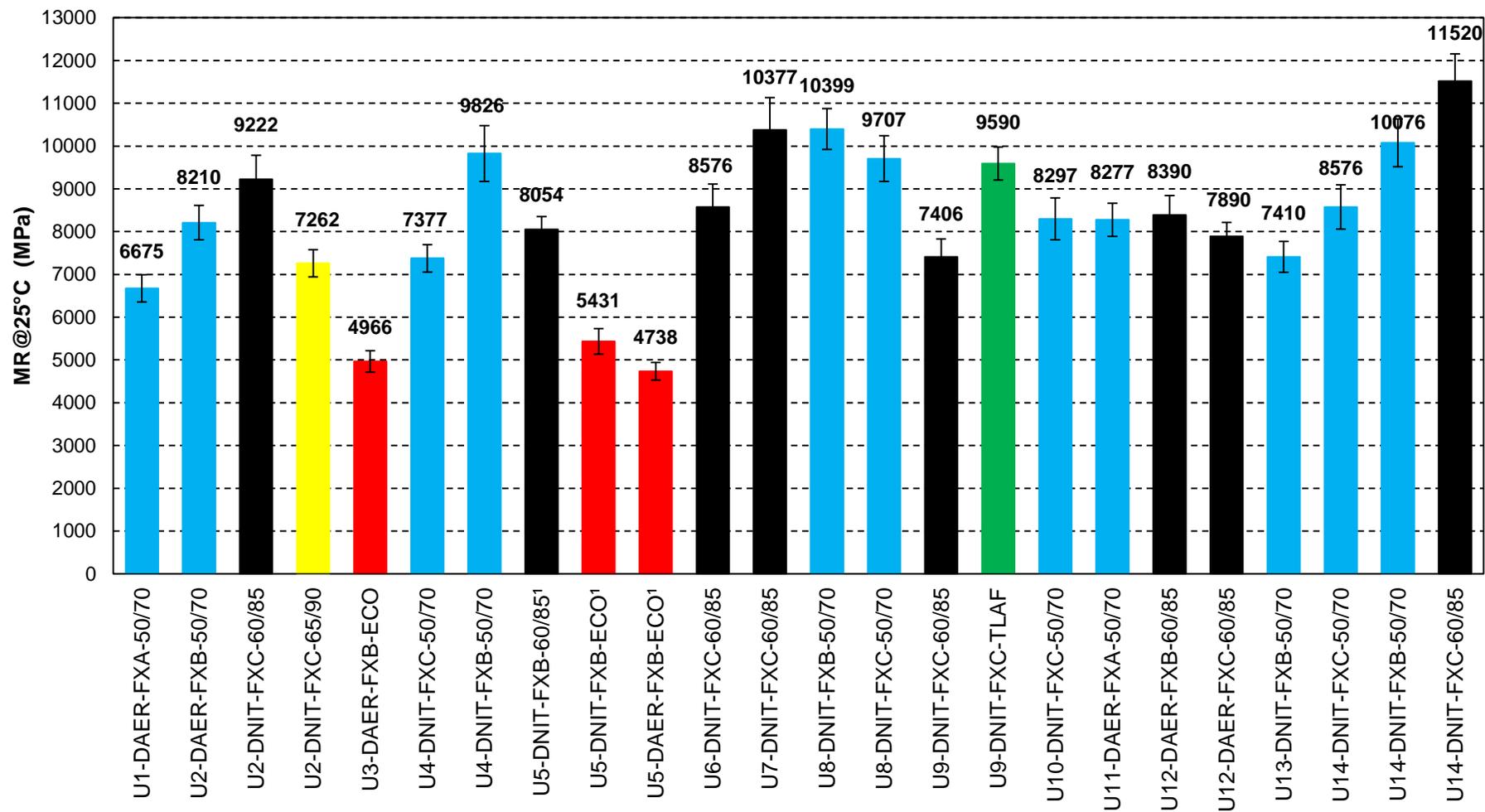
Nota: <sup>1</sup> Misturas Mornas

Fonte: Do autor (2018).

Os coeficientes de variação, conforme apresentados na Tabela 27, são menores que 10%, mostrando que os resultados apresentam pequena variação para 3 corpos de prova ensaiados a 0 e 90°.

Para os concretos asfálticos analisados, percebem-se diferenças significativas de módulos de resiliência, mostrando que os valores típicos no Rio Grande do Sul variam entre 4738 a 11520 MPa, com média de 8260 MPa, acima dos valores apresentados por Bernucci et al. (2010), onde os autores mostram que valores típicos de MR a 25°C para misturas asfálticas estão entre 2000 MPa e 8000 MPa.

Figura 64 - Resultados de módulo de resiliência a 25°C para todas as misturas



Nota: <sup>1</sup> Misturas Mornas  
 Fonte: Do autor (2018).

As misturas que apresentaram os menores valores de MR são as com ligante do tipo asfalto borracha, assim como foi encontrado na pesquisa de Mensch (2017) ao avaliar misturas com diferentes ligantes asfálticos (CAP 50/70, AMP-60/85, CAP TLA e AB-08) . Para as demais, analisando todas conjuntamente, considerando diferentes agregados e ligantes, não é possível definir uma tendência em função do tipo de ligante ou características dos agregados, tanto com resultados de módulo elevado para misturas com ligante do tipo 50/70, como para as demais com ligantes modificados.

No entanto, considerando os resultados para as misturas produzidas na mesma usina de asfalto, com agregados da mesma britagem e mesmo tipo de ligante, percebe-se um pequeno aumento da rigidez à medida que se utilizam faixas granulométricas com maior percentual de agregados graúdos. Também, para misturas da mesma usina e tipo de agregado, as misturas com ligante tipo AMP-60/85 apresentam maiores valores de MR quando comparadas às misturas com CAP 50/70.

Os valores de MR para misturas com CAP 50/70 encontrados nesta pesquisa são similares aos encontrados em pesquisas recentes realizadas na região, como exemplo, Paniz (2018), que encontrou valores entorno de 8000 MPa para diferentes ligantes convencionais utilizados no Brasil. Para ligante do tipo TLA FLEX, Bruxel (2015) encontrou o valor de 8928 MPa e para o ligante AB-08, Mensch (2017) encontrou MR de 3822 MPa. Já para misturas com ligante AMP-60/85, Almeida Júnior encontrou média acima de 8000 MPa.

Mesmo não sendo normatizada pelos órgãos rodoviários que administram as rodovias no estado do RS, percebe-se uma crescente utilização de análise mecanicista no dimensionamento dos pavimentos no estado. No entanto, muitas vezes, essas análises são efetuadas sem a realização de ensaios ou embasadas em um banco de dados que não representa de maneira adequada as misturas em utilização, ocasionando a utilização de valores incoerentes de MR no dimensionamento e consequentes problemas estruturais ou custos desnecessários.

Diante disso, tais dados são úteis como banco de dados de valores de MR para projetos mecanísticos de pavimentos no estado, além de demonstrar, devido a essa elevada variação de valores de MR, a necessidade de se conhecer as propriedades mecânicas dos materiais para dimensionamento, principalmente com a iminente introdução do novo método de dimensionamento pelo DNIT.

#### 4.2.1.2 Módulo complexo

Os valores de módulo dinâmico e ângulo de fase para as duas amostras por mistura ensaiadas são apresentados no Apêndice A. Para algumas misturas, em determinadas temperaturas e frequências, foi utilizado apenas o resultado do ensaio de um corpo de prova devido à queda sucessiva dos pinos de fixação dos LVDT's, que impossibilitou as leituras.

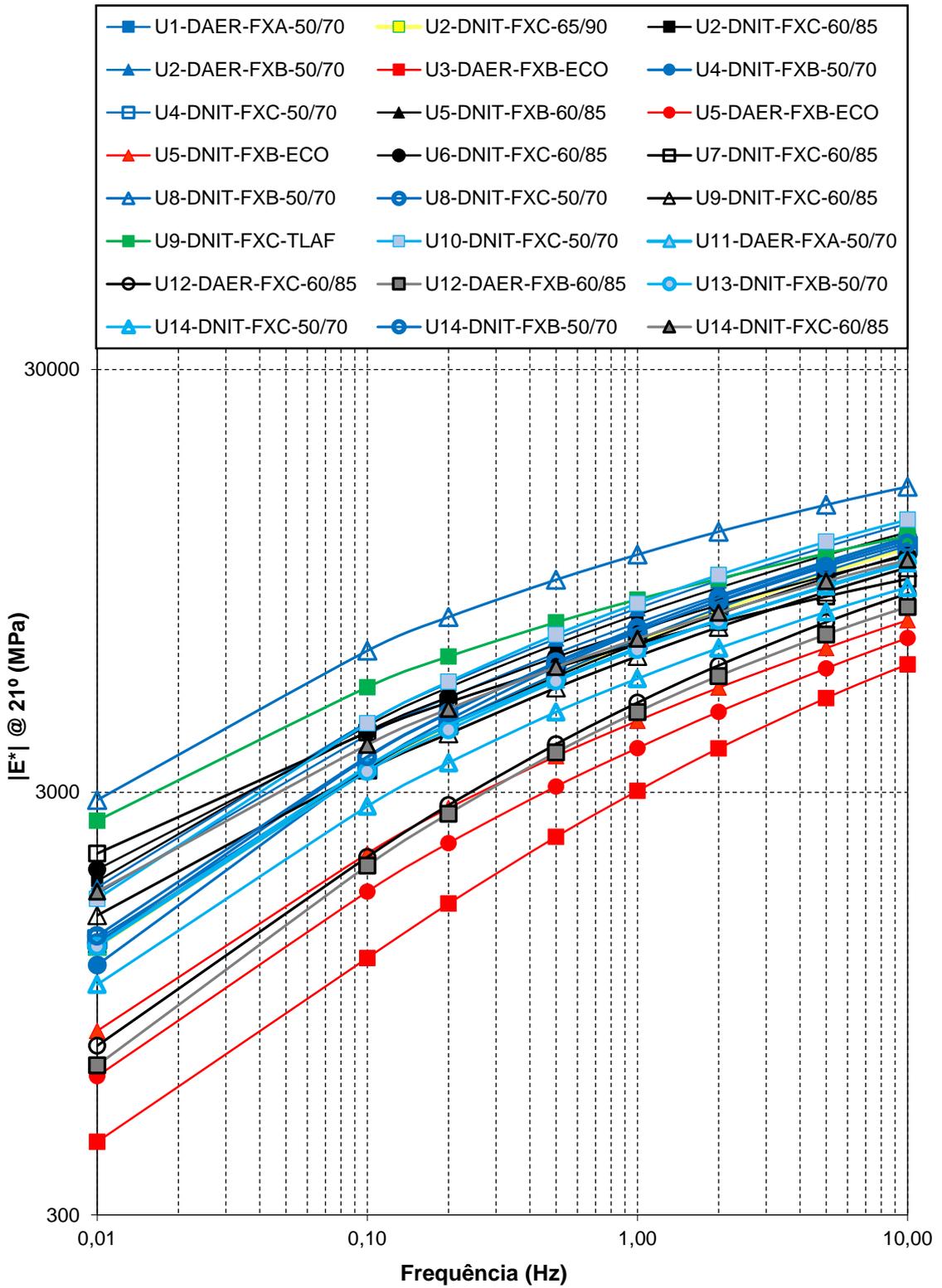
Os resultados experimentais demonstram que, para algumas misturas estudadas, os resultados de  $|E^*|$  e  $\phi$  apresentam elevado coeficiente de variação nas temperaturas de 37 e 54°C, principalmente nas baixas frequências. Provavelmente, isto ocorre devido aos limites experimentais dos dispositivos de teste. Conforme Cardona et al. (2015), para uma baixa frequência, a prensa não é capaz de impor um carregamento senoidal correto. Tais limitações, possivelmente, podem ser minimizadas com a redução do número de ciclos de aplicação de carga.

A apresentação dos resultados obtidos no ensaio de Módulo Complexo seguirá a orientação de Di Benedetto e Corté (2005). Primeiramente, apresentar-se-á as isotermas, seguidas das isócronas, espaços Cole Cole, diagramas de Black, curvas mestras de  $|E^*|$  e  $\phi$ . Por fim, de forma complementar, as inferências à deformação permanente. Será apresentado apenas uma Isoterma e uma Isócrona de módulo dinâmico e ângulo de fase, a fim de ilustrar todos os aspectos de análise da metodologia 2S2P1D.

As Figuras 65 e 66 apresentam os resultados da Isoterma de módulo dinâmico e isoterma de ângulo de fase, respectivamente. Na Figura 65 é apresentada a Isoterma de  $|E^*|$  a 21°C, escolhida por ser a média das temperaturas estudadas e temperatura de referência de calibração do modelo 2S2P1D. Já a Isoterma de  $\phi$  a 37°C, Figura 66, foi escolhida por demonstrar o valor de mudança de comportamento do valor de ângulo de fase.

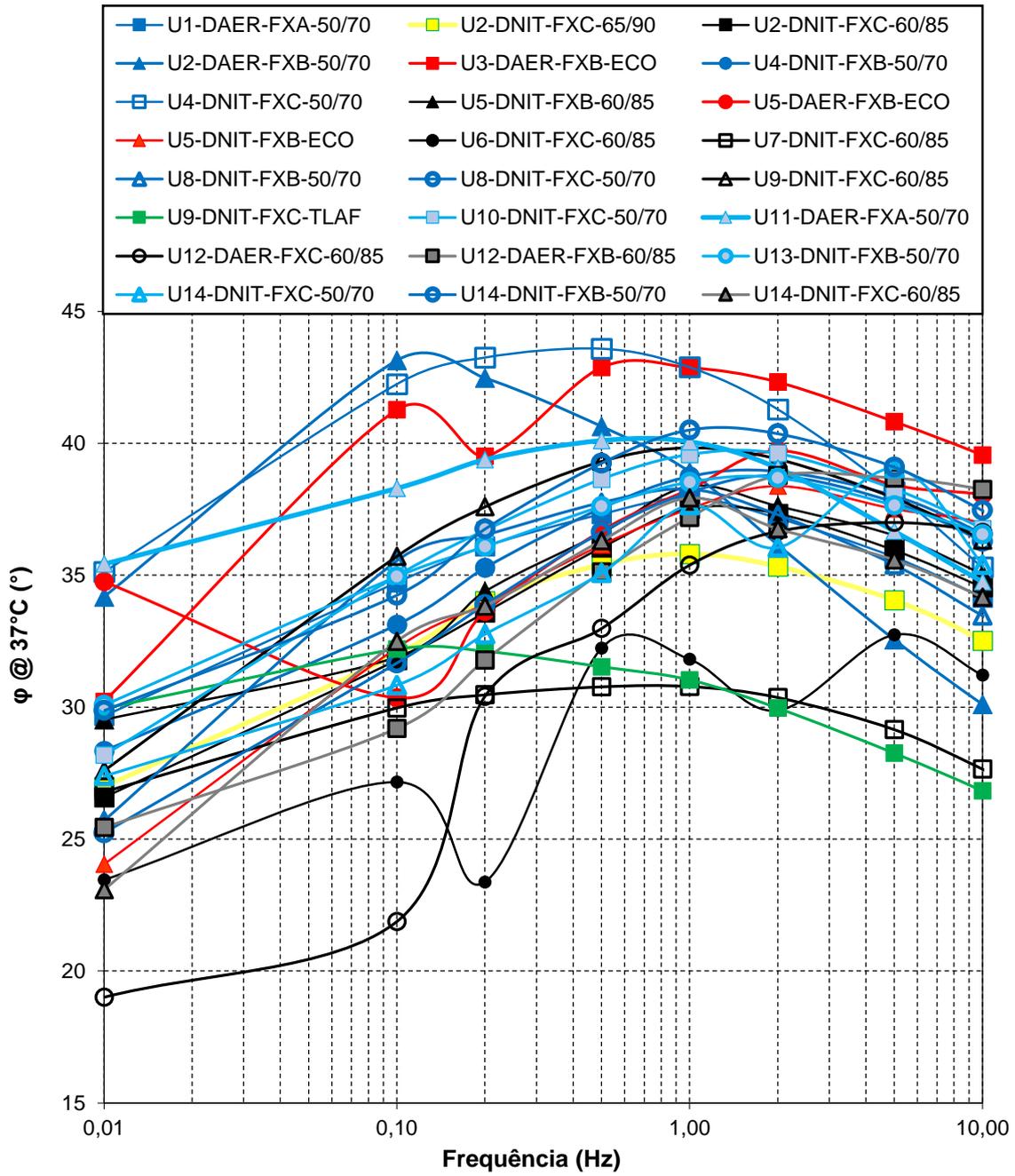
As Figuras 67 e 68 apresentam as isócronas de módulo dinâmico e de ângulo de fase, respectivamente, para a frequência média de 10Hz, escolhida em função de ser a mesma frequência do ensaio de MR utilizado no país.

Figura 65 - Isoterma de  $|E^*|$  a 21°C

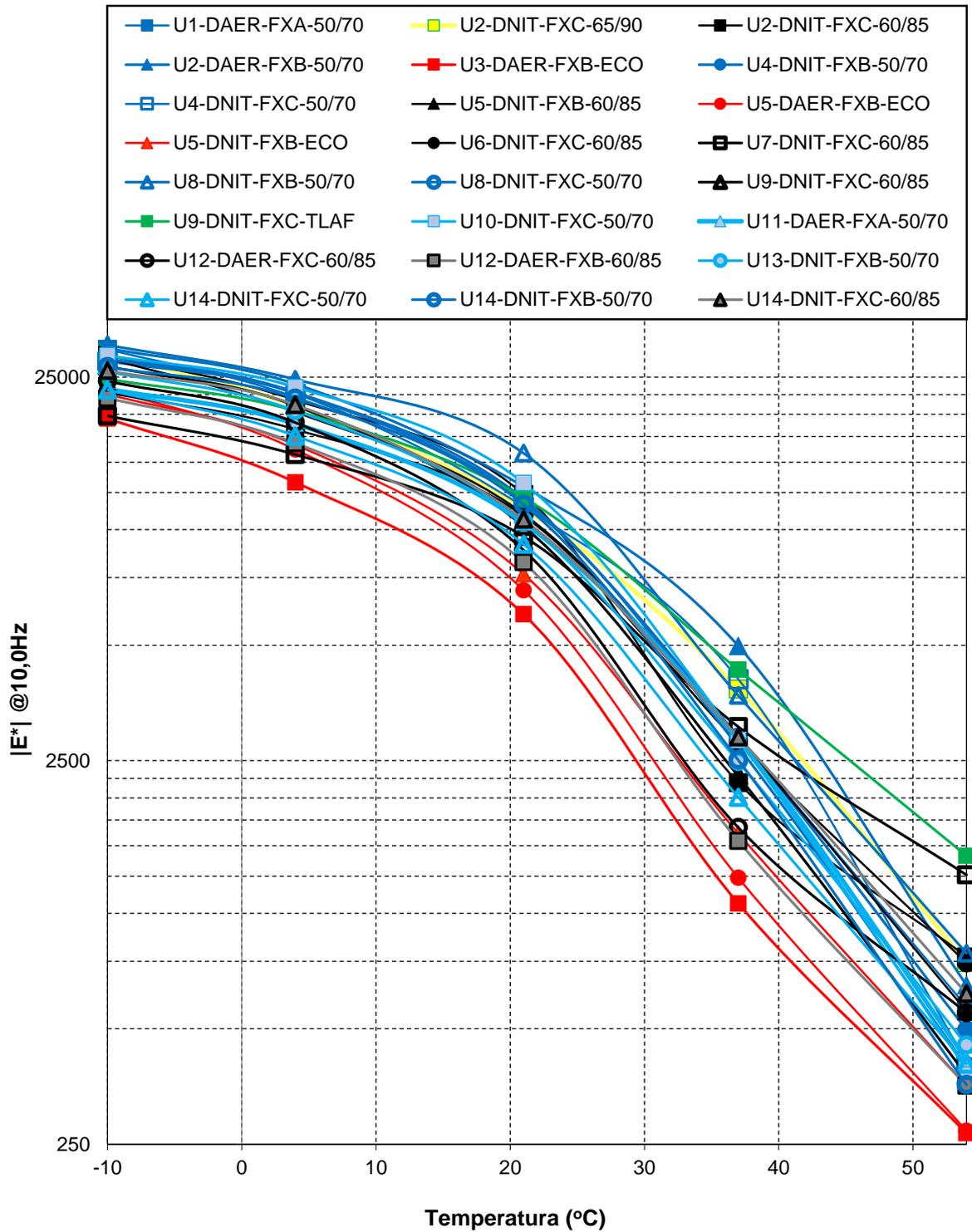


Fonte: Do autor (2018).

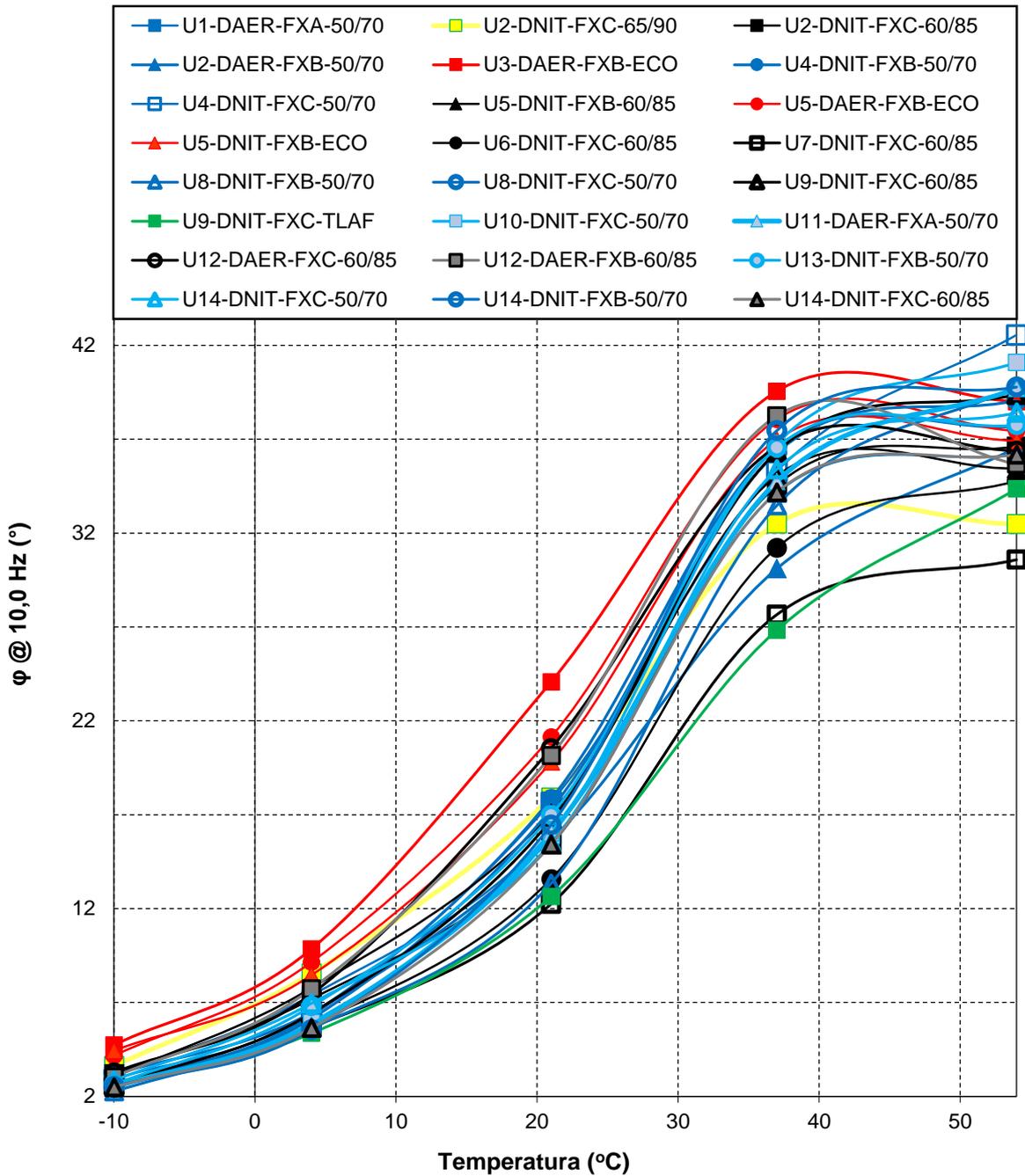
Figura 66 - Isoterma de  $\phi$  a 37°C



Fonte: Do autor (2018).

Figura 67 - Isócrona de  $|E^*|$  a 10,0Hz

Fonte: Do autor (2018).

Figura 68 - Isócrona de  $\phi$  a 10,0Hz

Fonte: Do autor (2018).

As médias dos dados experimentais obtidos foram processadas no modelo reológico 2S2P1D, a fim de se obter o espaço Cole Cole, diagrama de Black e as curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase das misturas. Os sete parâmetros utilizados para calibração do modelo e as constantes C1 e C2, do WLF

(William, Landel e Ferry), para cada uma das 24 misturas pesquisadas, são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Parâmetros do modelo 2S2P1D e valores de C1 e C2 de cada mistura

Mistura	E*						WLF		
	E00	E0	K	h	$\delta$	$\tau E$ (s)	$\beta$	C1	C2
U1-DAER-FXA-50/70	150	34700	0,221	0,550	2,600	0,080	5000	25,68	195,76
U2-DAER-FXB-50/70	100	33800	0,210	0,560	2,700	0,150	2000	25,81	193,14
U2-DNIT-FXC-60/85	75	34600	0,210	0,550	2,600	0,130	10000	26,11	194,52
U2-DNIT-FXC-65/90	95	35200	0,215	0,610	2,700	0,220	10000	29,94	216,65
U3-DAER-FXB-ECO	30	24500	0,228	0,580	2,900	0,020	10000	19,06	152,11
U4-DNIT-FXC-50/70	50	32200	0,220	0,605	2,400	0,095	20000	20,20	152,23
U4-DNIT-FXB-50/70	79	32470	0,220	0,550	2,550	0,080	5000	19,53	152,07
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>	89	30200	0,177	0,524	1,950	0,100	750	18,74	115,83
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	35	27900	0,238	0,565	3,60	0,045	20000	24,34	184,19
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	50	28100	0,220	0,550	3,00	0,050	5000	21,33	153,73
U6-DNIT-FXC-60/85	85	22800	0,192	0,468	2,55	0,600	10000	15,29	119,70
U7-DNIT-FXC-60/85	85	26000	0,210	0,520	2,50	0,370	6000	20,17	155,43
U8-DNIT-FXB-50/70	60	31200	0,250	0,580	2,400	0,210	20000	23,66	171,56
U8-DNIT-FXC-50/70	55	30000	0,225	0,570	2,800	0,130	1500	25,93	174,45
U9-DNIT-FXC-60/85	100	34200	0,210	0,570	2,100	0,350	1500	36,13	259,41
U9-DNIT-FXC-TLAF	60	31750	0,225	0,545	2,050	0,080	20000	21,05	151,84
U10-DNIT-FXC-50/70	115	27750	0,245	0,575	2,475	0,055	6000	19,47	151,71
U11-DAER-FXA-50/70	80	29000	0,225	0,575	2,450	0,130	6000	24,67	172,38
U12-DAER-FXB-60/85	90	31500	0,240	0,575	2,450	0,130	6000	21,61	152,07
U12-DAER-FXC-60/85	80	28550	0,198	0,500	2,450	0,500	6000	27,84	203,37
U13-DNIT-FXB-50/70	55	27980	0,175	0,535	1,900	0,080	550	28,31	200,53
U14-DNIT-FXC-50/70	70	26800	0,195	0,540	1,850	0,030	3500	25,60	184,30
U14-DNIT-FXB-50/70	45	28800	0,175	0,525	2,210	0,055	3500	16,20	119,06
U14-DNIT-FXC-60/85	45	30800	0,200	0,550	2,210	0,150	4500	22,15	158,18

Nota: <sup>1</sup> Misturas Mornas

Fonte: Do autor (2018).

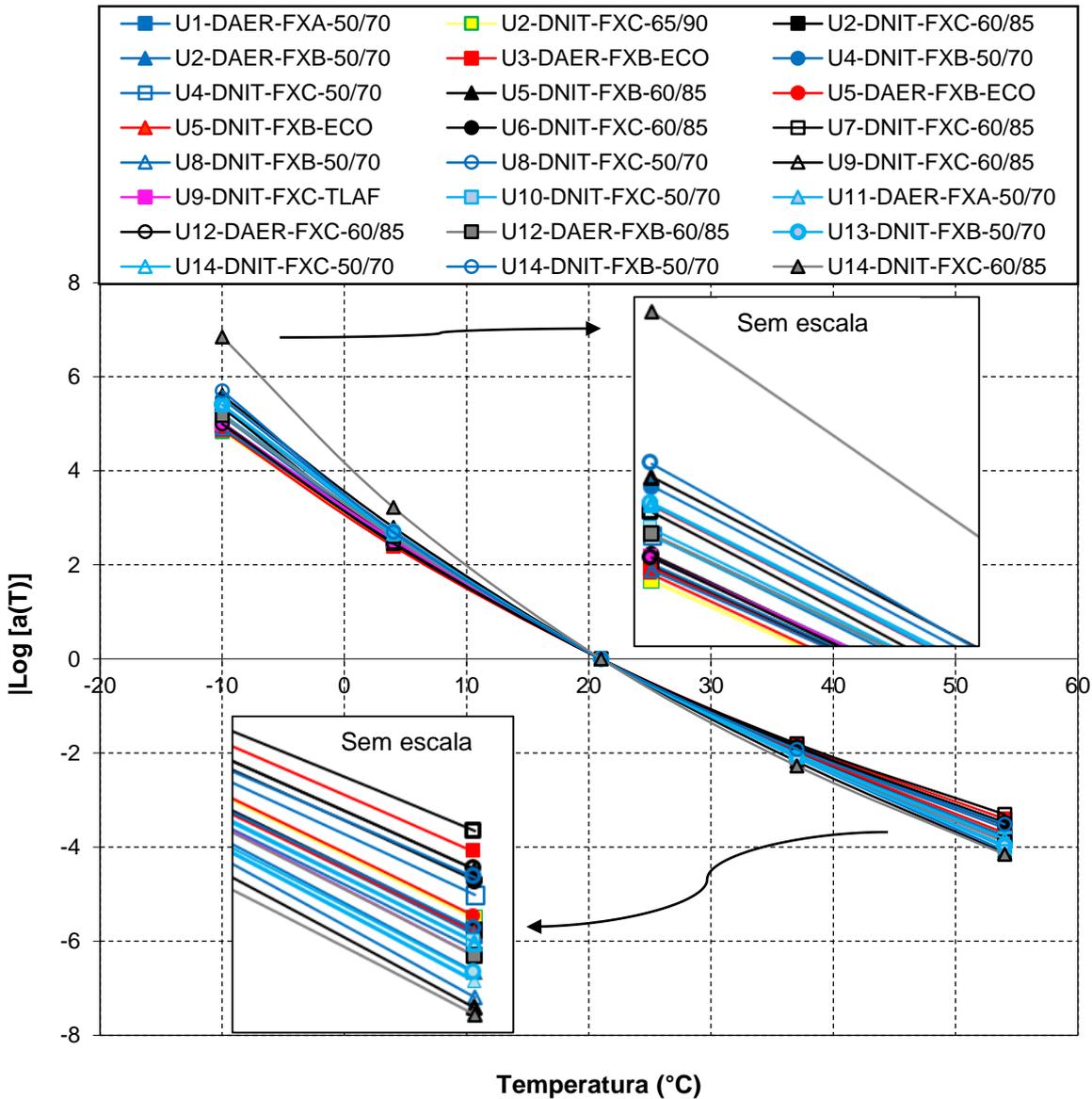
A dependência da temperatura no comportamento viscoelástico das misturas é indicada pelo fator de deslocamento e expressa por  $a(T)$ , em escala logarítmica. Esses fatores e suas correspondentes curvas de ajuste de WLF são plotados na Figura 69. A temperatura de referência escolhida foi a de 21 ° C; então  $a(T) = 1$  para as isotermas de 21°C. Misturas com curvas menos inclinadas representam que a mistura apresenta menor suscetibilidade térmica e, então, tendem a ter maior estabilidade.

As misturas com asfalto borracha apresentam comportamento semelhante entre elas, sendo, de maneira geral, menos suscetíveis que as demais. Esse comportamento é confirmado por Zanzotto e Svec (1996) apud Morilha Jr. e Greca (2003), onde os autores afirmam que o asfalto borracha apresenta como vantagem

uma redução da suscetibilidade térmica quando comparado com pavimentos construídos com ligante convencional. Já as demais misturas apresentam diferentes comportamentos, que podem ser explicados em função de outras características além do ligante, como a mineralogia dos agregados, por exemplo.

O parâmetro indicaria que a mistura U14-DNIT-FXC-60/85 seria a mais suscetível e menos estável dentre as misturas analisadas, situação incoerente com a bibliografia, pois trata-se de mistura com ligante modificado, teoricamente, menos suscetível que as misturas com ligante convencional.

Figura 69 - Comparação das linhas de tendência lineares das curvas log [a(T)] para todas as misturas (@21°C)

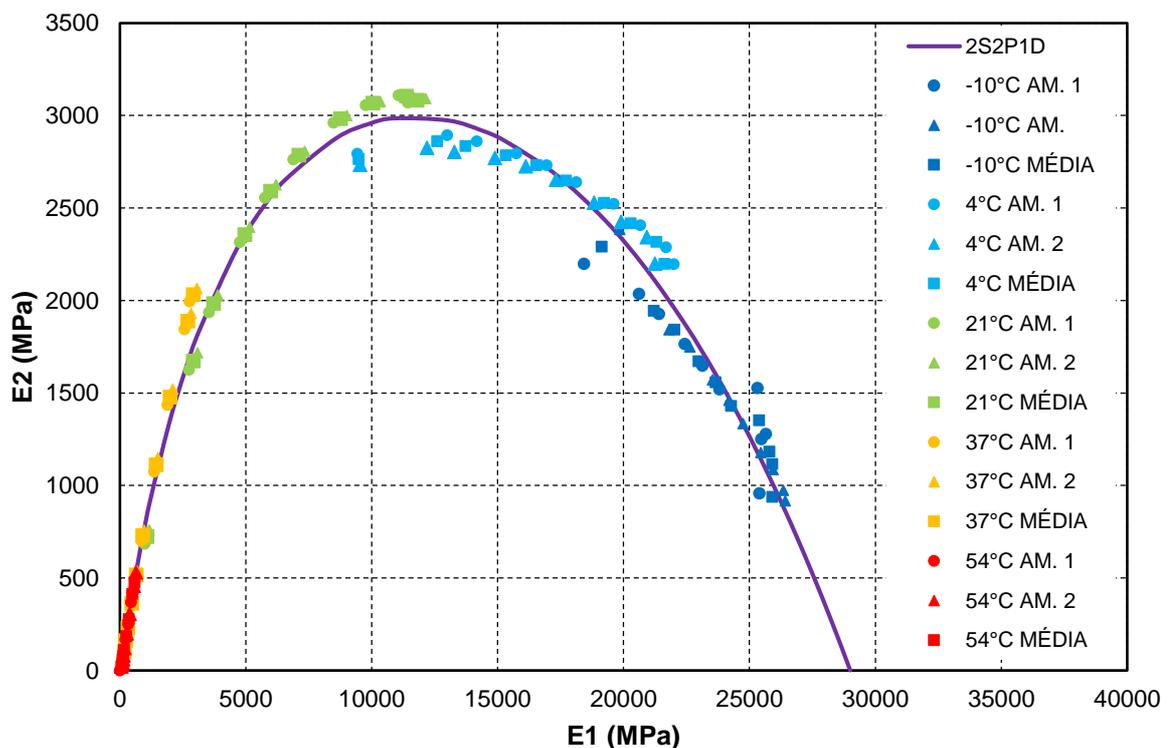


O plano Cole-Cole expressa a relação entre os componentes reais ( $E_1$ ) e imaginários ( $E_2$ ) do módulo do material. Com  $E_1$  pode-se avaliar a parte recuperável da energia armazenada e, com  $E_2$ , o comportamento viscoso do material devido à dissipação de energia. Já o espaço Black expressa a relação entre a rigidez do material e sua viscosidade, por meio da relação entre o módulo dinâmico e o ângulo de fase em diferentes temperaturas.

Além disso, segundo Kim (2009), o espaço Black e o plano Cole-Cole podem ser também utilizados para aferir a qualidade dos dados obtidos nos ensaios. Então, para todas as misturas, foram plotados nos gráficos do espaço de Black os pontos de todas as amostras a fim de se observar a dispersão dos dados e nos casos de elevada variação, foi realizado o ensaio de um terceiro corpo de prova.

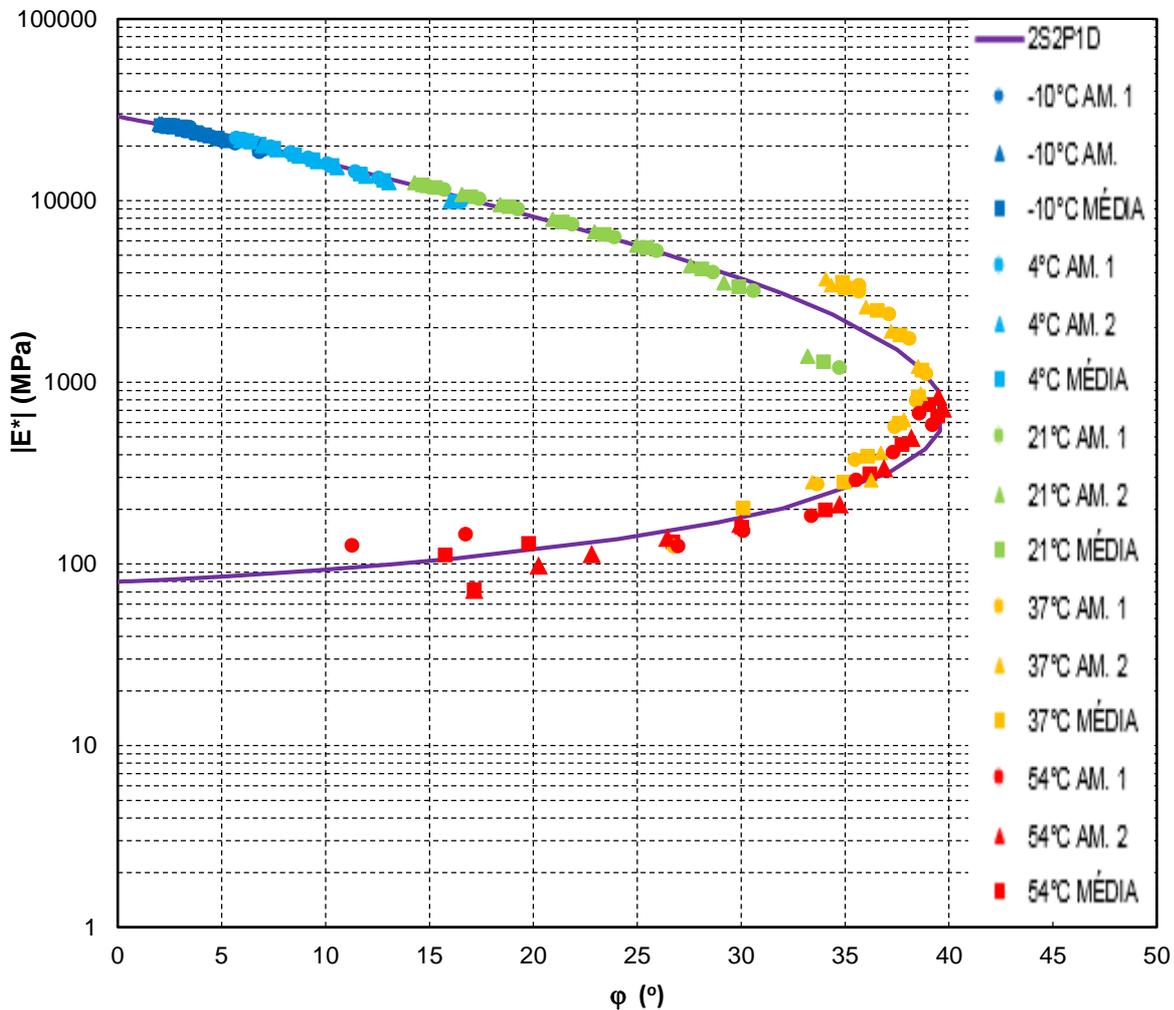
As Figuras 70 e 71 apresentam o espaço Cole Cole e o diagrama de Black para a mistura U13-DNIT-FXB-50/70, escolhida apenas para exemplificar e mostrar os dados obtidos experimentalmente (amostras 1, 2 e média) com a modelagem 2S2P1D.

Figura 70 - Espaço Cole-Cole das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a mistura U13-DNIT-FXB-50/70



Fonte: Do autor (2018).

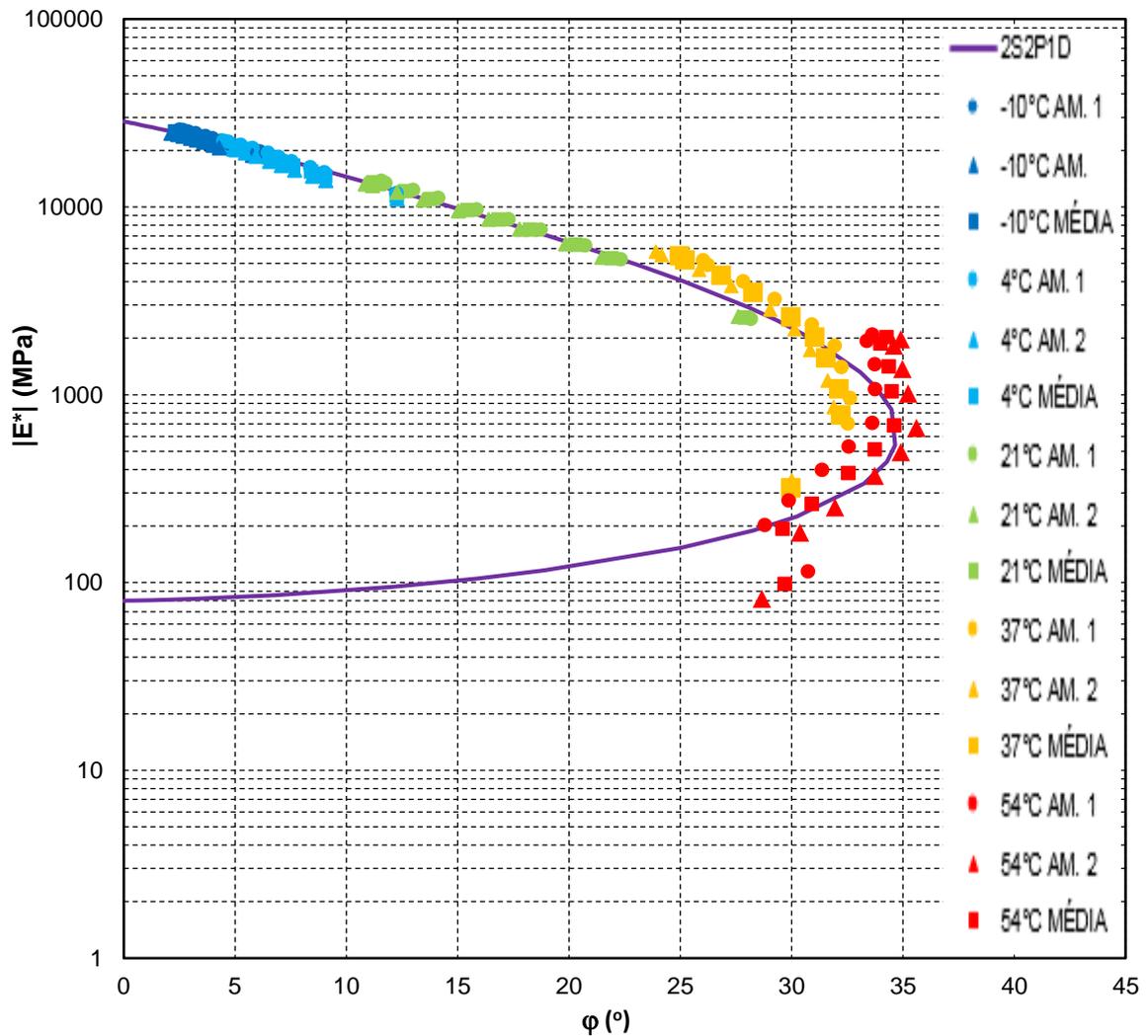
Figura 71 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a mistura U13-DNIT-FXB-50/70



Fonte: Do autor (2018).

Para os dados experimentais expressos no diagrama Black, a maioria das misturas apresenta como tendência um aumento do ângulo de fase à medida que a temperatura aumenta até um determinado valor, onde o ângulo de fase começa a diminuir, conforme é possível observar na Figura 71. No entanto, para a mistura U9-DNIT-FXC-TLAF, conforme Figura 72, o ângulo de fase ao atingir o valor máximo, não mostra a mesma tendência das demais misturas, diminuindo muito pouco nas altas temperaturas. Tal situação também foi identificada no trabalho de Mensch (2017) e pode ser explicada por tratar-se de um ligante modificado por TLA, que sofre menor variação de viscosidade nas altas temperaturas, sendo este um indicador que a mistura apresenta bom desempenho frente à deformação permanente.

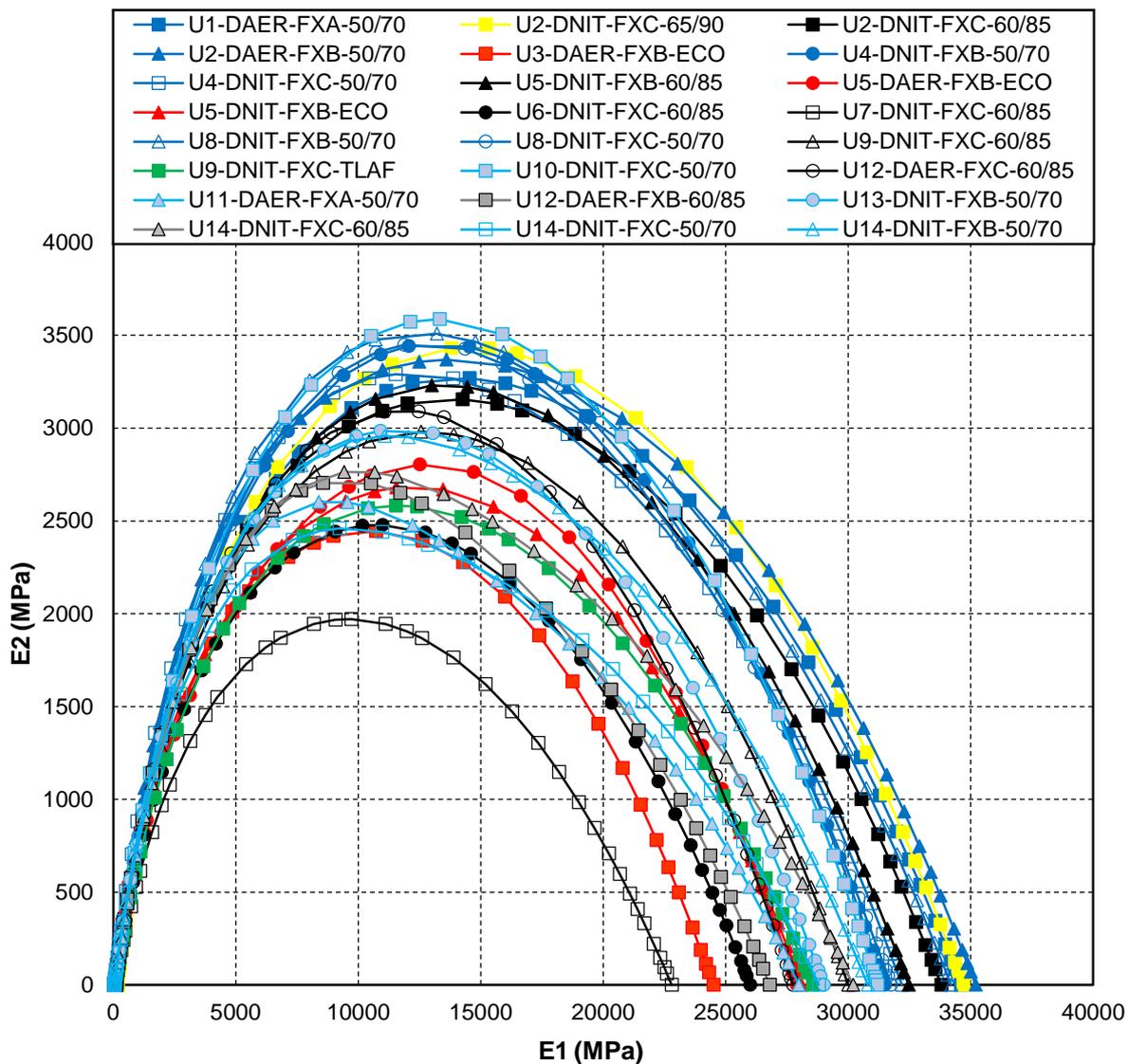
Figura 72 - Diagrama Black das amostras ensaiadas (1, 2 e média) e modelagem 2S2P1D para a mistura U9-DNIT-FXC-TLAF



Fonte: Do autor (2018).

As Figura 73 e 74 apresentam de forma gráfica os resultados no espaço Cole Cole e diagrama Black, respectivamente, de todas as misturas, somente com o resultado obtido pela modelagem 2S2P1D, sem os dados experimentais.

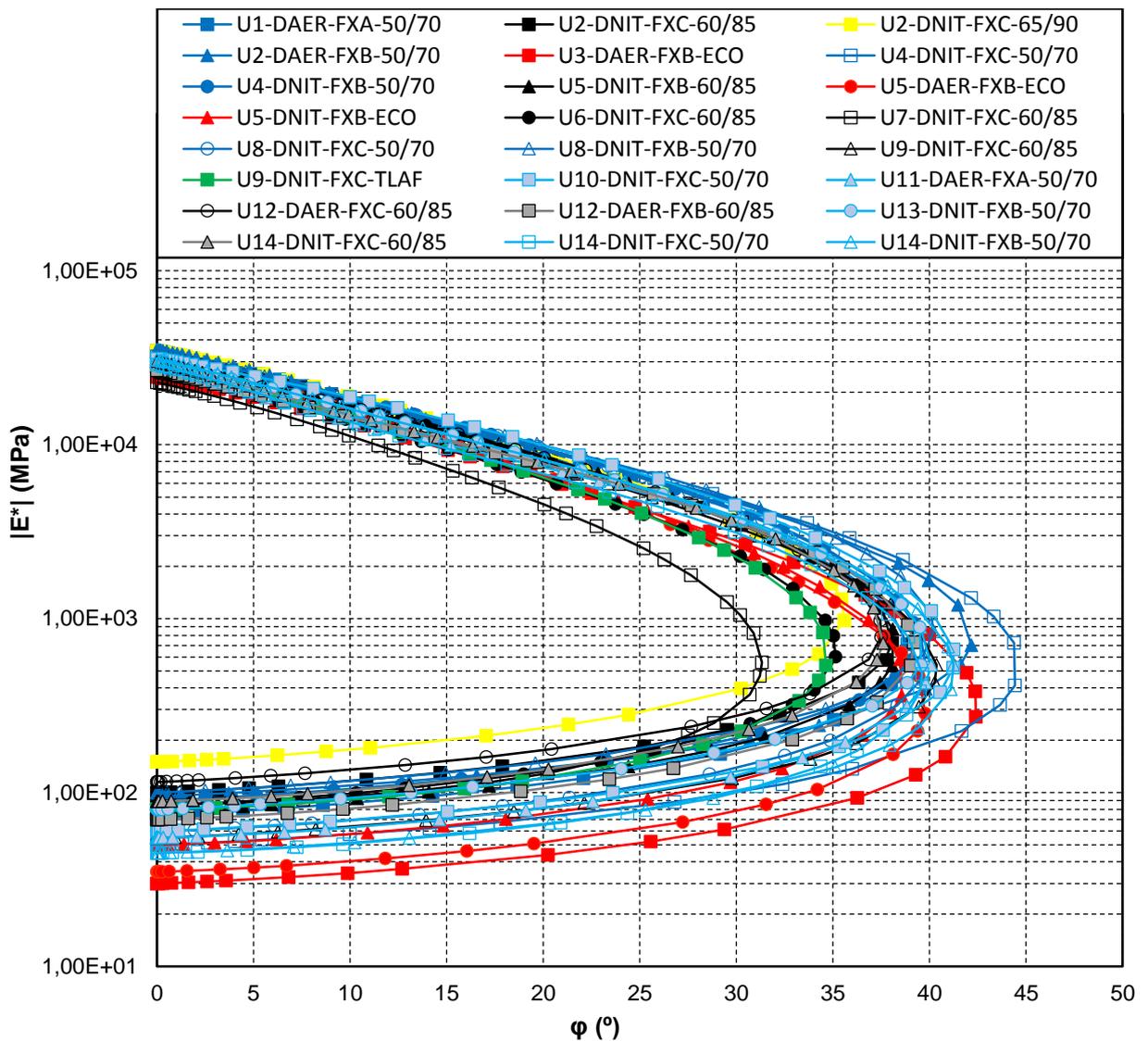
Figura 73 - Espaço Cole Cole, para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D



Fonte: Do autor (2018).

Analisando-se o plano Cole-Cole com todas as misturas, notam-se diferenças significativas de comportamento reológico, inclusive para misturas com mesmo tipo de ligante. Destaca-se o valor mais baixo de E2 e E1 da mistura U7-DNIT-FXC-60/85, indicando uma menor tendência viscosa da mistura em relação às demais (há relativamente menos energia dissipada sob carga), inferindo-se que a mesma apresenta maior capacidade de atenuação dos esforços e retorno às condições iniciais.

Figura 74 - Diagrama de Black para todas as misturas, obtido com a modelagem 2S2P1D



Fonte: Do autor (2018).

As misturas com ligante AMP 60/85 e 65/90 demonstram elevadas diferenças de  $E_2$ . Já as misturas com asfalto borracha apresentaram valores baixos de  $E_2$  e comportamento semelhante entre elas, parecidos com a mistura com asfalto tipo TLA Flex.

Os maiores valores de  $E_2$  foram encontrados para as misturas com CAP 50/70, coerente com as pesquisas de Bruxel (2015) e Almeida Júnior (2016). No entanto, algumas misturas com CAP 50/70, como a U4-DNIT-FXC-50/70 por exemplo, apresentam valores de  $E_2$  dentre os mais baixos para as misturas pesquisadas.

Analisando a parte real E1, não fica claro uma tendência das misturas em função do tipo de ligante. Assim como para o E2, nota-se elevada variação de E1 para misturas com ligante modificado e CAP 50/70, demonstrando que além do tipo de ligante, as características da mistura e agregado também contribuem no comportamento reológico.

Para o diagrama Black, o  $\phi$  da mistura U4-DNIT-FXC-50/70 atinge um máximo de cerca de 45°, quase mais de 15° maior que o máximo  $\phi$  da mistura U7-DNIT-FXC-60/85. Esses resultados podem estar associados a um efeito positivo da adição de SBS na mistura com ligante modificado, que são observadas em aplicações de campo.

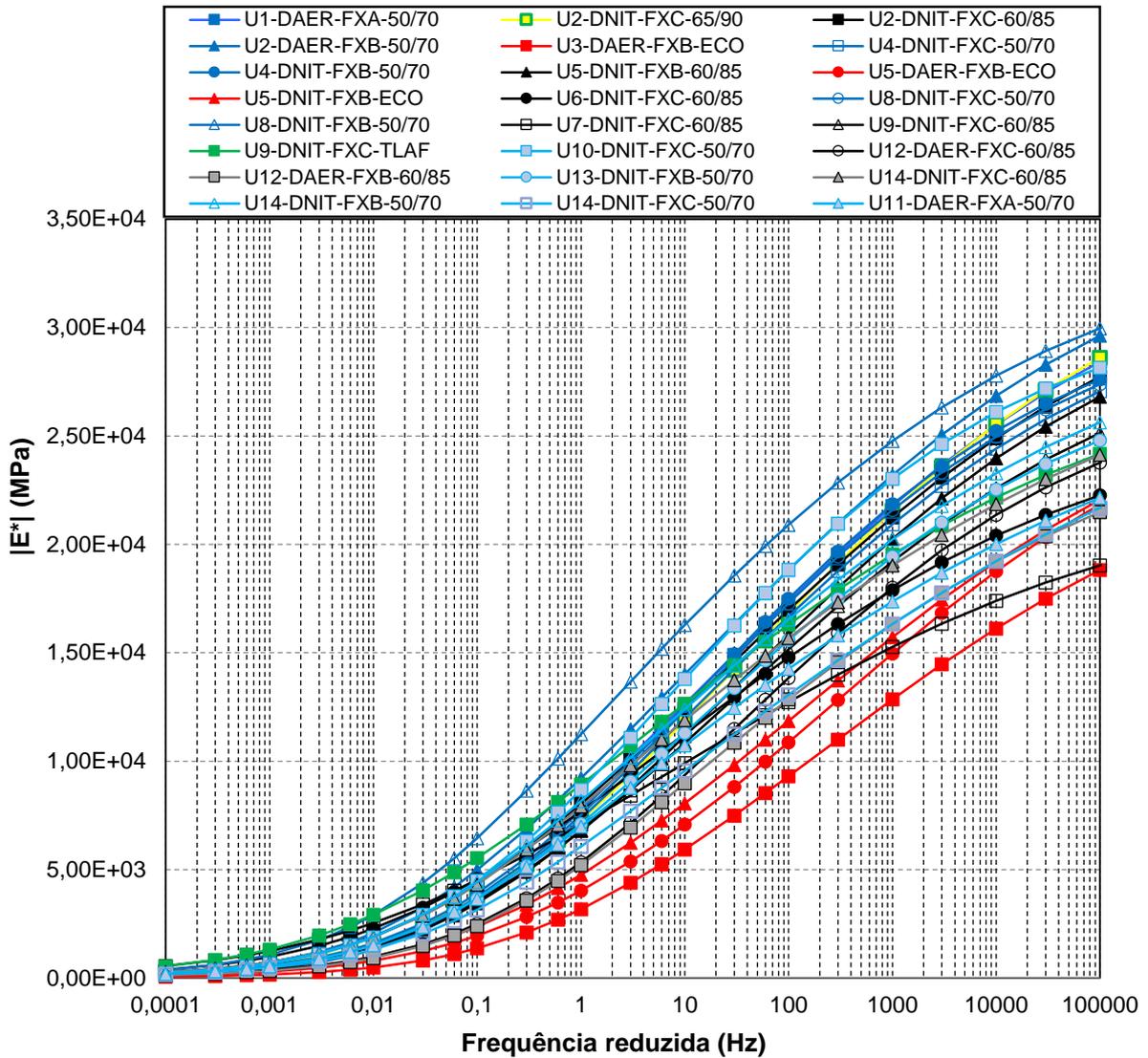
Os resultados indicam que as misturas com CAP 50/70 apresentam, em geral, maiores ângulos de fase em relação às misturas com asfaltos modificados, indicando que no comportamento dessas misturas a parcela viscosa é mais atuante que a elástica. Os menores ângulos de fase para as misturas com asfalto modificado, exceção às com asfalto borracha, demonstram que a adição de polímeros aumenta a parcela elástica da mistura, inferindo-se que as mesmas apresentam em campo uma maior resistência à deformação permanente.

Os resultados do diagrama Black para as misturas com asfalto do tipo asfalto borracha não são coerentes com os resultados do espaço Cole-Cole. No Cole-Cole as mesmas apresentam baixos valores de E2, indicando menor comportamento viscoso, já no Diagrama Black, as mesmas apresentam valores de  $\phi$  semelhantes com as misturas com CAP 50/70, indicando que a parcela viscosa é mais atuante. Já a mistura U2-DNIT-FXC-65/90 apresenta comportamento inverso.

Pode-se afirmar que as misturas em utilização no estado do RS apresentam diferentes comportamentos no domínio viscoelástico linear, o que pode ser explicado devido às diferentes características das curvas granulométricas, agregados e tipo de ligante.

A partir dos resultados de módulo dinâmico e ângulo de fase, foram construídas curvas mestras de módulo dinâmico (Figuras 75 e 76) e Ângulo de Fase (Figura 77), ajustadas pelo modelo reológico 2S2P1D utilizando como temperatura de referência 20°C.

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



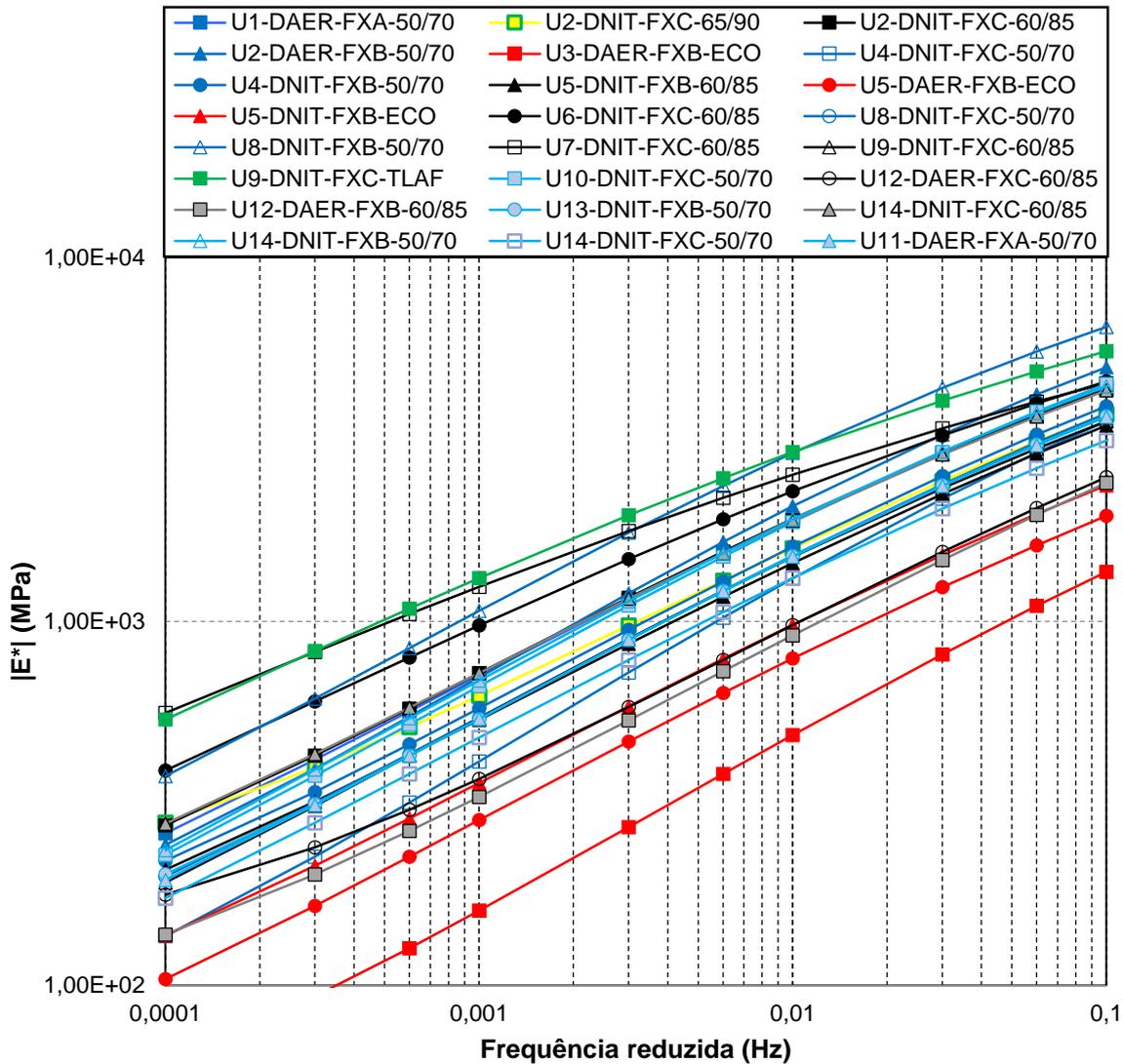
Fonte: Do autor (2018).

As baixas frequências estão relacionadas a ocorrência de deformação permanente na mistura asfáltica, foco da presente pesquisa, enquanto as temperaturas intermediárias estão relacionadas ao dano por fadiga.

Analisando as misturas para as baixas frequências, Figura 76, é visível que as misturas com asfalto borracha apresentam menor módulo dinâmico e, conseqüentemente, são menos rígidas nestas condições de temperatura e para frequências abaixo de 0,1Hz, indicando pior desempenho frente à deformação permanente. Nessas frequências, pode-se perceber que a mistura com ligante TLA

Flex apresenta a maior rigidez, inferindo que está apresentará melhor comportamento para deformação permanente dentre as misturas analisadas.

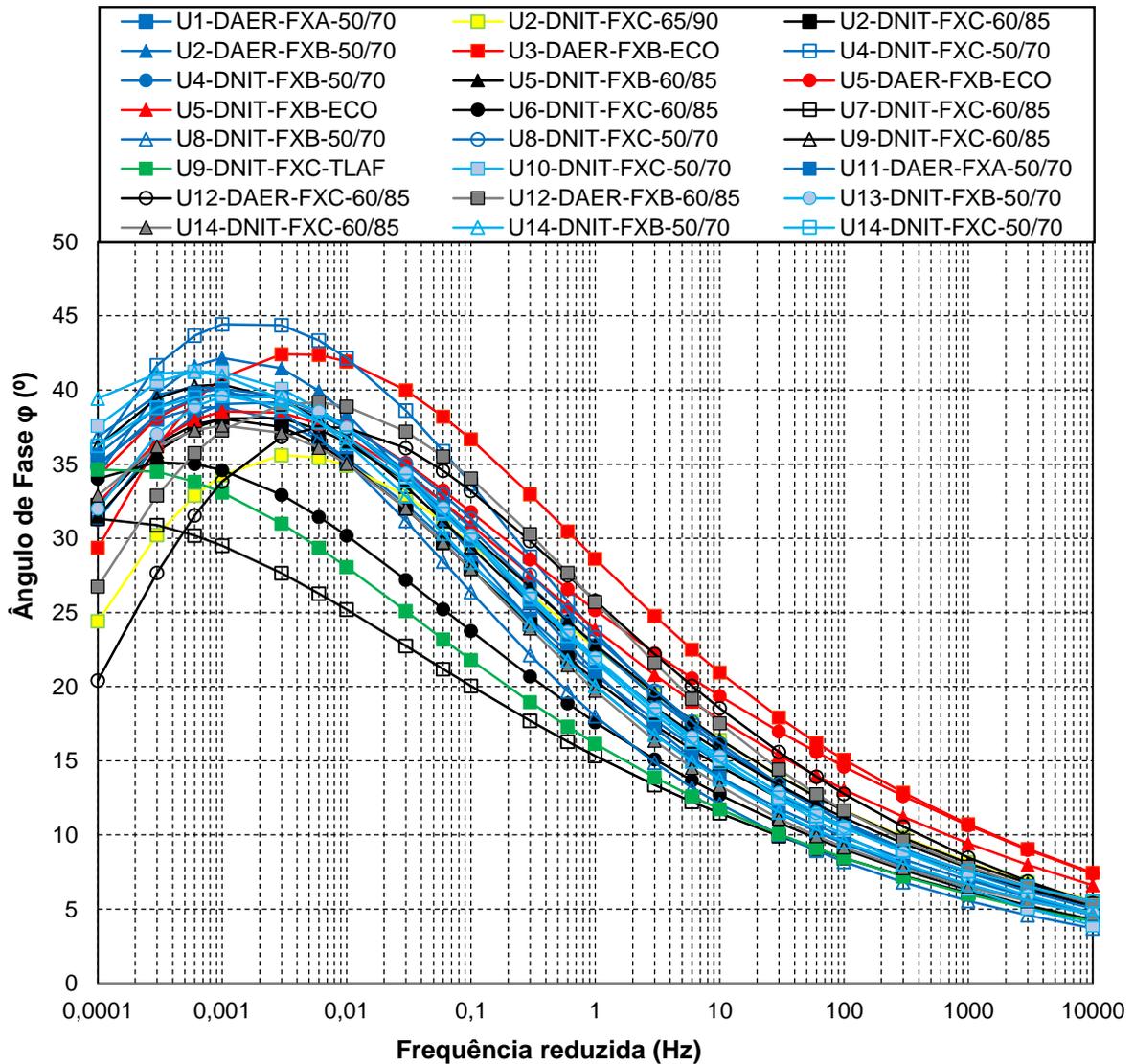
Figura 76 - Curvas mestras de módulo dinâmico para todas as misturas (baixas frequências) (@ 20°C)



Fonte: Do autor (2018).

Para as demais misturas com CAP 50/70 e ligantes modificados, não é possível identificar uma tendência apenas em função do ligante, com variações consideráveis de módulo dinâmico tanto para misturas com CAP 50/70 como para as com ligante modificado.

Figura 77 - Curvas mestras de ângulo de fase para todas as misturas (@ 20°C)



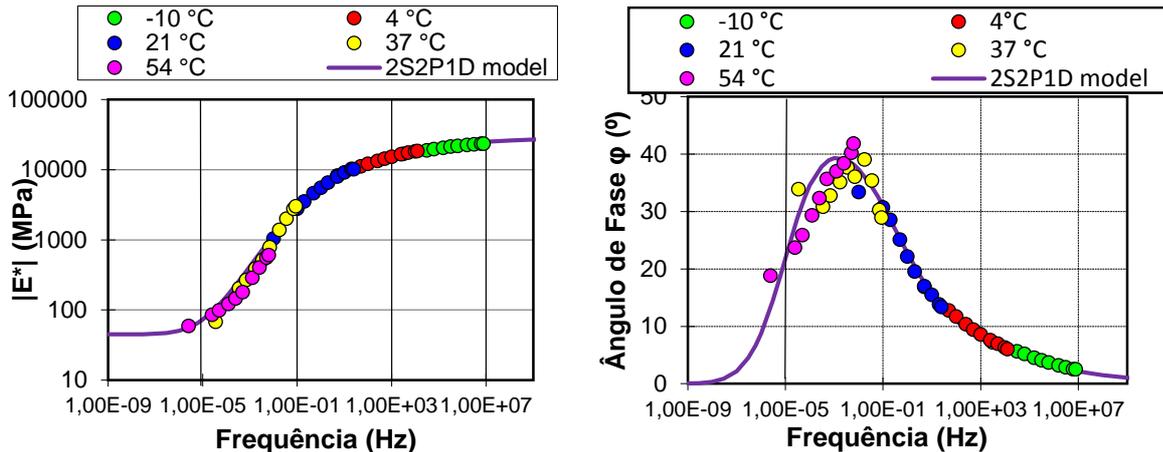
Fonte: Do autor (2018).

Ao se analisar as curvas mestras do ângulo de fase obtidos na modelagem 2S2P1D, Figura 78, nota-se que a maioria das misturas com os maiores valores de ângulos de fase são as com ligante 50-70, o que representa uma menor elasticidade e resistência à deformação permanente. Já os menores valores são identificados para as misturas com ligante modificado, indicando maior resistência à deformação permanente.

Conforme já confirmado por Cardona et al. (2015), a simulação usando o modelo 2S2P1D mostra um bom ajuste para  $|E^*|$  e  $\phi$ . No entanto, para algumas misturas, o modelo dificilmente se ajusta aos valores experimentais em frequências

muito baixas. Tais constatações foram percebidas, também, nessa pesquisa, conforme curvas mestre do módulo complexo (esquerda) e ângulo de fase (direita) apresentadas na Figura 80 para a mistura U14-DNIT-FXC-50/70.

Figura 78 - Curvas mestre do módulo complexo (esquerda) e ângulo de fase (direita) para Tref 21°C



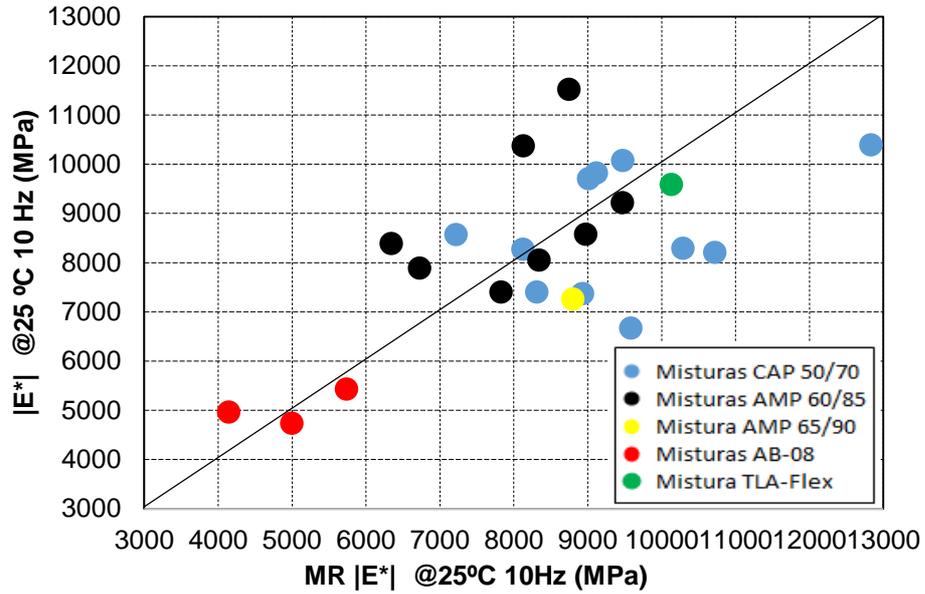
Fonte: Do autor (2018).

A fim de avaliar a relação entre a rigidez obtida por meio do ensaio de módulo de resiliência (MR) e a obtida por meio do ensaio de módulo dinâmico  $|E^*|$ , foi plotado o gráfico na Figura 79, relacionando os resultados para uma temperatura de 25°C e frequência de 10Hz para os dois ensaios, sendo que o valor de  $|E^*|$  foi obtido por meio do modelo 2S2P1D.

Percebe-se uma diferença significativa dos valores para algumas misturas, que pode ser explicado devido ao ensaio de módulo dinâmico considerar a parcela viscosa e ter estados de tensões diferentes.

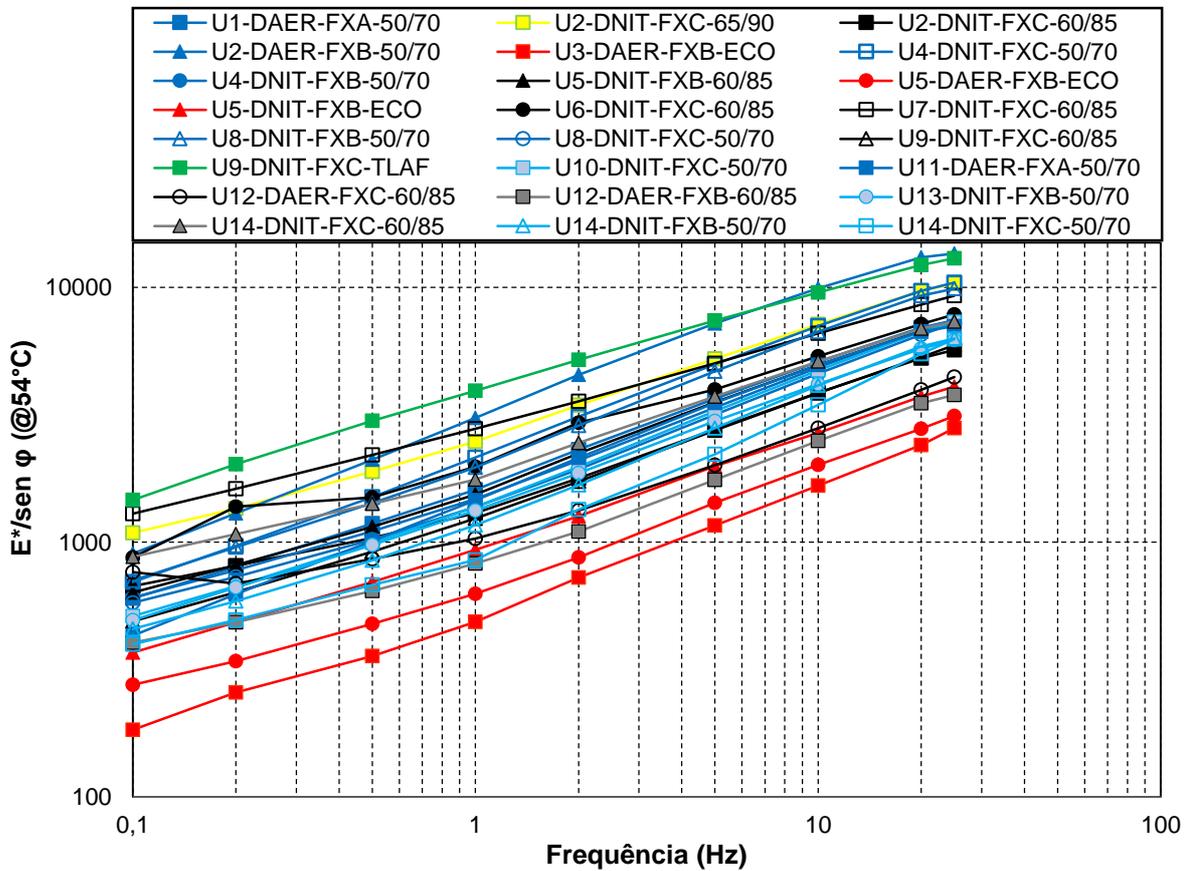
Foi realizada a relação  $E^*/\sin\phi$  para as temperaturas de 37 e 54°C, que fornece uma inferência à deformação permanente, sendo apresentadas nas Figuras 80 e 81.

Figura 79 - Relação entre módulo dinâmico @25°C 10Hz versus MR @25°C



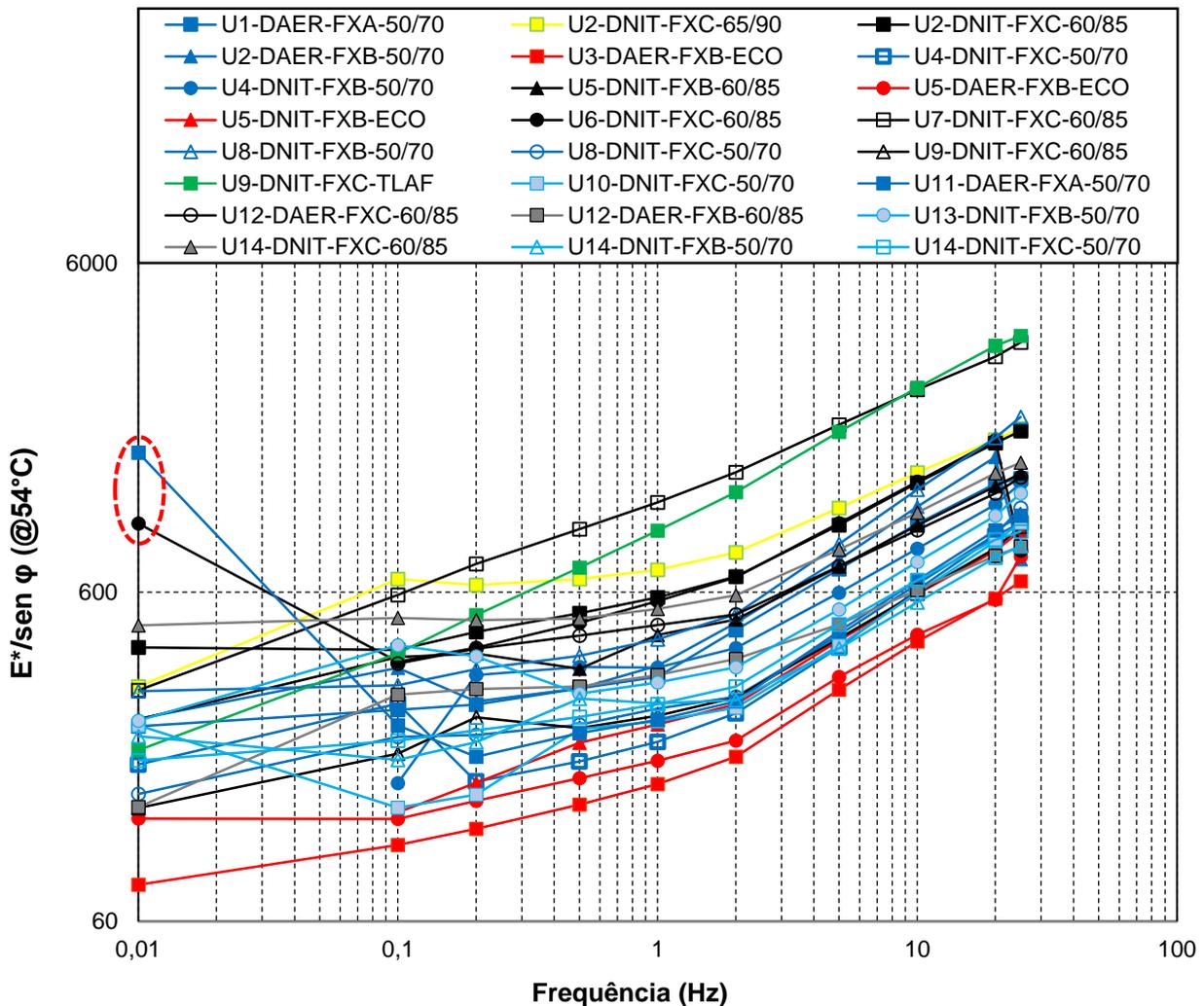
Fonte: Do autor (2018).

Figura 80 - Inferência à deformação permanente à 37°C das misturas, em escala loglog



Fonte: Do autor (2018).

Figura 81 - Inferência à deformação permanente à 54°C das misturas, em escala loglog



Fonte: Do autor (2018).

Para as duas temperaturas, destaca-se que as inferências indicam que as misturas com asfalto borracha apresentariam os piores desempenhos frente à deformação permanente. Esses dados serão analisados no próximo item, onde serão relacionados com o parâmetro *Flow Number* e o desempenho em campo.

Para a temperatura de 54°C, de maneira geral, os resultados indicam que os demais ligantes modificados propiciam misturas mais resistentes à deformação permanente em comparação as misturas com CAP 50/70.

Para a frequência de 0,01Hz na temperatura de 54°C duas misturas (zona tracejada na Figura 81 - esquerda) percebe-se o problema relatado anteriormente, em que os resultados não se encaixam com os demais.

## 4.2.2 Propriedades de resistência das misturas

Este item apresenta os resultados dos ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RT) e de *Flow Number* (FN), ensaios estes que indicam as propriedades de resistência mecânica das misturas asfálticas desta pesquisa.

### 4.2.2.1 Resistência à tração por compressão diametral e índices correlatos

Na Tabela 29 são apresentadas a média dos valores de RT, dos Índices de Tenacidade e Flexibilidade, da Tenacidade e das Áreas de Energia de Fratura para três corpos de prova por mistura ensaiados à compressão diametral na temperatura de 25°C, além do respectivo desvio padrão e coeficiente de variação. Nota-se que os resultados de RT e energia total apresentam baixos coeficientes de variação, indicando um conjunto de dados homogêneos. Já a Tenacidade e a energia máxima apresentam um CV um pouco mais elevado e os Índices de Tenacidade e Flexibilidade adaptado apresentam, para a maioria das misturas, CV muito elevado, inferindo-se elevada variação de ensaio para a mesma mistura, o que pode inviabilizar a utilização desses índices como indicador de propriedades mecânicas.

Para o IF adaptado, não foi possível efetuar o cálculo do índice para algumas misturas devido às mesmas apresentarem elevada resistência à tração e, com isso, chegando próximo ao limite de carga da prensa utilizada, ocasionaram distorções no gráfico.

Analisando-se a Figura 82, que apresenta os resultados de RT para todas as misturas e os limites normativos vigentes, pode-se observar que todas as misturas com CAP 50/70 e asfalto borracha atingiram resistência à tração acima da mínima exigida pelas especificações. As demais misturas, com ligantes modificados, apresentam RT acima do intervalo especificado na norma DNER-ES 385/99, indicada para misturas com asfalto modificado por polímero tipo SBS. Observa-se que os menores valores de RT se referem aos concretos asfálticos com asfalto borracha e os maiores às misturas com ligante AMP 60/85.

Ao especificar apenas limites mínimos para o RT, as especificações de serviço DNIT-ES 031/2006 e DNER-ES 112/2009 possibilitam a utilização de misturas com RT na ordem de 1,17 MPa como a mistura U5-DNIT-FXB-ECO que utiliza asfalto

borracha, recomendado para atenuar o problema da fadiga, assim como misturas como a U8-DNIT-FXB-50/70, com RT de 2,09 Mpa e ligante convencional.

Também, percebem-se resultados que dificultam o entendimento do parâmetro RT, como o da mistura U9-DNIT-FXC-TLAF, com asfalto de alto desempenho que apresenta praticamente o mesmo valor de RT da mistura U8-DNIT-FXB-50/70, com asfalto convencional.

Diante disso, fica evidente a necessidade de uma melhor avaliação do ensaio e dos limites normativos, assim como a análise de viabilidade de utilização dos parâmetros adicionais obtidos por meio do ensaio.

Os parâmetros de Tenacidade, Índice de Tenacidade, Energia de Fratura e Índice de Flexibilidade, para fins de comparação com o RT, foram normalizados e, então, foi gerado o gráfico da Figura 83, que permite a análise das tendências dos índices. A fim de facilitar a análise visual, os mesmos tiveram seus pontos ligados no gráfico, sendo possível perceber tendências diferentes entre eles, como para as misturas com ligante borracha, em que, para os índices IT e IF apresentam os maiores valores e já para a RT são os menores.

Paniz (2017), ao avaliar os indicadores anteriormente relacionados e os resultados do ensaio de fadiga na tração-compressão para seis misturas com mesmo tipo de agregado, cinco diferentes CAP's 50/70 e uma com CAP 30/45, concluiu que não é possível afirmar que existe relação entre os índices com os resultados de fadiga. No entanto, a maioria das misturas avaliadas pela autora apresentam o mesmo tipo de ligante, CAP 50/70, com resultados muito próximos, o que dificulta identificar comportamentos diferentes.

Nesse aspecto, encontra-se em andamento pesquisa do GEPPASV, onde estão sendo avaliadas as mesmas misturas por meio do ensaio de fadiga tração-compressão e, então, será analisada a viabilidade de utilização tanto do RT quanto dos índices correlatos para inferência à fadiga.

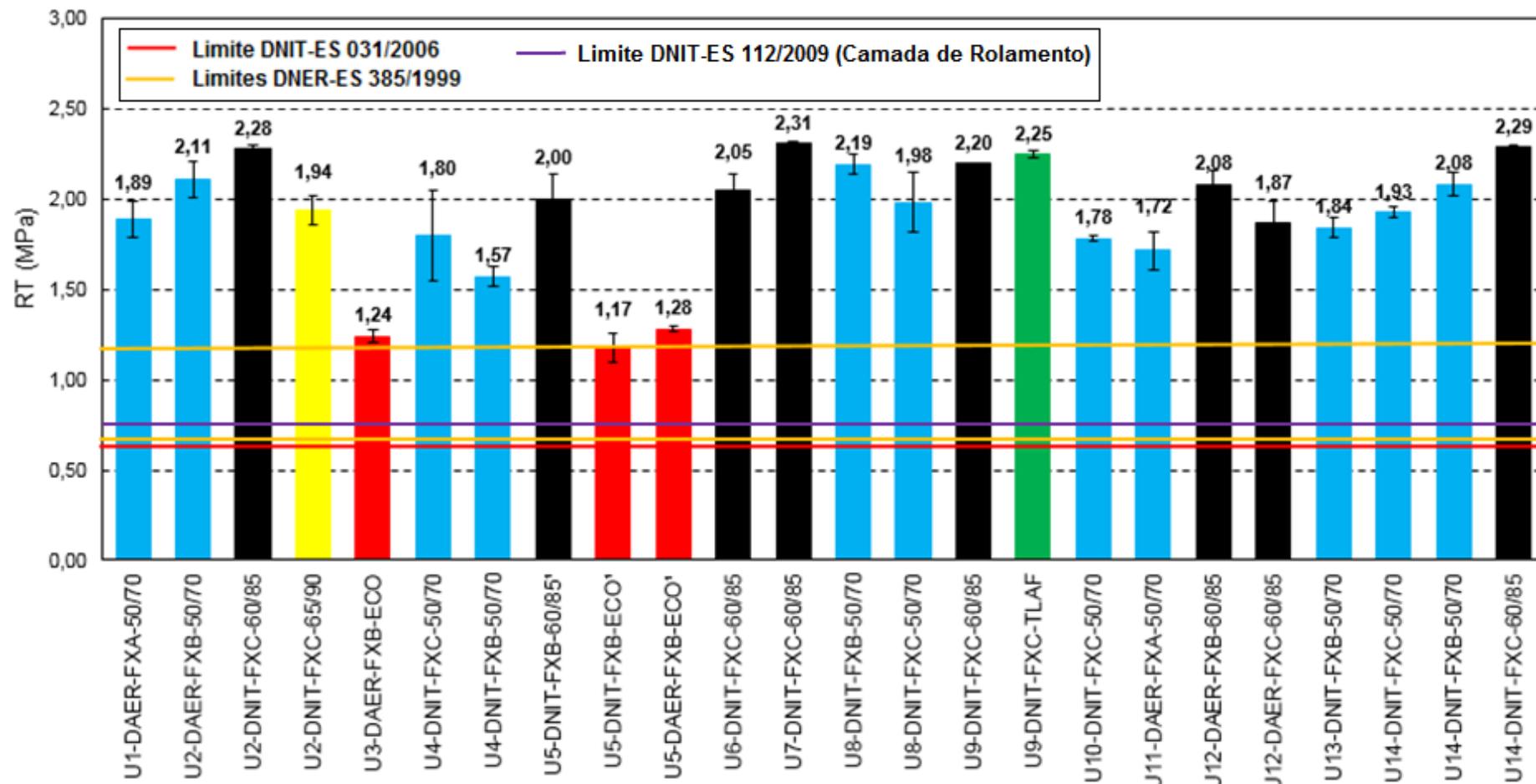
Tabela 29 - Resultados do ensaio de RT e parâmetros de Tenacidade, Energias de Fratura, IT e IF para cada amostra bem como suas médias, DP e CV de cada mistura

Mistura	RT			Tenacidade			Energia máxima			Energia Total			IT			IF		
	Média	Sd	CV (%)	Média	Sd	CV (%)	Média	Sd	CV (%)	Média	Sd	CV (%)	Média	Sd	CV (%)	Média	Sd	CV (%)
	(Mpa)	(MPa)		(Mpa)	(MPa)		(Mpa)	(MPa)		(Mpa)	(MPa)		(Mpa)	(MPa)		(Mpa)	(MPa)	
U1-DAER-FXA-50/70	1,89	0,10	5,20	1,78	0,15	8,35	25,69	0,52	2,04	64,95	0,99	1,52	0,13	0,02	18,57	14,70	2,69	18,28
U2-DAER-FXB-50/70	2,11	0,10	4,76	1,91	0,06	2,98	29,33	1,87	6,37	70,55	3,64	5,16	0,11	0,03	27,59	12,14	0,91	7,46
U2-DNIT-FXC-60/85	2,28	0,02	0,72	2,32	0,25	10,87	31,98	4,52	14,12	88,06	6,08	6,91	0,21	0,03	16,68	-	-	-
U2-DNIT-FXC-65/90	1,94	0,08	4,13	1,94	0,06	2,85	29,54	0,39	1,32	79,39	3,16	3,98	0,17	0,02	11,97	20,99	3,12	14,86
U3-DAER-FXB-ECO	1,24	0,04	3,03	1,39	0,10	6,86	20,00	2,95	14,77	63,47	0,94	1,49	0,28	0,11	37,83	40,20	3,93	9,77
U4-DNIT-FXC-50/70	1,80	0,25	13,97	1,66	0,21	12,40	25,14	4,18	16,62	70,49	4,83	6,85	0,19	0,06	29,37	19,20	3,60	18,75
U4-DNIT-FXB-50/70	1,57	0,06	3,72	1,22	0,08	6,53	18,55	1,50	8,11	54,99	1,49	2,70	0,19	0,03	14,32	14,82	1,78	11,98
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>	2,00	0,14	6,81	1,71	0,21	12,49	27,36	4,48	16,37	67,46	10,39	15,40	0,10	0,01	13,15	11,87	0,78	6,57
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	1,17	0,08	6,97	1,20	0,08	6,72	17,17	1,28	7,45	55,42	5,30	9,56	0,28	0,02	6,08	31,59	4,55	14,39
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	1,28	0,01	0,94	1,40	0,09	6,65	19,97	1,09	5,46	61,42	6,13	9,97	0,26	0,03	12,13	34,67	8,51	24,54
U6-DNIT-FXC-60/85	2,05	0,09	4,45	1,49	0,05	3,48	25,05	2,75	10,98	55,24	3,35	6,06	0,05	0,04	79,25	7,36	1,89	25,71
U7-DNIT-FXC-60/85	2,31	0,01	0,56	1,60	0,02	1,47	23,82	1,75	7,34	55,34	2,81	5,09	0,06	0,01	10,41	-	-	-
U8-DNIT-FXB-50/70	2,19	0,05	2,39	1,56	0,11	7,14	26,43	2,31	8,75	60,41	2,98	4,94	0,06	0,03	42,38	6,16	0,42	6,79
U8-DNIT-FXC-50/70	1,98	0,16	8,23	1,41	0,21	14,96	21,84	3,93	17,98	62,47	4,15	6,64	0,16	0,05	29,56	10,83	1,88	17,36
U9-DNIT-FXC-60/85	2,20	0,00	0,10	1,78	0,06	3,44	29,98	1,33	4,44	64,67	1,71	2,64	0,04	0,02	55,08	8,68	0,77	8,88
U9-DNIT-FXC-TLAF	2,25	0,02	1,07	1,83	0,10	5,65	28,13	1,88	6,70	65,22	1,65	2,54	0,07	0,04	57,35	-	-	-
U10-DNIT-FXC-50/70	1,78	0,01	0,68	1,32	0,03	2,45	19,50	0,86	4,43	65,39	5,38	8,23	0,25	0,02	9,83	18,71	3,28	17,54
U11-DAER-FXA-50/70	1,72	0,10	6,11	1,32	0,10	7,30	20,26	1,69	8,32	53,71	3,53	6,57	0,14	0,05	34,71	14,36	4,32	30,13
U11-DAER-FXB-60/85	2,08	0,07	3,45	1,86	0,07	3,63	31,93	3,00	9,40	68,84	6,88	10,00	0,10	0,02	16,81	14,82	2,03	13,72
U12-DAER-FXB-60/85	1,87	0,13	6,80	1,91	0,33	17,41	27,91	2,56	9,18	71,71	5,77	8,05	0,15	0,05	30,52	20,10	2,32	11,55
U12-DAER-FXC-60/85	1,84	0,06	3,01	1,59	0,34	21,62	21,29	0,49	2,32	62,84	4,11	6,54	0,19	0,02	12,89	15,42	1,78	11,55
U13-DNIT-FXB-50/70	1,93	0,03	1,53	1,58	0,12	7,61	25,91	2,35	9,07	59,38	3,64	6,13	0,07	0,02	32,59	11,61	1,37	11,80
U14-DNIT-FXC-50/70	2,08	0,06	3,01	1,59	0,10	6,13	26,54	1,56	5,89	63,58	5,20	8,18	0,08	0,01	11,58	8,88	0,53	6,01
U14-DNIT-FXB-50/70	2,29	0,01	0,31	1,66	0,12	6,97	22,13	2,01	9,06	63,00	5,75	9,12	0,15	0,03	21,18	-	-	-

Nota: <sup>1</sup> Misturas Mornas

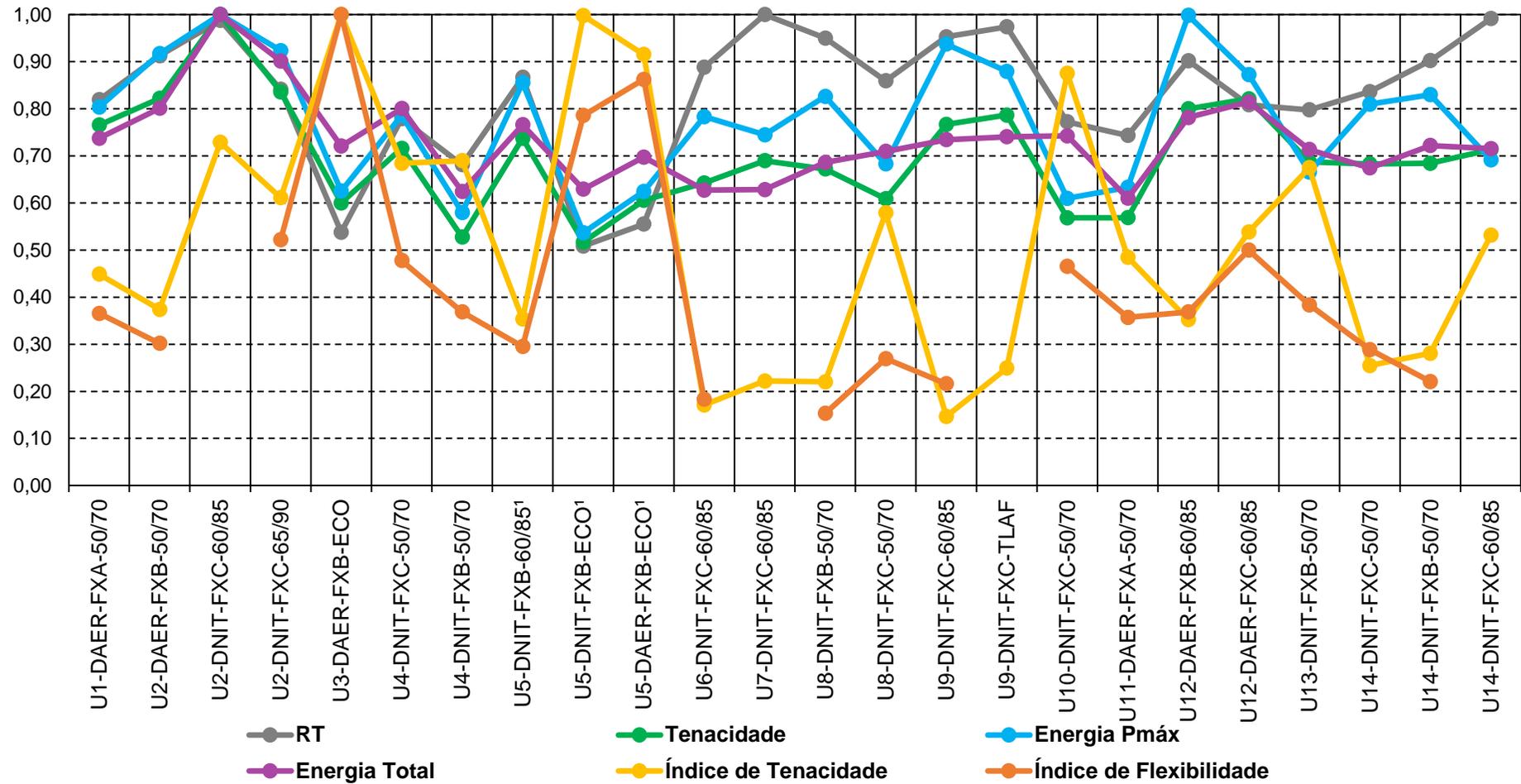
Fonte: Do autor (2018).

Figura 82 - Resultados de RT para todas as misturas



Nota: <sup>1</sup> Misturas Mornas  
 Fonte: Do autor (2018).

Figura 83 - Comparação entre os parâmetros adicionais obtidos no ensaio de RT



Nota: <sup>1</sup> Misturas Mornas  
 Fonte: Do autor (2018).

#### 4.2.2.2 Flow Number

Os valores de *Flow Number* para as 24 misturas estudadas, contemplando a média, o desvio padrão e os coeficientes A, B, C e D do modelo de Francken são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - *Flow Number*, para cada mistura, obtido pelo Modelo Francken e seus respectivos parâmetros

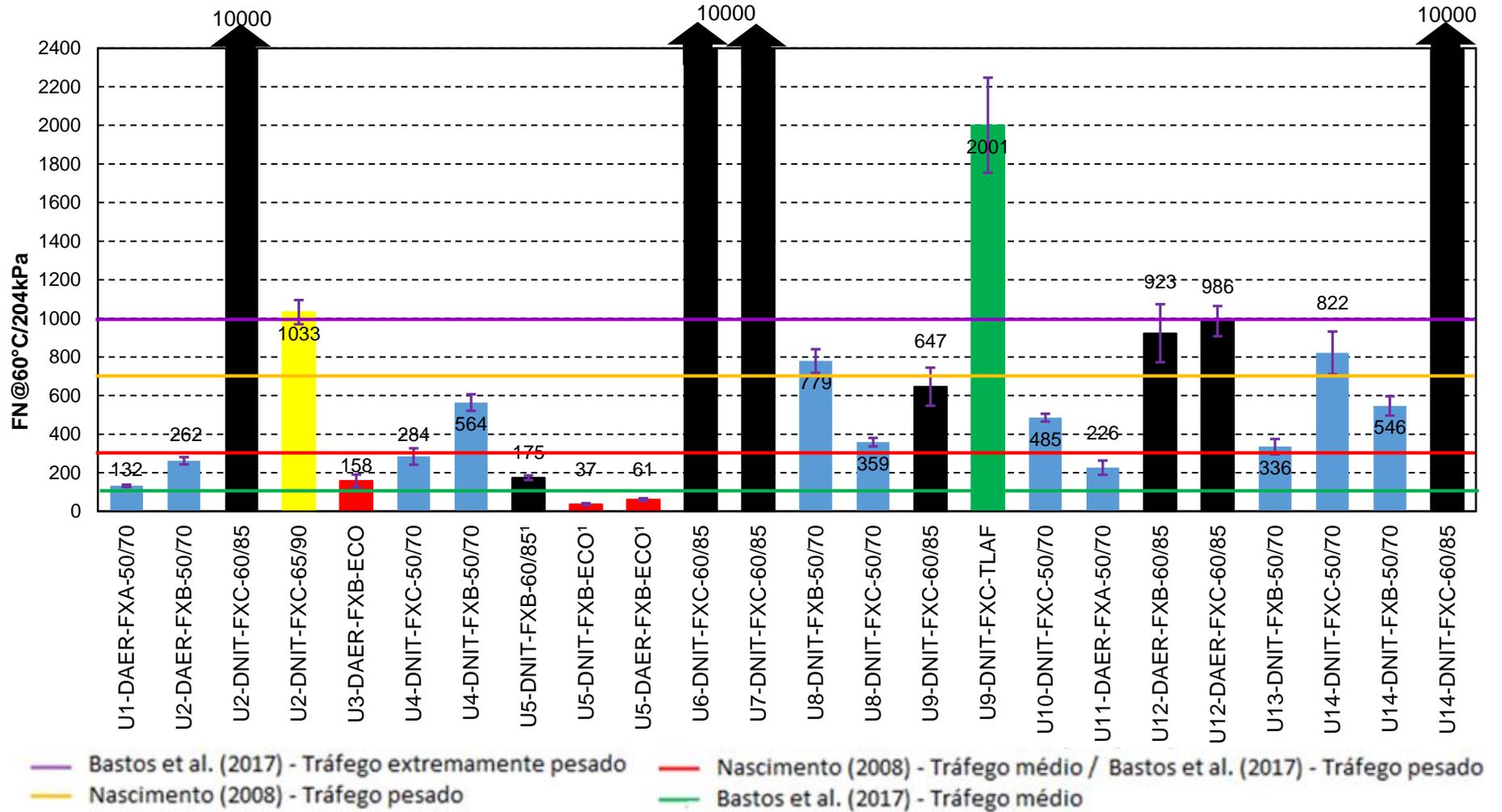
Mistura	Vv médio (%)	Média FN (Ciclo)	DP	CV (%)	Parâmetros Modelo Francken			
					A	B	C	D
U1-DAER-FXA-50/70	7,24	132	5,6	4,2	824,78	0,64	192,35	0,0145
U2-DAER-FXB-50/70	7,45	262	18,9	7,2	1273,03	0,45	1880,45	0,0057
U2-DNIT-FXC-60/85	6,55	10000 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	-
U2-DNIT-FXC-65/90	6,75	1033	62,9	6,1	1016,22	0,44	642,17	0,0015
U3-DAER-FXB-ECO	7,37	158	17,2	12,2	1476,22	0,53	231,02	0,0122
U4-DNIT-FXC-50/70	6,66	284	42,9	15,1	867,30	0,53	712,85	0,0046
U4-DNIT-FXB-50/70	6,54	564	43,4	7,7	602,01	0,53	465,67	0,0027
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>	6,69	175	12,0	6,9	676,86	0,62	65,49	0,0135
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	7,39	37	5,0	13,7	1234,61	0,75	77,64	0,0613
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	6,69	61	7,0	11,5	1004,58	0,92	19647,21	-0,0119
U6-DNIT-FXC-60/85	7,13	10000 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	-
U7-DNIT-FXC-60/85	7,18	10000 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	-
U8-DNIT-FXB-50/70	6,90	779	61,0	7,8	381,21	0,55	69,12	0,0030
U8-DNIT-FXC-50/70	7,15	359	21,9	6,1	929,64	0,51	552,82	0,0044
U9-DNIT-FXC-60/85	7,45	647	98,3	15,2	715,46	0,50	193,80	0,0029
U9-DNIT-FXC-TLAF	7,10	2001	246,8	12,3	233,40	0,56	42,05	0,0014
U10-DNIT-FXC-50/70	6,38	485	20,5	4,2	1154,42	0,47	3913,23	0,0016
U11-DAER-FXA-50/70	7,16	226	36,7	16,2	512,92	0,63	115,84	0,0101
U12-DAER-FXB-60/85	6,70	923	149,7	16,2	481,39	0,54	36,57	0,0033
U12-DAER-FXC-60/85	6,88	986	77,8	7,9	415,58	0,57	16,30	0,0015
U13-DNIT-FXB-50/70	6,87	336	40,3	12,0	998,94	0,48	1350,30	0,0031
U14-DNIT-FXC-50/70	7,56	822	110,5	13,5	753,35	0,49	625,74	0,0023
U14-DNIT-FXB-50/70	6,94	549	50,1	9,1	698,47	0,52	334,99	0,0031
U14-DNIT-FXC-60/85	6,91	10000 <sup>1</sup>	-	-	-	-	-	-

<sup>1</sup> Ensaio não atingiu valor de FN até 10000 ciclos

Fonte: Do autor (2018).

Na Figura 84, são apresentados os resultados de FN com os limites propostos por Nascimento (2008) e Bastos et al. (2017), sendo estes os únicos critérios propostos por pesquisadores no país.

Figura 84 - Flow Number das misturas estudadas com os limites mínimos propostos por Nascimento (2008) e Bastos et al. (2017)



Nota: <sup>1</sup> Misturas Mornas  
 Fonte: Do autor (2018).

Observando a Figura 84, percebe-se a elevada variação do parâmetro FN para as misturas em utilização no estado do RS, com resultados de 37 ciclos até 10000, sem atingir FN.

Considerando o FN como indicador de desempenho à deformação permanente, os resultados deste trabalho demonstram a elevada dependência do parâmetro com o tipo de ligante. No geral, as misturas com asfalto modificado apresentam maiores valores de FN, o que indica que terão melhores desempenhos em campo em comparação com as misturas com asfalto convencional, com exceção das misturas com asfalto borracha e misturas mornas. Esses resultados serão discutidos posteriormente, juntamente com o desempenho em campo.

Ao analisar as misturas produzidas na mesma usina, com mesmo tipo de agregado, essa influência do tipo de ligante fica evidente, com aumentos expressivos do número de ciclos, como percebido na Usina U14 onde a mistura com CAP 50/70 apresenta FN de 822 ciclos e a mistura de mesma faixa granulométrica, porém com ligante AMP 60/85 chegou aos 10000 ciclos e não atingiu FN. Para a Usina U9, a mistura com ligante AMP 60/85 apresenta FN de 647 e a com ligante TLA Flex, de mesma faixa granulométrica, FN de 2001 ciclos.

Considerando os resultados de FN para as misturas produzidas na mesma usina de asfalto, com agregados da mesma britagem e mesmo tipo de ligante, não é possível definir uma tendência de influência nos resultados do parâmetro em função dos diferentes tipos de faixas granulométricas.

Ao analisar as misturas com CAP 50/70, destacam-se as misturas U8-DNIT-FXB-50/70 e U14-DNIT-FXC-50/70, que apresentam FN considerável, acima de 750 ciclos, fato que pode ser explicado pela adição de cal nas mesmas.

É possível perceber a influência da origem mineralógica do agregado, sendo que os menores valores de FN obtidos para as misturas com AMP 60/85 são para as produzidas com agregados graníticos, pedreiras P10 e P5. Em seguida, as misturas que utilizam agregados da pedreira P13, basálticos. Analisando os ensaios dos agregados, constata-se que as duas pedreiras com agregados graníticos apresentam as maiores perdas por abrasão, seguida da pedreira de origem basáltica P13. No final do ensaio de FN, para as misturas com agregado granítico, é possível visualizar agregados graúdos quebrados, o que pode explicar a maior deformação do corpo de prova e, conseqüentemente, redução do número de ciclos. Faz-se necessária a

investigação da mineralogia a fim de melhor compreender essa influência no comportamento mecânico dessas misturas.

Segundo o limite proposto por Nascimento (2008), mais conservador quando comparado ao limite proposto por Bastos et al. (2017), apenas 4 misturas dentre as 11 analisadas com CAP 50/70 e nenhuma com asfalto borracha seriam recomendadas para utilização em rodovias com tráfego médio. Para as demais, com ligante modificado, apenas a mistura U5-DNIT-FXB-60/85 não seria recomendada, no entanto, trata-se de uma mistura morna, análise que será abordada posteriormente. Considerando o limite proposto pelo autor, para tráfegos pesados, dentre as misturas passíveis de utilização, apenas 10 misturas poderiam ser utilizadas, sendo duas com CAP 50/70, seis com AMP 60/85, uma com AMP 65/90 e uma com asfalto tipo TLA Flex.

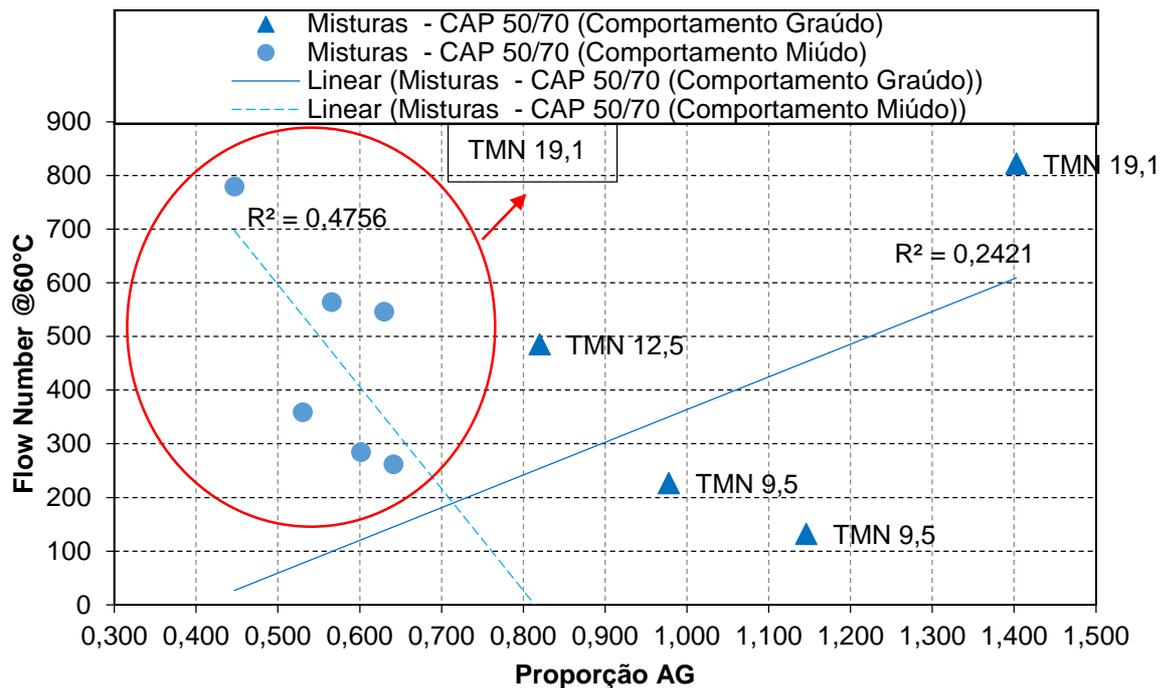
Ao considerar os limites propostos por Bastos et al. (2017) para tráfego médio, apenas as misturas mornas com asfalto borracha, U5-DNIT-FXB-ECO e U5-DAER-FXB-ECO, não seriam recomendadas para utilização dentre as 24 analisadas. Já para tráfego pesado, vale a mesma análise feita para o limite de Nascimento (2008) para tráfego médio. Para tráfego extremamente pesado (acima de 1000 ciclos), apenas 6 misturas atenderiam os limites propostos por Bastos et al. (2017), todas estas com ligantes modificados (AMP 60/85, AMP 65/90 e TLA FLEX). Ainda, segundo os limites propostos pelos autores, 7 das 11 misturas com CAP 50/70 poderiam ser utilizadas para tráfegos pesados. No entanto, conforme pesquisa de Moura (2010), ao estudar a previsibilidade de deformações em campo, para os resultados quanto à deformação permanente dos 03 trechos avaliados por meio do simulador na sua pesquisa, o autor destacou a inadequabilidade da mistura asfáltica com o CAP 50/70 para pavimentos submetidos ao tráfego pesado e lento.

#### 4.2.2.2.1 Correlações do parâmetro FN com o método Bailey e a porosidade FAD

Ao analisar a correlação do parâmetro FN com a proporção AG, percebe-se que não é possível avaliar todas as misturas conjuntamente, devido ao elevado número de variáveis na presente pesquisa: a influência dos diferentes tipos de ligante e agregados utilizados. No entanto, para as misturas de mesmo tipo de ligante para as diferentes britagens, conforme ilustrado na Figura 85, onde são plotados os resultados de AG e FN para as todas as misturas com CAP 50/70, de maneira geral,

percebe-se uma tendência de queda do FN à medida que o AG aumenta, com exceção de um resultado. Também, observam-se resultados de AG fora dos limites indicados com melhores resultados de FN em comparação à valores que atendem os respectivos limites.

Figura 85 - Correlação de FN, a 60°C, com a proporção AG para todas as misturas com CAP 50/70

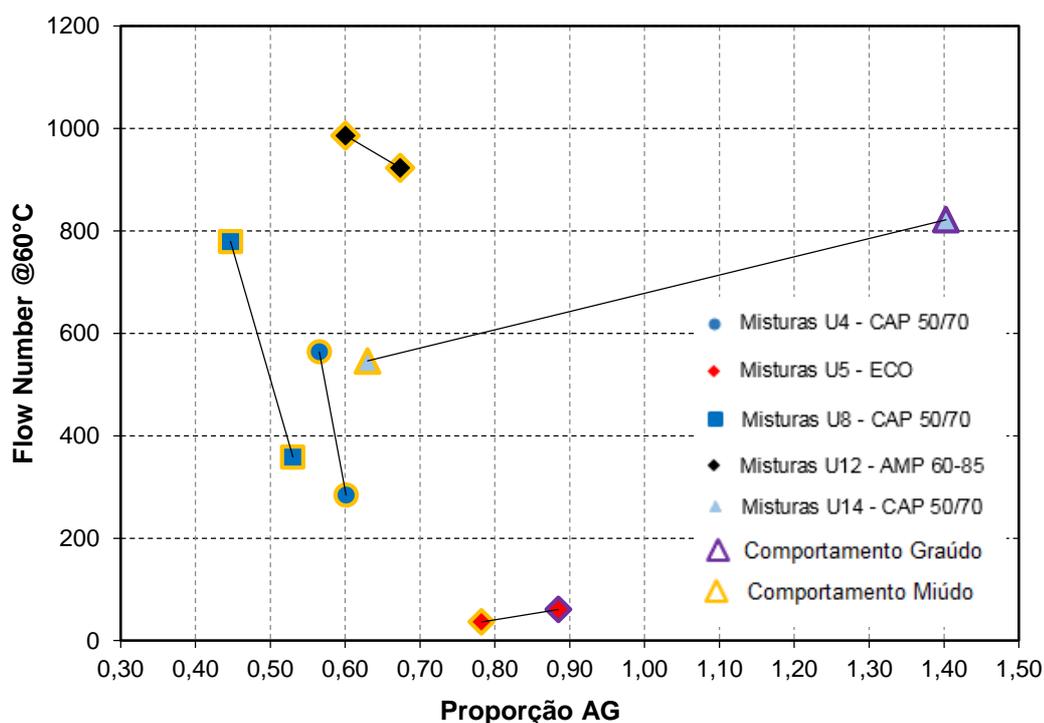


Nota: AG TMN 19 mm Comportamento Miúdo (Limite 0,60 a 1,00); AG TMN 9,5 mm Comportamento Graúdo (Limite 0,40 a 0,55); AG TMN 12,5 mm Comportamento Graúdo (Limite 0,50 a 0,65).  
Fonte: Do autor (2018).

Ao avaliar apenas a influência do AG para misturas de mesma britagem e tipo de ligante, Figura 86, percebe-se uma queda do valor do FN à medida que o AG aumenta para misturas de comportamento miúdo. Para as misturas de comportamento graúdo não se tem dados suficientes para analisar. Para a pesquisa de Almeida Júnior et al. (2017), 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 adequado travamento.

Tais resultados indicam que, de uma maneira geral, o FN diminui à medida que o AG aumenta. No entanto, percebem-se incoerências dos resultados, com melhores resultados de FN para misturas com AG fora do especificado.

Figura 86 - Influência do AG para misturas de mesma britagem e tipo de ligante



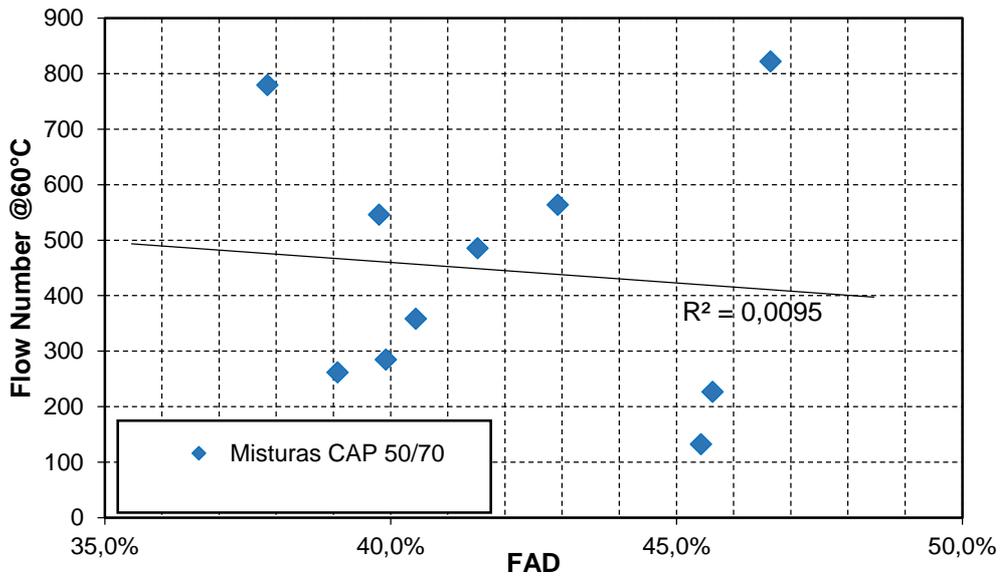
Nota: Todas as misturas apresentam TMN = 19 mm; AG TMN 19 mm Comportamento Miúdo (Limite 0,60 a 1,00); AG TMN 19 mm Comportamento Graúdo (Limite 0,60 a 0,75).  
Fonte: Do autor (2018).

Além das correlações supracitadas, também se analisou a relação dos resultados de FN com a porosidade FAD. Também não foi possível avaliar todas as misturas conjuntamente, conforme já explicado para as correlações com a proporção AG. Para misturas com mesmo tipo de ligante (CAP 50/70) e com porosidade que não seja marginal, Figura 87, percebe-se que o parâmetro não se mostra adequado para análise com agregados de diferentes britagens.

Ao se avaliar apenas a influência do FAD para misturas de mesma britagem e tipo de ligante, Figura 88, não é possível definir uma tendência de influência da porosidade no parâmetro *Flow Number*. Além disso, misturas com baixos valores FN apresentam valores de FAD que indicariam boa resistência a deformação permanente, assim como diferentes misturas com resultados de FAD próximos que apresentam consideráveis diferenças de FN. Diante disso, a porosidade FAD não se

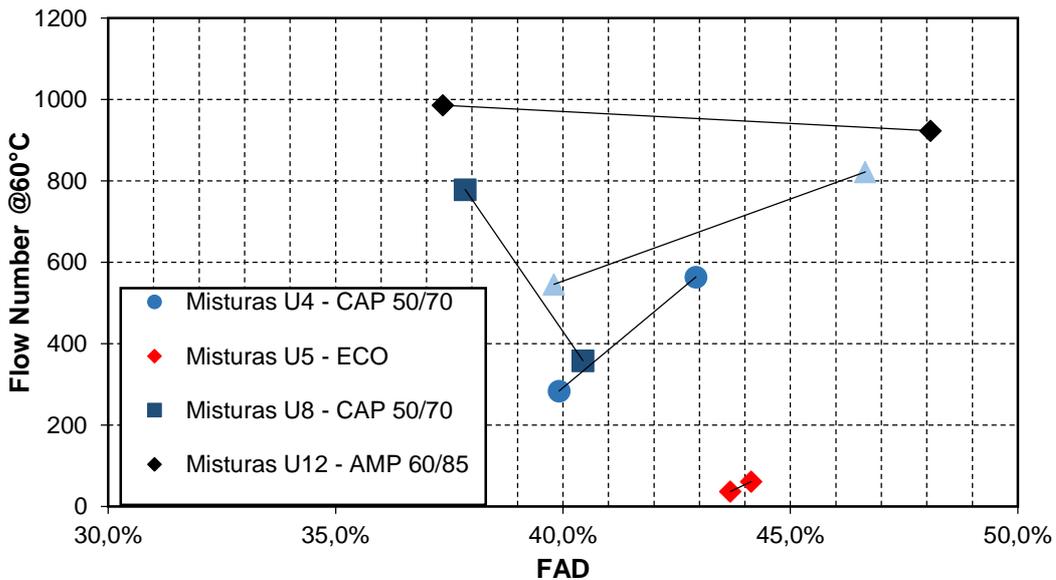
mostrou adequada para avaliação da deformação permanente em um universo amostral com diferentes tipos de agregados e ligantes.

Figura 87 - Correlação de FN, a 60°C, com a porosidade FAD para as misturas com CAP 50/70



Fonte: Do autor (2018).

Figura 88 - Influência da FAD para misturas de mesma britagem e tipo de ligante



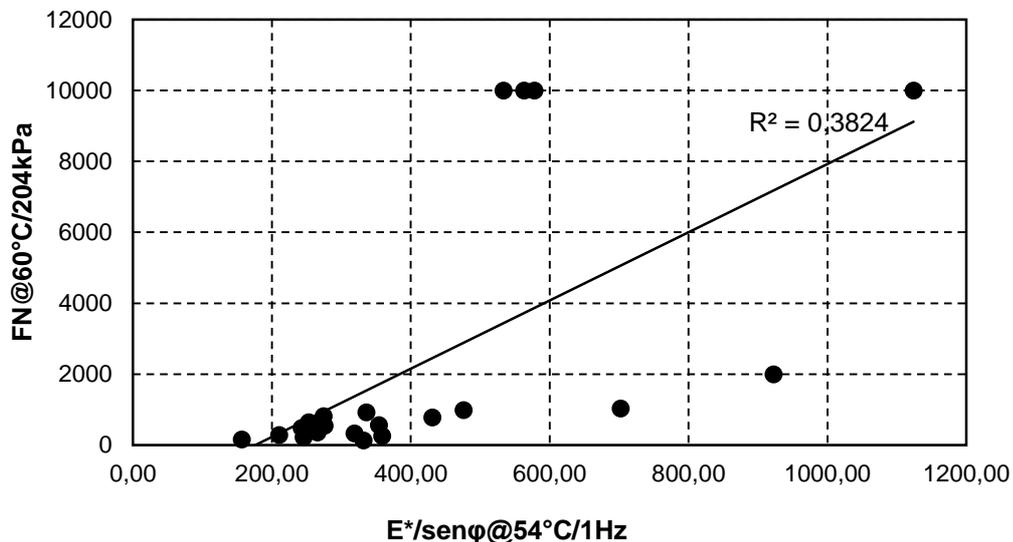
Fonte: Do autor (2018).

#### 4.2.2.2.2 Correlações do parâmetro FN com $E^*/\text{sen}\phi$

A fim de avaliar a correlação de  $E^*/\text{sen}\phi$  para as temperaturas de  $37^\circ\text{C}$  e  $54^\circ\text{C}$  com o parâmetro *Flow Number*, foram plotados gráficos correlacionando-os. A análise foi feita em três frequências diferentes (0,01Hz, 0,1Hz e 1Hz), verificando-se que a frequência de 1Hz e  $54^\circ\text{C}$  foi a que apresentou a melhor correlação ao se analisar todas as misturas, excluídas as misturas mornas, devido à disparidade dos valores de FN (Figura 89). Essa correlação a  $54^\circ\text{C}$  também foi encontrada nas pesquisas de Brondani (2016) e Bohn (2016). Já Almeida Jr. (2016) encontrou uma melhor correlação para a temperatura de  $37^\circ\text{C}$ .

Isso indica que só a rigidez das misturas, para um universo com diferentes ligantes e tipos de agregados não consegue explicar o desempenho a deformação permanente ao se considerar o parametro FN, mas, de maneira geral, percebe-se uma tendência de aumento de FN a medida que o  $E^*/\text{sen}\phi$  aumenta para a temperatura de  $54^\circ\text{C}$  e 1Hz.

Figura 89 - Correlação *Flow Number* com a relação  $E^*/\text{sen}\phi$  a  $54^\circ\text{C}$ , na frequência de 1Hz



Fonte: Do autor (2018).

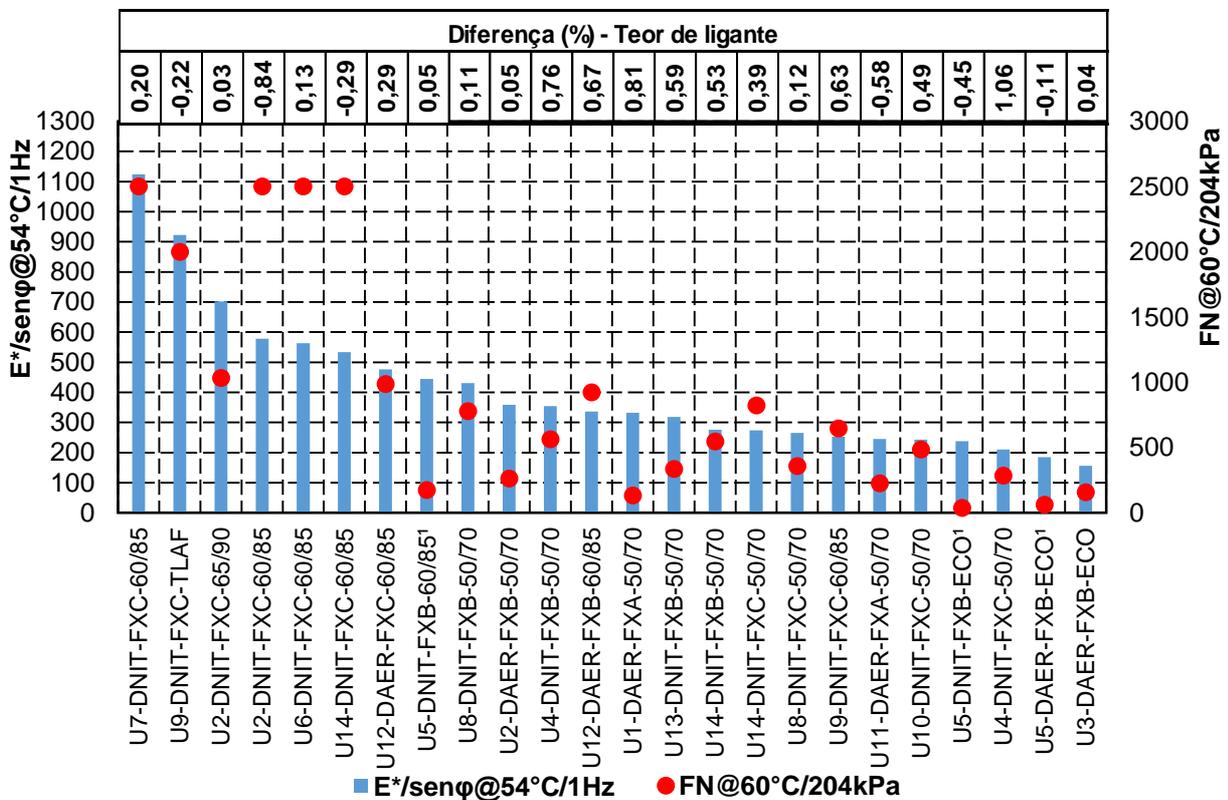
Comparando-se os resultados de FN com  $E^*/\text{sen}\phi$  para 1 Hz e  $54^\circ\text{C}$ , Figura 90, e , adotando-se para as misturas que atingiram FN de 10000 ciclos o valor de 2500 ciclos a fim de melhor visualização, pode-se perceber que, de modo geral, os maiores

valores de  $E^*/\text{sen}\phi$  são encontrados para as misturas com asfalto modificado (AMP 60/85, AMP 65/90 e TLA FLEX), indicando melhor desempenho em campo frente a deformação permanente, coerente com os valores de FN. No entanto, a mistura U5-DNIT-FXC-60/85 apresenta baixo FN, o que pode ser explicado por se tratar de uma mistura morna, além das misturas U12-DAER-FXB-60/85 e U9-DNIT-FXC-60/85, que apresentam os menores valores de  $E^*/\text{sen}\phi$ , devido ao elevado teor de ligante das duas misturas, acima dos limites normativos.

Os menores valores de  $E^*/\text{sen}\phi$  foram encontrados para as misturas com asfalto borracha, condizentes com os menores valores de FN para as mesmas misturas. Já para as misturas com CAP 50/70, os resultados de  $E^*/\text{sen}\phi$  variam de 431 a 210, não seguindo uma tendência muito clara de correlação com o FN.

Os resultados indicam um melhor desempenho a deformação permanente das misturas com ligantes modificados dos tipos AMP 60/85 e 65/90 e TLA FLEX e pior desempenho para as misturas com asfalto borracha.

Figura 90 - Ranking do  $E^*/\text{sen}\phi$  a 54°C, na frequência de 1Hz, comparando com o FN e com a variação de teor de ligante



Nota: <sup>1</sup> Misturas Mornas  
 Fonte: Do autor (2018).

#### 4.2.2.2.3 Avaliação do FN em função dos parâmetros das misturas, ligantes e agregados

A fim de entender a influência das características das misturas, ligantes e agregados no comportamento mecânico para o parâmetro *Flow Number*, buscou-se, por meio de modelos estatísticos, avaliar quais são as mais relevantes para deformação permanente.

Devido aos resultados de FN das misturas mornas serem discrepantes, os mesmos foram tratados como *outliers*, pois ocasionam interpretações errôneas e resultados sem sentido nos modelos. A mistura U13-DNIT-FXB-50/70 também não foi considerada devido a indisponibilidade dos resultados do ensaio AIMS para todas as frações de agregado.

Para o ajuste dos modelos de regressão linear múltipla, utilizou-se o *software* IBM SPSS, sendo que, primeiramente foram selecionadas as variáveis que têm influência significativa sobre a variável resposta FN dentre 23 variáveis preditoras para 20 misturas consideradas. Utilizou-se os seguintes critérios de seleção de variáveis: *Akaike Information Criterion* (AIC) e *Stepwise*. Cabe observar que foram consideradas apenas as variáveis que são estatisticamente significativas ao nível de 5% de significância (o mesmo que 95% de confiança).

A relação de variáveis preditoras testadas nos modelos e as misturas consideradas encontram-se na Tabela 31. Ressalta-se que as propriedades morfológicas dos agregados foram calculadas utilizando-se a média ponderada dos resultados do ensaio de AIMS para cada fração, já apresentados anteriormente, e seus correspondentes percentuais na mistura.

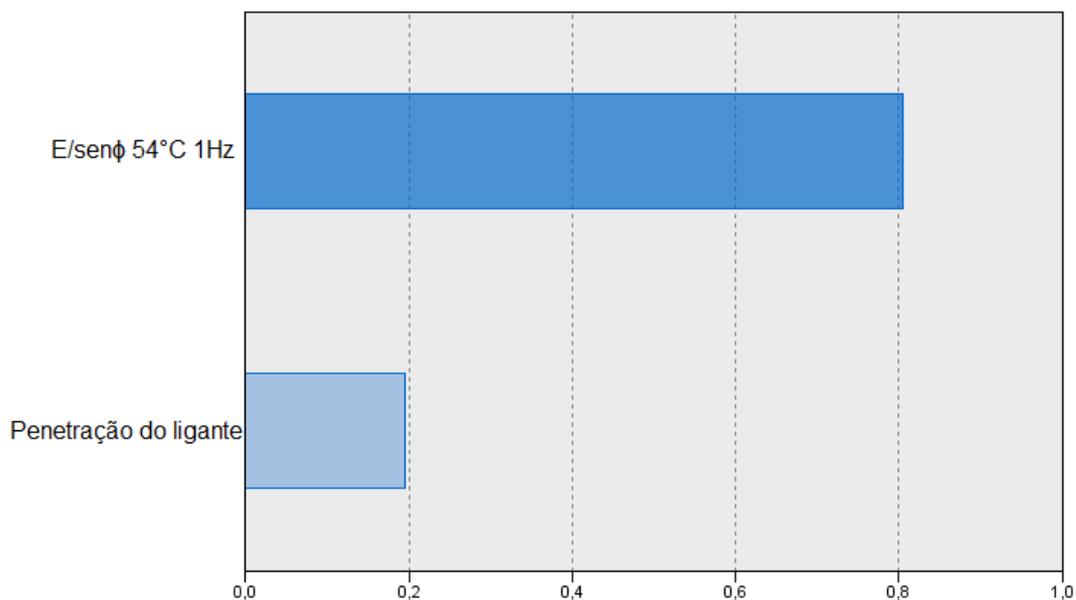
Considerando todas as misturas listadas na Tabela 31 e 10000 ciclos para as misturas que não atingiram FN, obteve-se um modelo preditivo com as variáveis  $E^*/\sin\phi$  54°C 1Hz e penetração do ligante, com  $r^2$  ajustado de 0,426. Conforme a Figura 91, a inferência  $E^*/\sin\phi$  54°C 1Hz é a variável que apresenta maior importância no modelo para explicar as variações do parâmetro FN, estando diretamente relacionada ao tipo de ligante. O modelo preditivo obtido indica que, de maneira geral, um aumento dos valores de  $E^*/\sin\phi$  54°C 1Hz e a diminuição dos valores de penetração do ligante contribuem para o aumento do FN.

Tabela 31 - Relação de variáveis analisadas nos modelos de regressão linear múltipla.

Misturas	FN (Ciclos)	Características dos ligantes	Características dos agregados	Reologia das misturas	Características das misturas
U1-DAER-FXA-50/70	132				TMN;
U2-DAER-FXB-50/70	262				FAD;
U2-DNIT-FXC-60/85	10000		Abrasão;		AG;
U2-DNIT-FXC-65/90	1033		Índice de forma;		% brita 3/4";
U3-DAER-FXB-ECO	158		Lamellaridade;		% brita 3/8";
U4-DNIT-FXC-50/70	284		Esfericidade;	E/senφ 54°C 0,1Hz;	% pó de pedra da dosagem;
U4-DNIT-FXB-50/70	564	Teor de ligante;	Angularidade do miúdo;	E/senφ 54°C 1Hz	%passante #9,5;
U6-DNIT-FXC-60/85	10000	Ponto de amolecimento;	Angularidade do graúdo;		%passante #4;
U7-DNIT-FXC-60/85	10000	Penetração	Textura;		%passante #200
U8-DNIT-FXB-50/70	779				
U8-DNIT-FXC-50/70	359				
U9-DNIT-FXC-60/85	647				
U9-DNIT-FXC-TLAF	2001				
U10-DNIT-FXC-50/70	485				
U11-DAER-FXA-50/70	226				
U12-DAER-FXB-60/85	923				
U12-DAER-FXC-60/85	986				
U14-DNIT-FXC-50/70	822				
U14-DNIT-FXB-50/70	546				
U14-DNIT-FXC-60/85	10000				

Fonte: Do autor (2018).

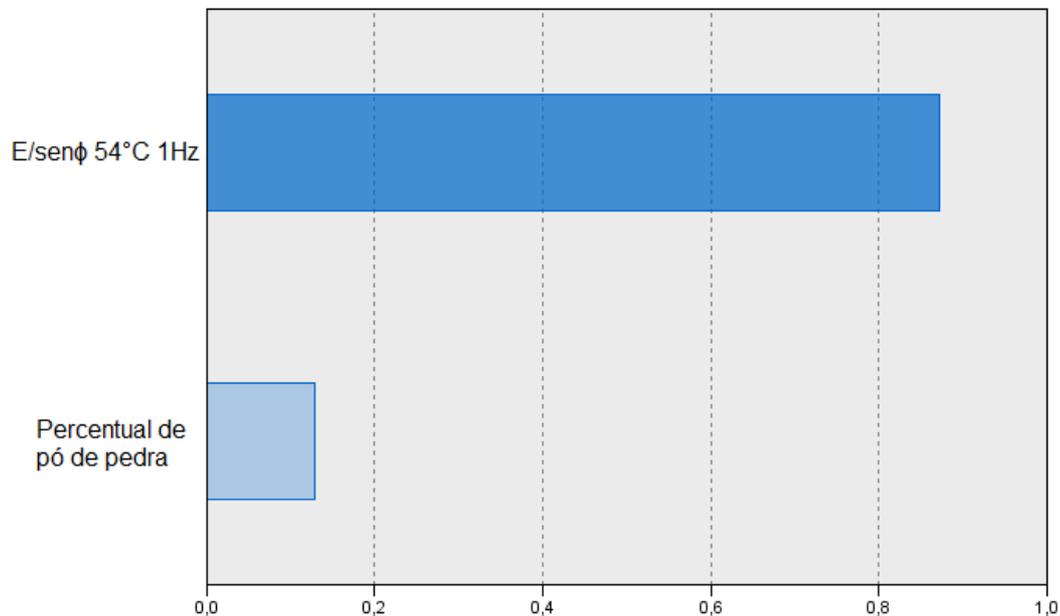
Figura 91 - Importância dos preditores no modelo de regressão linear múltipla para o FN considerando todas as misturas



Fonte: Do autor (2018).

Devido aos resultados de FN que foram até 10000 ciclos poderem se tratar de *outliers*, foi gerado novamente o modelo considerando o valor de FN para essas misturas como 2001 ciclos, máximo valor encontrado dentre as demais. Então, obteve-se um melhor modelo preditivo, sendo as variáveis selecionadas a inferência  $E^*/\text{sen}\phi$  54°C 1Hz e o percentual de pó de pedra do projeto de dosagem, com  $r^2$  ajustado de 0,686 e, indicando novamente que a inferência  $E^*/\text{sen}\phi$  54°C 1Hz tem maior importância para o modelo, conforme Figura 92. O modelo indicou que o percentual de pó de pedra na composição do concreto asfáltico tem efeito negativo no parâmetro FN à medida que se aumenta o seu percentual.

Figura 92 - Importância dos preditores no modelo de regressão linear múltipla para o FN, considerando todas as misturas e FN máximo de 2001 ciclos



Fonte: Do autor (2018).

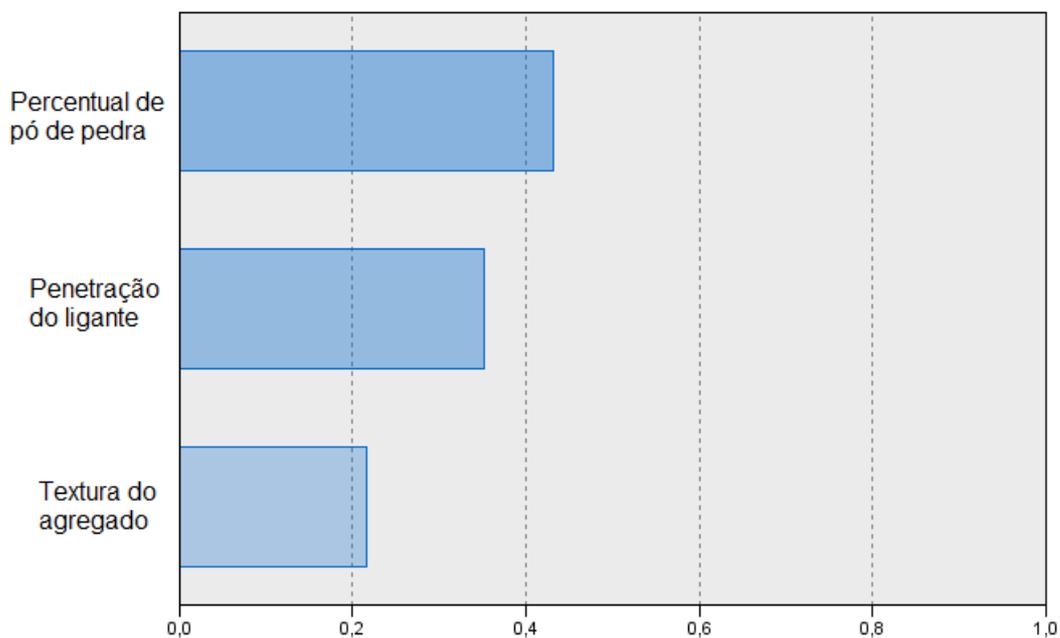
Diante disso, com base nas 20 misturas analisadas, é possível inferir, novamente, que o tipo de ligante é o principal componente das misturas asfálticas na influência dos resultados de *Flow Number*, o que pode ser observado pela influência principal identificada para a reologia das misturas em altas temperaturas, característica relacionada, predominantemente, ao ligante.

Analisando-se apenas as misturas com CAP 50/70, por meio de um modelo para as 10 misturas com este tipo de ligante listadas na Tabela 31, obteve-se um modelo preditivo com  $r^2$  ajustado de 0,841, que considerou as variáveis percentual de pó de pedra, penetração do ligante e textura como preditivas. Para essa simulação, o

modelo indica que o percentual de pó de pedra na mistura é o principal fator de influência nos resultados de FN, seguido da penetração e da textura do agregado, conforme pode-se observar na Figura 93.

Para essas misturas, o percentual de pó de pedra e a penetração do ligante, de maneira geral, ocasionam uma diminuição do valor de FN à medida que eles aumentam.

Figura 93 - Importância dos preditores no modelo de regressão linear múltipla para o FN, para misturas com CAP 50/70



Fonte: Do autor (2018).

Já para as sete misturas com ligante AMP 60/85, é possível obter mais de um modelo com elevado  $r^2$ , indicando elevada correlação do parâmetro FN com o percentual de pó de pedra ( $r^2$  de 0,99) e com a abrasão do agregado, em que se obteve um  $r^2$  ajustado de 0,61. Essa indicação da abrasão reitera a influência da mineralogia nos resultados de FN

Com base nos modelos estatísticos obtidos, pode-se inferir que, de modo geral, a principal característica a influenciar o parâmetro FN é o tipo de ligante. Dentre as características das misturas e agregados, os principais parâmetros são o percentual de pó de pedra seguido da abrasão. Não foi obtida correlação considerável do FN com as propriedades morfológicas dos agregados.

### 4.3 ATR EM CAMPO E ANÁLISE DE DESEMPENHO

A fim de avaliar o desempenho em campo para a deformação permanente das misturas asfálticas em utilização no estado do RS e a adequabilidade do parâmetro FN para este fim, quinze trechos foram monitorados nesta pesquisa, além do acréscimo de 3 trechos avaliados em Bastos (2016), localizados, também, no Rio Grande do Sul.

Os resultados de FN, juntamente com as medidas de ATR, tráfego, período de solicitação e as espessuras das camadas são apresentados na Tabela 32. Assim como foi proposto por Bastos (2016), devido aos trechos serem submetidos a diferentes níveis de tráfego, resultando em diferentes ATRs, a fim de ordenar os dados em função de um único parâmetro, relacionou-se ATR à solicitação do tráfego (número N), obtendo-se o afundamento em trilha de roda causado pela passagem de cada número N, por meio da razão  $ATR/N$ , também apresentada na referida Tabela.

Analisando a Tabela 32, considerando como critério um ATR máximo de 5 mm para tráfegos pesados e de 7 mm para tráfegos médio e leve, devido serem os critérios mais restritivos adotados pelos órgãos responsáveis pelas rodovias no estado do RS, é possível concluir que todas as misturas estudadas neste trabalho atendem os tráfegos a que foram solicitados até o momento.

As três misturas com asfalto borracha, juntamente com a mistura morna U5-DNIT-FXB-60/85 apresentaram baixos valores de FN, indicando que, considerando os limites de Nascimento (2008) e Bastos et al. (2017), apenas a U3-DAER-FXB-ECO teria condições de utilização para um tráfego médio e as demais apenas deveriam ser utilizadas para tráfegos leves. No entanto, conforme a Tabela 32, as misturas U5 já resistiram a um tráfego pesado, com afundamentos de trilha de roda muito pequenos, nem 2 mm para a trilha de roda externa. A mistura U3-DAER-FXB-ECO foi solicitada por um tráfego médio até o momento, atendendo os limites máximos de ATR.

Tabela 32 - Medidas de ATR acumulado e tráfego

Mistura	FN (ciclos)	N USACE período	ATR acumulado (mm)	ATR/N	Classificação (Tráfego no período)	Class. em função do FN - Nascimento (2008)	Class. em função do FN - Bastos et.al (2017)	(Meses)	Leituras (seme-trais) (ATR)	Espessura (cm)
U2-DAER-FXB-50/70	262	4,54E+05	1,273	2,80E-06	Leve	Leve	Médio	20,17	3	4
U2-DNIT-FXC-60/85	10000	3,14E+06	0,750	2,39E-07	Médio	Pesado	Extrem. pesado	11,87	2	4
U2-DNIT-FXC-65/90	1033	6,09E+06	0,773	1,27E-07	Médio	Pesado	Extrem. pesado	24,07	4	4
U3-DAER-FXB-ECO	158	3,21E+06	4,580	1,42E-06	Médio	Leve	Médio	22,13	4	10
U5-DNIT-FXB-60/85 <sup>1</sup>	175	2,52E+07	1,227	4,88E-08	Pesado	Leve	Médio	18,47	3	9
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	37	2,52E+07	0,318	1,27E-08	Pesado	Leve	Médio	18,93	3	9
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	61	2,52E+07	1,688	6,71E-08	Pesado	Leve	Leve	18,93	3	9
U6-DNIT-FXC-60/85	10000	4,04E+05	0,001	2,47E-09	Leve	Pesado	Extrem. pesado	14,73	2	9
U7-DNIT-FXC-60/85	10000	4,04E+05	0,001	2,47E-09	Leve	Pesado	Extrem. pesado	14,73	2	9
U8-DNIT-FXC-50/70	359	1,73E+06	0,001	5,77E-10	Leve	Médio	Pesado	14,67	2	7
U9-DNIT-FXC-60/85	647	9,88E+06	1,045	1,06E-07	Médio	Médio	Pesado	7,20	1	5
U9-DNIT-FXC-TLAF	2001	1,06E+07	0,045	4,28E-09	Médio	Pesado	Extrem. pesado	12,43	2	5
U10-DNIT-FXC-50/70	485	1,06E+07	2,444	2,30E-07	Médio	Médio	Pesado	7,47	1	6
U12-DAER-FXB-60/85	923	2,28E+06	0,360	1,58E-07	Leve	Pesado	Pesado	11,47	2	8
U13-DNIT-FXB-50/70	336	6,11E+06	2,000	3,27E-07	Médio	Médio	Pesado	11,47	2	10
UFSM - Trecho 1 (Bastos, 2016)	158	1,50E+06	4,100	2,73E-06	Leve	Leve	Médio	31,00	-	6
UFSM- Trecho 2 (Bastos, 2016)	497	1,10E+07	2,500	2,27E-07	Pesado	Médio	Pesado	37,00	-	10
(UFRGS -Trecho 3 (Bastos, 2016)	1487	3,10E+07	6,400	2,06E-07	Extremamente pesado	Pesado	Extrem. pesado	36,00	-	8

Fonte: Do autor (2018).



Conforme a Figura 94, o trecho que apresenta maior ATR é o da mistura U3-DAER-FXB-ECO. No entanto, esse ATR não representa fielmente a deformação permanente da mistura pois foi executada a emenda longitudinal construtiva exatamente na trilha de roda externa, conforme possível observar na Figura 95.

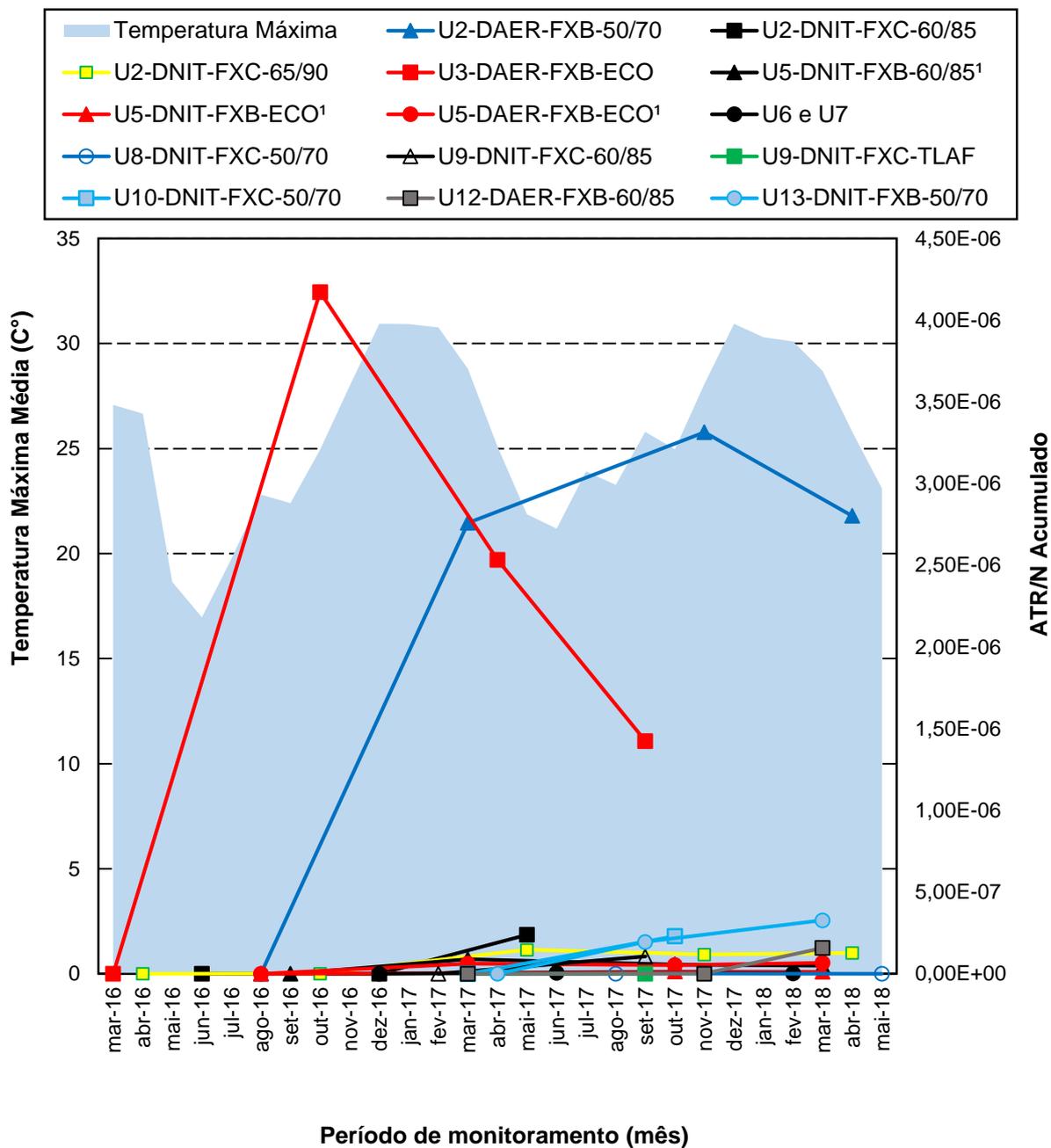
Devido ao não atingimento de níveis de tráfego que possibilitem a análise direta para todas as misturas, a fim de entender o comportamento da evolução do ATR em função do tráfego, a relação ATR/N acumulada foi plotada em função do período de solicitação e Temperatura Máxima Média para todas as misturas na Figura 96, sendo adotada como referência a temperatura da cidade de Santa Maria.

Figura 95 - Emenda construtiva na trilha de roda externa



Fonte: Do autor (2018).

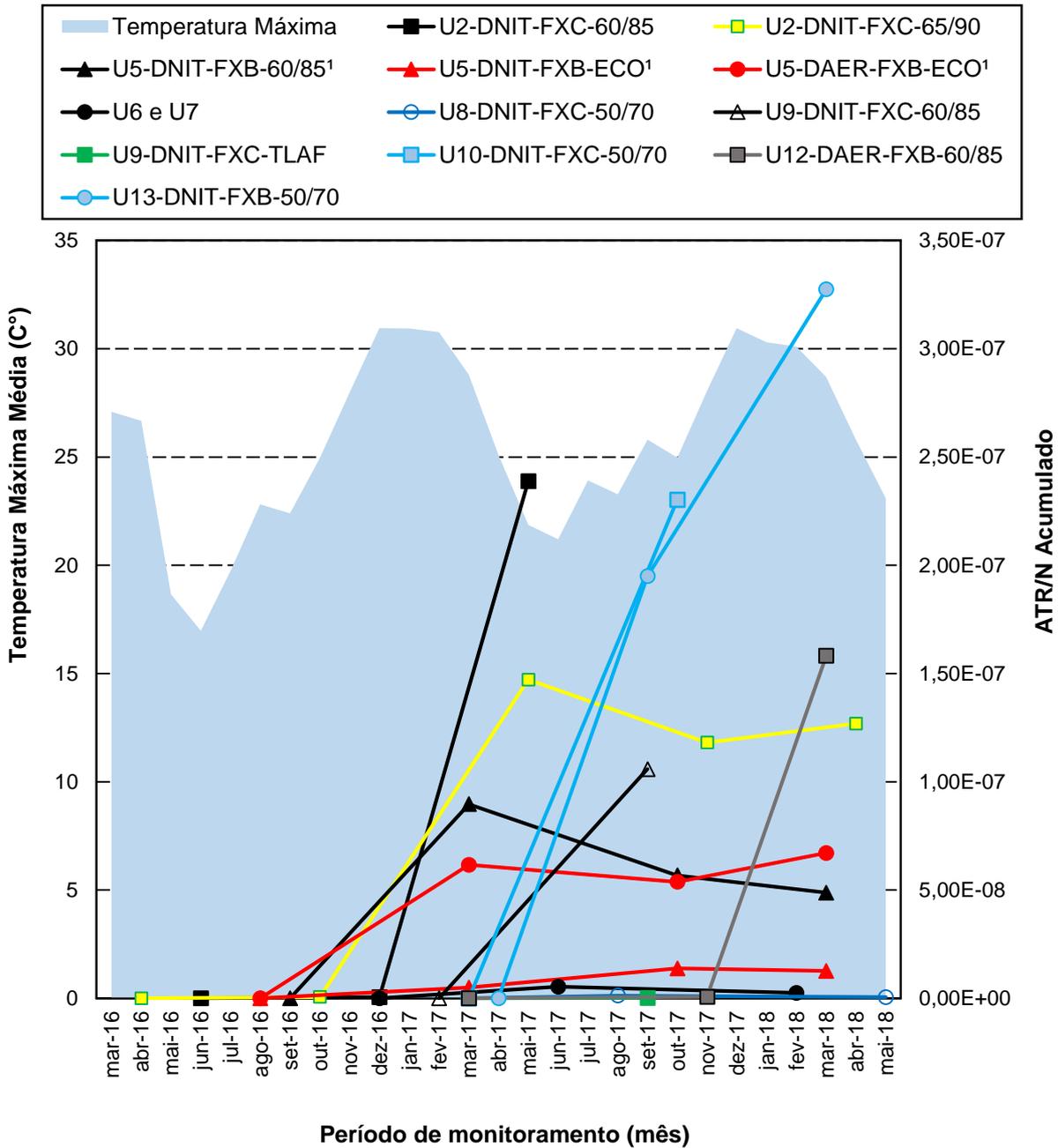
Figura 96 - Relação ATR/N acumulada para todos os trechos monitorados



Fonte: Do autor (2018).

Devido as misturas U2-DAER-FXB-50/70 e U3-DAER-FXB-ECO apresentarem relação ATR/N acumulada muito maior que as demais, dificultando a análise no gráfico, os dados dessas 2 misturas foram excluídos na Figura 97, a fim de propiciar a análise das demais misturas.

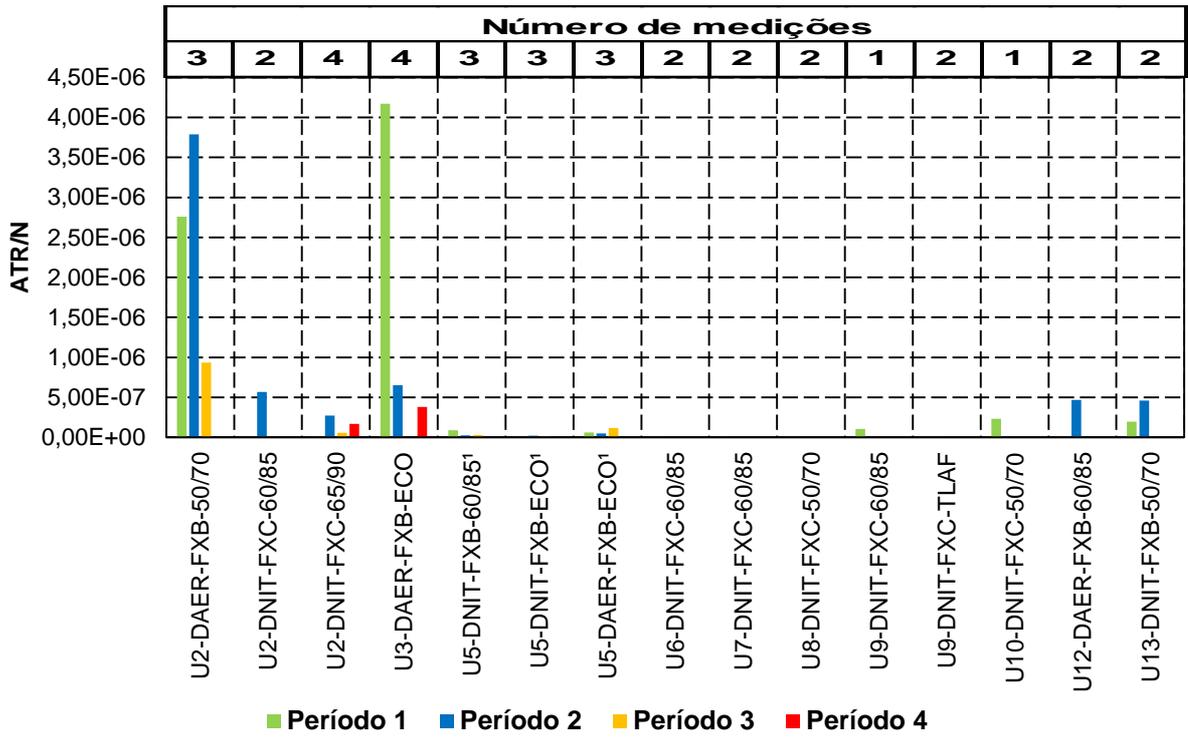
Figura 97 - Relação ATR/N acumulada sem as misturas U2-DAER-FXB-50/70 e U3-DAER-FXB-ECO



Fonte: Do autor (2018).

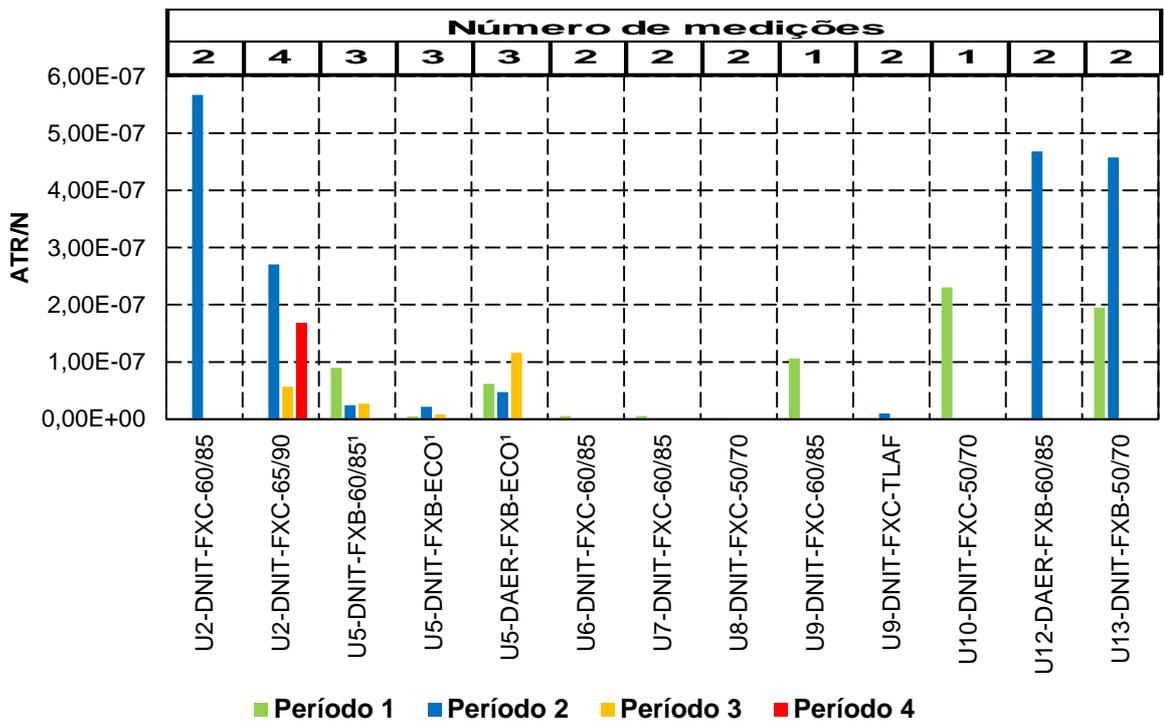
Para entender a taxa de crescimento de ATR em função do tráfego por período, foram gerados gráficos que expressam a relação ATR/N para cada período de monitoramento, apresentados na Figura 98, para todas as misturas, e na Figura 99, sem as misturas U2-DAER-FXB-50/70 e U3-DAER-FXB-ECO, respectivamente.

Figura 98 - Relação ATR/N por período para todas as misturas



Fonte: Do autor (2018).

Figura 99 - Relação ATR/N por período sem as misturas U2-DAER-FXB-50/70 e U3-DAER-FXB-ECO



Fonte: Do autor (2018).

Observando os dados apresentados, percebe-se que as misturas U2-DAER-FXB-50/70 e U3-DAER-FXB-ECO apresentam as maiores taxas de crescimento do ATR em função do tráfego para o primeiro período. No entanto, conforme já relatado anteriormente, o ATR do primeiro período para a mistura U3-DAER-FXB-ECO não representa a realidade, fato comprovado pela redução brusca da relação ATR/N para os períodos subsequentes. Já a mistura com CAP 50/70 apresenta aumento da relação ATR/N para o segundo período, mesmo em um período com temperaturas mais baixas e redução no terceiro, conforme possível observar na Figura 98.

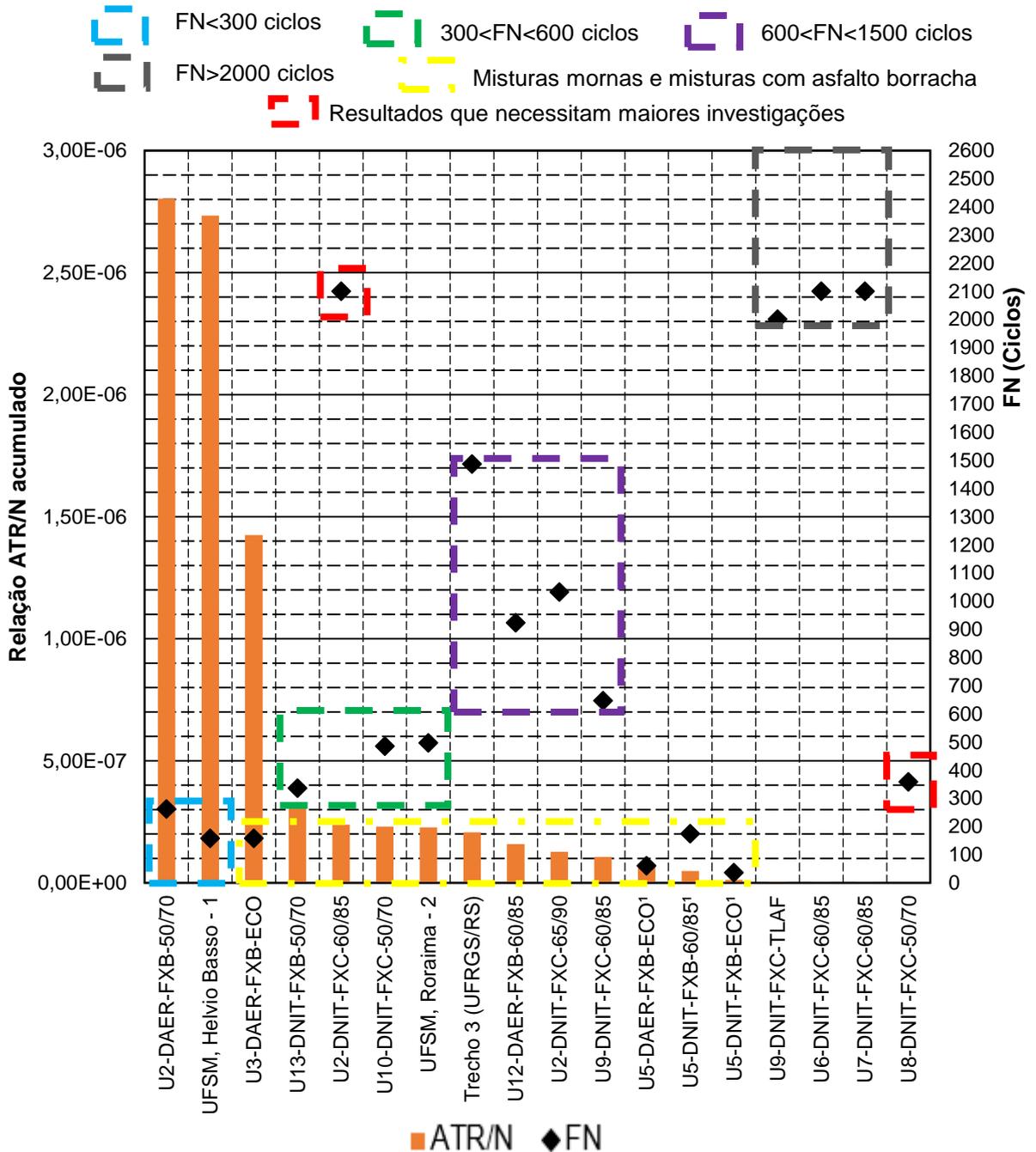
Analisando as demais misturas com CAP 50/70, percebe-se que a mistura U13-DNIT-FXB-50/70 também apresenta um aumento da ATR em função do tráfego para o segundo período, situação que deve ter contribuição da temperatura, pois o segundo semestre está compreendido em período quente. Para a mistura U10-DNIT-FXC-50/70, o primeiro período apresenta relação ATR/N com valor próximo à da U13, no entanto as leituras foram interrompidas devido a aplicação de microrevestimento do segmento monitorado, impossibilitando a continuidade da monitoração no segundo período. A mistura U8-DNIT-FXC-50/70 não apresentou ATR após praticamente 14 meses submetida ao tráfego, comportamento inesperado em comparação às demais misturas com CAP convencional.

Para as misturas, no geral, percebe-se um aumento da relação ATR/N nos primeiros períodos ou primeiro verão e, posteriormente, uma estabilização ou queda do ATR em função do tráfego. No entanto, as misturas U6-DNIT-FXC-60/85, U7-DNIT-FXC-60/85, U8-DNIT-FXC-50/70 e U9-DNIT-FXC-TLAF praticamente não apresentaram formação de ATR e não sentiram a influência da temperatura no verão.

Analisando as Figuras 96, 97, 98 e 99, é possível visualizar a influência da temperatura na evolução do ATR. As misturas U2-DNIT-FXC-60/85, U2-DNIT-FXC-65/90, U12-DAER-FXB-60/85 e U13-DNIT-FXB-50/70 apresentam aumento significativo da relação ATR/N para o segundo período de monitoramento, compreendido no verão.

Com base nos resultados de campo coletados até o momento, a fim de avaliar o seu desempenho quanto a deformação permanente, estabeleceu-se um ranking de ATR/N acumulado para todas as misturas desta pesquisa mais as três estudadas em Bastos (2016), correlacionando-os com os resultados de FN, conforme o gráfico na Figura 102. Para fins de melhorar a escala as misturas que não atingiram FN foram tratadas com FN de 2100 Ciclos.

Figura 100 - Relação ATR/N acumulado e *Flow Number*



Fonte: Do autor (2018).

Devido aos resultados contraditórios das misturas mornas da usina U5, com baixos valores de FN e baixas relações ATR/N, assim como para a mistura da usina U3, em que o ATR/N se estabiliza após o primeiro período, demonstrando o bom desempenho em campo, misturas com asfalto borracha e misturas mornas necessitam de maiores investigações quanto à utilização do parâmetro FN como critério de deformação permanente (pontilhado amarelo da Figura 100).

Para as misturas com FN de até 300 Ciclos, produzidas com CAP 50/70, destacadas no pontilhado azul da Figura 100, são identificadas as maiores taxas de ATR/N dentre as misturas estudadas. Considerando a tendência de estabilização do ATR em função do N, essas misturas, que até o momento foram submetidas à tráfegos leves, provavelmente atingiram os limites máximos de ATR se forem submetidas a tráfegos médios ou pesados. Então, infere-se que essas misturas seriam recomendadas apenas para tráfegos leves, coerente com o limite proposto por Nascimento (2008).

Paras as misturas com FN entre 300 e 600, destacadas no pontilhado verde da Figura 100, infere-se que as misturas atenderam até um número de solicitações para tráfegos médios. Para as misturas com FN entre 600 e 1500, destacadas no pontilhado lilás, pode-se inferir que apresentam tendência de resistir a tráfegos pesados. Já as misturas com FN acima de 2000 tendem a resistir tráfegos extremamente pesados (pontilhado cinza).

O concreto asfáltico U2-DNIT-FXC-60/85 apresentou uma taxa de ATR/N não coerente com as demais misturas com elevado FN, 10000 ciclos, o que pode ser explicado pela influência do verão no segundo período de monitoramento que ocasionou um aumento de ATR. No entanto, ao se analisar as demais misturas com ligante AMP-60-85, o mais provável é uma estabilização do ATR/N e consequentemente redução dessa relação. Já a mistura U8-DNIT-FXC-50/70, com FN de 359 ciclos, apresentou a menor relação ATR/N, fato que necessita maiores investigações.

A mistura do Trecho 03 (UFRGS/RS), considerando critério de ATR máximo de 5 mm, obrigação contratual para o trecho, não atenderia o mesmo, apesar de elevado valor de FN. No entanto, na pesquisa de Mattos (2014), o autor responsável pelas medidas nos trechos afirma que suspeita que a maior contribuição dos afundamentos no trecho se deve as camadas inferiores.

Diante dos resultados obtidos neste trabalho, pode-se inferir que os limites de FN propostos por Bastos et al. (2017) para tráfegos médios e pesados podem não atender os limites de ATR exigidos pelos órgãos rodoviários, principalmente para misturas com CAP 50/70. Já os limites propostos por Nascimento mostram-se coerentes com os resultados obtidos até o momento. No entanto, deve-se prosseguir o monitoramento a fim de confirmar essas inferências, além de refinar os critérios para tráfegos pesados e extremamente pesados.

Diante disso, é possível estabelecer limites com base nos resultados obtidos até o momento, conforme Tabela 33. No entanto, tais limites não devem ser considerados para misturas mornas e com asfalto borracha. A adoção de limites mais conservadores no RS faz-se necessária devido à falta de um efetivo controle de peso cargas de cargas dos veículos comerciais em um estado predominantemente agrícola, que utiliza as rodovias para escoar a maior parcela da sua produção.

Tabela 33 - Proposta de critérios de FN para diferentes níveis de tráfego

Pesquisas / Níveis de Tráfego (número N USACE)	Vv (%)	Temp. (°C)	Tensão (kPa)	Leve	Médio	Pesado	Extremamente pesado
				$3 \times 10^6$	$[3 \times 10^6;$ $1 \times 10^7]$	$[1 \times 10^7;$ $3 \times 10^7]$	$> 3 \times 10^7$
Nascimento (2008)	6,5 a 7,5	60,0	204	-	300	750	-
Bastos et al. (2017)	5,5 a 7,5	60,0	204	-	100	300	>1000
Autor	6,4 a 7,5	60,0	204	-	300	600	>2000

Nota: Limites propostos pelo Autor considerando ATR crítico de 7 mm para tráfegos leves e médios e 5 mm para tráfegos pesados e extremamente pesados.

Fonte: Do autor (2018).

Ao proceder os levantamentos de ATR nos respectivos trechos, vale destacar a importância da dosagem adequada, do controle executivo e a influência do teor de ligante no desempenho à deformação permanente, tomando como exemplo um segmento próximo ao da mistura U5-DAER-FXB-ECO, de mesmo tráfego e mesmo tipo de mistura, no entanto, com teor de ligante com aproximadamente 1% acima do teor de projeto, conforme informação da empresa executora. Para o trecho monitorado desta pesquisa (Figura 101 - esquerda), com teor de ligante dentro dos limites especificados, o ATR acumulado é de 1,69 mm, já o trecho com teor de ligante acima dos limites normativos apresenta elevados afundamentos de trilha de roda com cisalhamento da camada de concreto asfáltico, como é possível observar na Figura 101 - direita.

Figura 101 - Trecho sem ATR (esquerda) e com ATR (direita)



Fonte: Do autor (2018).

#### 4.3.1 Desempenho das misturas com asfalto borracha

Devido aos baixos valores de FN e as inferências do ensaio de Módulo Dinâmico indicarem os piores desempenhos para as misturas com asfalto borracha dentre as misturas analisadas, sendo que a bibliografia recomenda a utilização do ligante para melhorar o desempenho a deformação permanente, fato confirmados em três trechos desta pesquisa, procedeu-se uma análise mais aprofundada dessas misturas.

Com isso, em virtude da disponibilidade de agregado e ligante AB-08 da mistura U3-DAER-FXB-ECO, foram moldados corpos de prova em laboratório a fim de investigar possíveis erros de ensaio ou confirmar os resultados. Seguindo o projeto de dosagem para os percentuais de agregados e ligante, foram moldados 3 corpos de prova que ensaiados de acordo com metodologia apresentada anteriormente. Os resultados são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Valores de FN para a mistura U3-DAER-FXB-ECO - produzida em laboratório e na usina de asfalto

Mistura	Vv médio (%)	Média FN (Ciclo)	DP	CV (%)	Parâmetros Modelo Francken			
					A	B	C	D
U3-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	7,36	255	36,90	14,5	1080,08	0,52	290,41	0,0070
U3-DAER-FXB-ECO <sup>2</sup>	7,31	158	17,2	12,2	1476,22	0,53	231,02	0,0122

<sup>1</sup> Mistura produzida em laboratório

<sup>2</sup> Mistura produzida na usina

Fonte: Do autor (2018).

Percebe-se que a mistura produzida em laboratório apresenta um FN maior que a mistura produzida em usina, fato que necessita de maiores investigações.

Para as misturas U5-DNIT-FXB-ECO e U5-DAER-FXB-ECO, com baixo FN e bom desempenho em campo para um tráfego pesado, foram refeitos os ensaios de FN, sendo que os valores foram confirmados.

Também, buscou-se avaliar se o ensaio de FN confinado seria mais adequado. Foram moldados mais dois corpos de prova para cada tipo de mistura com a massa coletada de campo e, enviados para a UFC, onde o FN foi ensaiado considerando confinamento (Figura 102).

Figura 102 - Ensaio de FN com confinamento



Fonte: Do autor (2018).

Também foi enviada uma mistura com CAP 50/70 para fins de comparação dos resultados. O ensaio triaxial de varredura de tensões (*Triaxial Stress Sweep* – TSS) (CHOI, 2013) é um protocolo de ensaio sob condições de confinamento, a fim de melhor se aproximar das condições encontradas em campo. Os resultados apresentados na Tabela 35, adotando-se uma tensão de confinamento de 138 kPa, indicam que, mesmo com confinamento, os resultados de FN para as misturas com asfalto borracha apresentam valores consideravelmente mais baixos em comparação às demais deste trabalho.

Tabela 35 - Valores de FN sem e com confinamento

Mistura	Sem confinamento		Com confinamento		
	Média FN (Ciclo)	Média FN (Ciclo)	Vv médio (%)	DP	CV (%)
U4-DNIT-FXC-50/70	284	160	6,48	8,49	5,3
U3-DAER-FXB-ECO	158	108	7,33	9,90	9,2
U5-DNIT-FXB-ECO <sup>1</sup>	37	29	7,02	*	*
U5-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	61	44	6,87	0,70	1,6

\* Apenas um CP pode ser ensaiado <sup>1</sup>Mistura Morna  
 Fonte: Do autor (2018).

Também, foi disponibilizado pela concessionária o ensaio Hamburgo Test, realizado com as mesmas misturas produzidas na usina estudadas neste trabalho, porém em dias diferentes. De acordo com a AASHTO T 324, o valor máximo aceitável para a deformação de uma amostra no simulador de tráfego – método *Hamburg* – é de 10% da sua altura na condição úmida com temperatura de 50°C. Se essa deformação for superior a 10%, a amostra não atende ao padrão de qualidade necessário e não há a necessidade de continuar o ensaio e completar os 20.000 ciclos previstos.

A Tabela 36 apresenta as condições do ensaio, estabelecidas pela norma AASHTO T 324 para o ensaio Hamburgo.

Tabela 36 - Condições do ensaio *Hamburgo Test*

Temperatura °C	50
Número de Ciclos	20.000
Espessura do Corpo de prova (mm)	60
Taxa de Deformação (%)	10
Deformação máxima admissível (mm)	6

Fonte: Do autor (2018).

A Tabela 37 apresenta os resultados do ensaio para as duas misturas analisadas.

Tabela 37 - Resultados do ensaio *Hamburgo Test*

U5-DNIT-FXB-ECO		U5-DAER-FXB-ECO	
Nº de ciclos	Deformação (mm)	Nº de ciclos	Deformação (mm)
5.000	-1,53	5.000	0
10.000	-1,83	10.000	-0,89
15.000	-2,14	15.000	-1,11
20.000	-2,42	20.000	-1,22

Fonte: Do autor (2018).

Os resultados de deformação permanente apresentados na Tabela 37, diferente do parâmetro FN para essas misturas, indicam que as amostras apresentam resistência satisfatória aos efeitos em que são submetidas durante o ensaio de deformação permanente Hamburgo, com valores abaixo dos 10% (6,0 mm) de deformação aceitável. Tais resultados indicam que a mistura U5-DAER-FXB-ECO apresenta melhor resultado, o que também se percebe no FN. No entanto, para o desempenho em campo frente à deformação permanente, a mistura U5-DNIT-FXB-ECO apresenta melhores resultados que a U5-DAER-FXB-ECO.

No entanto, cabe ressaltar que as misturas U5 são misturas mornas e, conforme pesquisa de Barros (2017), ocorre uma redução do parâmetro FN para misturas mornas com asfalto borracha e cal dolomítica quando comparada à mistura convencional.

Ao se comparar os resultados de FN com outras pesquisas que utilizaram o mesmo tipo ligante, conforme Tabela 38, percebe-se, no geral, para as misturas com AB-08, baixos valores de FN.

Diante do baixo valor de FN para as misturas com asfalto borracha desta pesquisa e o bom desempenho à deformação permanente em campo, fica evidente a necessidade de um estudo mais aprofundado da utilização do parâmetro FN como critério para deformação permanente para misturas com asfalto borracha. Pode ser que, para esse tipo de ligante, devido ao aumento da flexibilidade pela maior concentração de elastômeros na borracha de pneus, ocorra a ruptura mais rápida durante o ensaio, o que não se reflete em campo.

Tabela 38 - Valores de FN para misturas com asfalto borracha na literatura

Mistura	Vv médio (%)	Média FN (Ciclo)	Tipo Ligante	Tipo de mistura	Observações
U3-DAER-FXB-ECO <sup>1</sup>	7,36	255	AB-08		Fornecedor: Greca
U3-DAER-FXB-ECO <sup>2</sup>	7,31	158	AB-08		Fornecedor: Greca
U5-DNIT-FXB-ECO	7,39	37	AB-08	Mistura Morna	Fornecedor: CBB
U5-DAER-FXB-ECO	6,69	61	AB-08	Mistura Morna	Fornecedor: CBB
Barros et al (2015)	6,96	177	AB-08	Faixa C DNIT	-
Barros (2017)	6,5	275	AB-08	<i>Gap-graded</i>	HMA 3 - AB-8 - D
Barros (2017)	6,8	94	AB-08	<i>Gap-graded</i> (Morna)	WMA 3 - AB-8 - D
Barros (2017)	7,0	437	AB-08	<i>Gap-graded</i>	HMA 4 - AB-8 - C
Barros (2017)	6,7	332	AB-08	<i>Gap-graded</i> (Morna)	WMA 4 - AB-8 - C
Bastos (2016)	-	4410	PG-82	Faixa C DNIT	TRTA-6
Bastos (2016)	-	354	EcoflexB PG-64	Faixa C DNIT	TRTA-9

<sup>1</sup> Mistura produzida em laboratório

<sup>2</sup> Mistura produzida na usina

Fonte: Do autor (2018).

## 5 CONCLUSÃO

As pesquisas para avaliar o comportamento mecânico de misturas asfálticas no estado do Rio Grande do Sul, normalmente se restringem a pesquisas laboratoriais. A presente pesquisa propôs um enfoque diferente, por meio da avaliação de diferentes misturas asfálticas efetivamente utilizadas nas rodovias estaduais, formando um banco de dados com características e propriedades mecânicas e realizando uma análise do estado da prática e do comportamento frente à deformação permanente.

A seguir apresentam-se as conclusões referentes aos objetivos esperados no presente trabalho e sugestões para futuras pesquisas. Ressalta-se que as conclusões obtidas se limitam ao universo dos materiais estudados e aos resultados do programa experimental executado e suas respectivas análises.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o delinear metodológico deste trabalho e os resultados obtidos, foi possível concluir que:

- a) Ao avaliar 24 misturas asfálticas em utilização no estado do Rio Grande do Sul, percebem-se elevadas variações das propriedades mecânicas, explicadas pela grande quantidade de variáveis envolvidas: diferentes tipos de ligantes, agregados, faixas granulométricas, dentre outras, explanadas no decorrer da dissertação.
- b) Analisando o estado da prática da produção de misturas asfálticas no estado, percebe-se que, de modo geral, os agregados e ligantes atendem as especificações de serviço vigentes, baseadas em ensaios empíricos, que não avaliam o desempenho. Também, que boa parte das dosagens ainda utilizam técnicas ultrapassadas, como a consideração da Densidade Máxima Teórica. Quanto ao teor de ligante e granulometria, pode-se observar boa parte das misturas estudadas não atende os limites normativos, no entanto, os métodos utilizados para ensaios apresentam limitações e necessitam de melhorias.
- c) Fica evidente a necessidade de evolução das normas brasileiras, buscando a seleção de agregados, ligantes e métodos de dosagem que abordem o desempenho das misturas asfálticas.

- d) Para a rigidez dos concretos asfálticos em utilização no estado, percebem-se diferenças significativas de módulos de resiliência, mostrando que os valores típicos variam entre 4738 a 11520 MPa, com média de 8260 MPa. As misturas que apresentaram os menores valores de MR são as com ligante do tipo asfalto borracha. Pode-se observar, também, um pequeno aumento da rigidez à medida que se utilizam faixas granulométricas com maior percentual de agregados graúdos e ligante AMP 60-85.
- e) Já, ao analisar a rigidez por meio do ensaio de módulo complexo, a modelagem 2S2P1D mostrou-se adequada na avaliação do comportamento reológico das misturas. Pode-se notar diferenças significativas de comportamento reológico, inclusive para misturas com mesmo tipo de ligante. Destaca-se a reologia da mistura U9-DNIT-FXC-TLAF, composta por um ligante modificado por TLA, na qual o Ângulo de Fase, ao atingir o valor máximo, não mostra a mesma tendência das demais misturas, diminuindo muito pouco nas altas temperaturas, indicando que a mesma sofre menor variação de viscosidade nas altas temperaturas. Também, destacam-se os resultados das misturas com asfalto borracha, que apresentam menor módulo dinâmico e, conseqüentemente, são menos rígidas para frequências abaixo de 0,1Hz, indicando pior desempenho frente à deformação permanente.
- f) Para os resultados de RT, pode-se observar que todas as misturas com CAP 50/70 e asfalto borracha atingiram resistência à tração acima da mínima exigida pelas especificações. As demais misturas, com ligantes modificados, apresentam RT acima do intervalo especificado na norma DNER-ES 385/99, indicada para misturas com asfalto modificado por polímero tipo SBS. Observa-se que os menores valores de RT se referem aos concretos asfálticos com asfalto borracha e os maiores às misturas com ligante AMP 60/85. As especificações de serviço vigentes possibilitam a utilização de misturas com RT na ordem de 1,17 MPa como a mistura U5-DNIT-FXB-ECO que utiliza asfalto borracha, recomendado para atenuar o problema da fadiga, assim como misturas como a U8-DNIT-FXB-50/70, com RT de 2,09 MPa e ligante convencional, sem possibilitar o entendimento de qual apresenta melhor desempenho. Fica evidente a necessidade de uma análise crítica do parâmetro RT, além da avaliação dos parâmetros adicionais obtidos do ensaio, pois alguns apresentam dados homogêneos, o que pode viabilizar sua utilização.

- g) Para os resultados de *Flow Number*, identificou-se elevada variação do parâmetro para as misturas em utilização no estado do RS, com resultados de 37 ciclos até 10000, sem atingir FN. Os resultados deste trabalho demonstram a elevada dependência do parâmetro com o tipo de ligante. No geral, as misturas com asfalto modificado apresentam maiores valores de FN, no entanto, essa regra não é válida para as misturas mornas e as com asfalto borracha, que apresentaram os menores valores dentre as pesquisadas.
- h) Em relação à avaliação do desempenho em campo frente a deformação permanente, obtiveram-se resultados relevantes no entendimento da resistência à deformação permanente dos concretos asfálticos, por meio da correlação dos resultados do ensaio *Flow Number* e medidas de ATR em campo.
- i) Com base nos 15 trechos monitorados nesta pesquisa, pode-se inferir que os limites de FN propostos por Bastos (2016) para tráfegos médios e pesados podem não atender os limites de ATR exigidos pelos órgãos rodoviários, principalmente para misturas com CAP 50/70. Já os limites propostos por Nascimento mostram-se coerentes com os resultados obtidos até o momento. Foi possível refinar os critérios com base nos trechos monitorados, no entanto, deve-se prosseguir o monitoramento a fim de confirmar as tendências.
- j) As misturas mornas e as com asfalto borracha apresentam resultados incoerentes, com baixos valores de FN e bom desempenho em campo, o que demanda uma melhor avaliação da utilização do parâmetro FN como critério para essas misturas.
- k) Quanto aos limites de ATR máximos permitidos, faz-se necessário a definição de valores que atendam o nível de conforto e segurança exigidos na atualidade. Tal critério é fundamental para definição dos limites de FN a serem propostos.
- l) Ao avaliar a correlação do parâmetro AG do método Bailey com os resultados de FN, pode-se perceber uma tendência de queda do FN à medida que o AG aumenta. No entanto, o parâmetro mostra-se com resultados incoerentes, pois, observam-se resultados de AG fora dos limites indicados com melhores resultados de FN em comparação à valores que atendem os respectivos limites. Já a porosidade FAD não indicou boa correlação com o FN.
- m) Analisando o FN com as características das misturas e os materiais de sua composição, utilizando-se regressão linear múltipla e, com base nos modelos

estatísticos obtidos, pode-se inferir que, de modo geral, a principal característica a influenciar o parâmetro FN é o tipo de ligante. Dentre as características das misturas e agregados, os principais parâmetros são o percentual de pó de pedra seguido da abrasão, não sendo obtida correlação considerável do FN com as propriedades morfológicas dos agregados.

- n) Comparando-se os resultados de FN com  $E^*/\sin \varphi$ , a melhor correlação foi encontrada para 1Hz e 54°C e, de modo geral, os maiores valores de  $E^*/\sin \varphi$  são encontrados para as misturas com asfalto modificado (AMP 60/85, AMP 65/90 e TLA Flex), indicando melhor desempenho em campo frente a deformação permanente, coerente com os valores de FN, à exceção da mistura morna U5-DNIT-FXC-60/85. Os menores valores de  $E^*/\sin \varphi$  foram encontrados para as misturas com asfalto borracha, condizentes com os menores valores de FN para as mesmas. Já para as misturas com CAP 50/70, os resultados de  $E^*/\sin \varphi$  variam de 431 a 210, não seguindo uma tendência muito clara de correlação com o parâmetro FN.
- o) O parâmetro FN não se mostrou adequado como critério de deformação permanente para misturas mornas, diante da possível redução do número de ciclos em comparação às misturas quentes, assim como para as com asfalto borracha. Para as demais misturas a quente, o parâmetro mostrou-se adequado, apresentando, de modo geral, boa correspondência com os resultados de campo obtidos.

## 5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Já se encontra em andamento no GEPPASV a continuidade dessa pesquisa, com o prosseguimento da monitoração dos trechos, o estudo do comportamento à fadiga dessas misturas e do efeito deletério da água, além da caracterização mineralógica dos agregados e reologia dos ligantes. Diante das análises realizadas ao longo da presente pesquisa e das que se encontram em andamento, sugere-se:

- a) Aumentar a quantidade de trechos monitorados e, conseqüentemente, a confiabilidade dos dados;
- b) Aprofundar o estudo do desempenho frente à deformação permanente para as misturas mornas e as com asfalto borracha, considerando o parâmetro FN;

- c) Avaliar as variações de propriedades mecânicas para ensaios realizados com misturas produzidas em laboratório e em usina de asfalto;
- d) Simular as variações de vida útil do pavimento em função dos diferentes valores de rigidez obtidos para as misturas em utilização no estado, a fim de demonstrar a importância da realização de ensaios de caracterização das propriedades mecânicas;
- e) Aumentar o banco de dados de misturas analisadas, a fim de gerar um modelo preditivo para o FN em função das características dos materiais constituintes da mistura.



## REFERÊNCIAS

AASHTO. **Bulk specific gravity of compacted asphalt mixtures using saturated surface-dry specimens**. AASHTO T 166. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2005a.

\_\_\_\_\_. **Determining dynamic modulus of hot-mix asphalt concrete mixtures**. AASHTO T 342 11. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.

\_\_\_\_\_. **Determining the dynamic modulus and flow number for hot mix asphalt (HMA) using the asphalt mixture performance tester (AMPT)**. AASHTO T 79, Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2015.

\_\_\_\_\_. **Superpave Volumetric Mix Design**. AASHTO M 323 13. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2013.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15619**: misturas asfálticas – determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

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

AL ROUSAN, T. M. **Characterization of aggregate shape properties using a computer automated system**. 2004. 229f. Tese (Doutorado em Filosofia) - Texas A&M University, College Station, TX, 2004.

ALBUQUERQUE, F. S. **Sistema de gerência de pavimentos para departamentos de estradas do nordeste brasileiro**. 2007. 128f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2007.

ALMEIDA JR., P. O. B. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem**. 2016. 221f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

ALMEIDA JR., P. O. B. et al. **Avaliação laboratorial do tipo e teor de ligante e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas**. Transportes, 2018.

AL-QADI, I. L. et al. **Testing protocols to ensure performance of high asphalt binder replacement mixes using RAP and RAS**. Report No. FHWA-ICT-15-017. Rantoul: Illinois Center for Transportation, 2015.

APEAGYEI, A. K. Flow Number predictive models from volumetric and binder properties. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 240-245, 2017.

ASPHALT INSTITUTE. **The bailey method. achieving volumetrics and HMA compactability.** Lexington, KY: Asphalt Institute/Instructor Bill Pine/Heritage Research Group, 2011.

BAHIA, H. et al. Nonlinear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 68, p. 1-34, 1999.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração.** São Paulo: Oficina de textos, 2007.

BARROS, L. M. de. **Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho pelo critério de *Flow Number* de misturas quentes e mornas.** 2017. 179f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BASTOS, G. A. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas reforçadas com geogrelhas para pavimentos flexíveis.** 2010. 247f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

BASTOS, J. B. S. **Considerações sobre a deformação permanente de pavimentos asfálticos no dimensionamento mecanístico-empírico.** 2016. 200f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2016.

BASTOS, J. B. S.; FERREIRA, J. L. S.; SOARES, J. B. Relação entre parâmetros granulométricos e características de forma na resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 45., 2016, Brasília. **Anais...** Brasília: ABPv/ABDER/DER-DF, 2016.

BASTOS, J. B. S. et al. Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo. **Revista Transportes**, v. 23, n. 3. p. 44-55, 2015.

BASTOS, J. B. S. et al. Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo. **Revista Transportes**, v. 25, n. 2, p. 29-40, 2017.

BERNUCCI, L. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** 3. ed. reimp. Rio de Janeiro: Petrobrás: ABEDA, 2010.

BLASS, L. et al. Modelagem matemática das respostas estruturais de pavimentos flexíveis considerando a variação sazonal de temperaturas máximas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 13, n. 22, p. 61-70, 2013.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales.** 2014. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

BOHN, K. A. **Utilização de material fresado em misturas asfálticas mornas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016. Em construção.

BONAQUIST, R. **Evaluation of Flow Number (FN) as a discriminating HMA mixture property**. Projeto Número 0092-09-01. Wisconsin: Wisconsin Highway Research Program, 2012.

BORGES, R. L. **Deformação permanente em misturas asfálticas a partir do Shift Model viscoplástico e ensaios triaxiais de carga repetida**. 2014. 195f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2014.

BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; VICTORINO, D. R. Indicadores do desempenho de misturas asfálticas determinados através do ensaio de compressão diametral. **Transportes (Rio de Janeiro)**, v. 16, n. 1, p. 36-44, 2008.

BRONDANI, C. **Estudo laboratorial da influência da areia natural na viscoelasticidade das misturas asfálticas**. 2016. 129f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - 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. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

BUDNY, J. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas**. 2012. 155f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2012.

CARDONA, D. A. R. et al. Viscoelastic behavior characterization of a Gap-graded asphalt mixture with SBS polymer modified bitumen. **Materials Research**, v. 18, n. 2, p. 373-381, 2015.

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

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente**. 2016. 152f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Santa Maria, RS, 2016.

CHAVES, J. M. et al. **Avaliação de métodos de dosagem de misturas asfálticas e sua relação com as propriedades mecânicas**. Florianópolis: RDT, 2014. Disponível em:

<[http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/proj\\_2\\_relafinal\\_litoral\\_sulantt\\_dosagem\\_fev14rev3.pdf](http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/proj_2_relafinal_litoral_sulantt_dosagem_fev14rev3.pdf)>. Acesso em: 19 ago. 2016.

CHOI, Y.-T. **Development of a mechanistic prediction model and test protocol for the permanent deformation of asphalt concrete**. Tese (Doutorado em Filosofia) - North Carolina State University, North Carolina, 2013. Disponível em: <<https://repository.lib.ncsu.edu/handle/1840.16/8713>>. Acesso em: 18 jun. 2017.

CHOI, Y.-T. et al. Incremental model for the prediction of permanent deformation of asphalt concrete in compression. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2296, p. 24-35, 2012.

CIBER. **Usinas de asfalto: tecnologias e processos**. 2012. Disponível em: <[https://media.wirtgen-group.com/media/06\\_sasww/\\_local\\_content/wirtgen\\_brasil/infomaterial\\_7/asphalt\\_plant\\_\\_\\_technologies/Usinas\\_de\\_Asfalto\\_PT-SP.pdf](https://media.wirtgen-group.com/media/06_sasww/_local_content/wirtgen_brasil/infomaterial_7/asphalt_plant___technologies/Usinas_de_Asfalto_PT-SP.pdf)>. Acesso em: 20 abr. 2018.

CNT. Confederação Nacional do Transporte. **Pesquisa CNT de rodovias 2017: relatório gerencial**. Brasília: CNT/SEST/SENAT, 2017.

CONTERATO, F.; MARTINS, J. N.; BOCK, A. L. Evolução da textura superficial do revestimento da BR-448/RS: análise sob o ponto de vista da segurança viária. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 44., Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: ABPv/ABDER, 2015.

CUNHA, M. B. **Avaliação do Método de Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas**. 2004. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.

CUNHA, M. C.; ZEGARRA, J. R. E.; FERNANDES JR., J. L. Revisão da seleção do grau de desempenho (PG) de ligantes asfálticos por estados do Brasil. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 21., 2007, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPET, 2007.

DAER. Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **DAER/RS - EL 102/01 - Análise granulométrica de agregados**. Porto Alegre: DAER, 2001a.

\_\_\_\_\_. **DAER/RS - EL 108/01: Determinação do índice de lamelaridade**. Porto Alegre: DAER, 2001b.

\_\_\_\_\_. **DAER/RS - EL 217/01: Ensaio Marshall para misturas betuminosas**. Porto Alegre: DAER, 2001c.

\_\_\_\_\_. **DAER/RS - ES-P 16/91: Concreto asfáltico**. Porto Alegre: DAER, 1991.

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

DI BENEDETTO, H. et al. Mechanical testing of bituminous mixtures. In: PARTL, M. N. et al. (Eds.). **Advances in interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials: State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 206-ATB Series**. Dordrecht: Springer, 2013. p. 143-256.

DNER. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER - ES 385/99:** Pavimentação – Concreto asfáltico com asfalto polímero. Rio de Janeiro: DNER, 1999.

\_\_\_\_\_. **DNER - ME 043/95:** Misturas Betuminosas a Quente – Ensaio Marshall. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

\_\_\_\_\_. **DNER - ME 053/94:** Misturas betuminosas – Porcentagem de betume – Método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER - ME 086/94:** Determinação do índice de forma. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

\_\_\_\_\_. **DNER - PRO 013/94:** Coleta de amostra de misturas betuminosas para pavimentação. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes. **DNIT 006/2003 - PRO:** Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - procedimento. Rio de Janeiro: DNIT, 2003a.

\_\_\_\_\_. **DNIT 031/2006 - ES:** Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2006a.

\_\_\_\_\_. **DNIT 135/2010 - ME:** Misturas Asfálticas – Determinação do módulo de resiliência – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2010a.

\_\_\_\_\_. **DNIT 136/2010 - ME:** Misturas Asfálticas – Determinação de resistência à tração por compressão diametral – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: DNIT, 2010b.

\_\_\_\_\_. **DNIT TER 005:** defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos - terminologia. Rio de Janeiro: DNIT, 2003b.

\_\_\_\_\_. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos.** 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006b.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **Superpave Binder Specification.** Washington: FHWA, 2002.

FERREIRA, J. L. S.; BASTOS, J. B. dos S.; SOARES, J. B. Validação da metodologia de Faixa de Agregados Dominantes para avaliação e especificação da granulometria de misturas asfálticas densas. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTE, 29., 2015, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: ANPET, 2015.

FONTES, L. P. T da L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos.** 2009. 541f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade do Minho, Braga, PT, 2009.

- FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. 2007. 315 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- GONÇALVES, B. C. S. **Avaliação dos procedimentos para determinação de teor de ligante e granulometria em concretos asfálticos de diferentes faixas granulométricas e origens mineralógicas**. 2017. 199f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017.
- GOUVEIA, L. T. **Avaliação do ensaio de angularidade do agregado fino (FAA) da especificação SUPERPAVE**. 2002. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) –Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2002.
- \_\_\_\_\_. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas**. 2006. 340f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Carlos, São Carlos, SP, 2006.
- GREENE, J.; KIM, S.; CHOUBANE, B. Accelerated pavement testing and gradation-based performance evaluation method. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Washington, n. 2225, 2011.
- HUANG, B.; SHU, X.; LI, O. Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 10, p. 2008-2013, 2005.
- KIM, R. Y. **Modeling of asphalt concrete**. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 2009.
- KIM, S. **Identification and assessment of the dominant aggregate size range (DASR) of asphalt mixture**. Tese (Doutorado em Filosofia) - University of Florida, Gainesville, FL, 2006.
- LEANDRO, R. P. **Avaliação do comportamento mecânico de corpos de prova de misturas asfálticas a quente resultantes de diferentes métodos de compactação**. 2016. 287f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2016.
- LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. 1999. 266f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1999.
- LEITE, L. F. M.; TONIAL, I. A. Qualidade dos cimentos asfálticos brasileiros segundo as especificações SHRP. In: ENCONTRO DE ASFALTO, 12., 1994, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: IBP, 1994.
- LITTLE, D. N.; EPPS, J. A.; SEBAALY, P. E. **The benefits of hydrated Lime in hot mix asphalt**. Washington: National Lime Association, 2006. 80p.

LUGO, A. E. A.; MERCADO, E. A. E.; SPINEL, S. C. Tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados. **Revista Ingeniería e Investigación**, v. 28, n. 2, p. 142-151, 2008. Disponível em:

<[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-56092008000200017&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092008000200017&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 05 out. 2016.

MAHMOUD, A. F. F.; BAHIA, H. **Using the gyratory compactor to measure mechanical stability of asphalt mixtures**. Wisconsin Highway Research Program 0092-01-02. Wisconsin: University of Wisconsin-Madison, 2004.

MANGIAFICO, S. **Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends**. 2014. 336f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - L'École Nationale des Travaux Publics de l'État, Vaulx-en-Velin, 2014.

MARCON, A. F. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema de gerência de pavimentos para a malha rodoviária estadual de Santa Catarina**. 1996. Tese (Doutorado em Infra-Estrutura Aeronáutica) - Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 1996.

MARQUES, G. L. O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica**: efeito da compactação por impacto e giratória. 2004. 490f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

MARQUES, G. L. O.; MENDES L. O. Avaliação da influência do Método Bailey no processo de dosagem e desempenho de misturas asfálticas. **Revista Transportes**, v. 20, n. 4 p. 35-43, 2012.

MATTOS, J. R. G. **Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS**: a implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul. 2014. 253f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2014.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MELO, J. V. S. de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. 2014. 414f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2014.

MENDES, L. O. **Utilização do Método Bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas**. 2011. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

MENEGAT, R. et al. **Atlas ambiental de Porto Alegre**. Porto Alegre: Ed. da UFRGS, 1998.

MENSCH, N. G. **Análise viscoelástica de misturas asfálticas quentes e mornas**. 2017. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2017.

MILANEZ, P. V. M. **Situação dos transportes de carga no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SEPLAG, 2013. Disponível em: <<http://planejamento.rs.gov.br/upload/arquivos/201512/15134118-20150928173641rs-2030-tr-3-situacao-dos-transportes-de-cargas-no-rs-03-12.pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2016.

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. 1991. 366f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

MOTTA, L. M. G. et al. **Princípio do projeto e análise SUPERPAVE de misturas asfálticas**. Tradução comentada da publicação FHWA-SA-95-003 Federal Highway Administration. Rio de Janeiro: IBP, 1996.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. 2010. 299f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2010.

MURAYA, P. M. **Permanent deformation of asphalt mixtures**. 2007. 277f. Tese (Doutorado) - Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology, Holanda, 2007.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. 2008. 204f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

OLARD, F. **Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux a bases températures: relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé**. 2003. 221f. Tese (Doutorado). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Laboratoire GéoMatériaux du Département Génie Civil et Bâtiment de Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État, 2003.

OLARD, F.; DI BENEDETTO, H. General "2S2P1D" Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. **Road Material sand Pavement Design**, v. 4, n. 2, p. 185-224, 2003.

OLIVEIRA, A. M. dos S.; DE BRITO, A. N. S.; **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

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**. 2012. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2012.

PAGLIOSA, C. **Determinação experimental de propriedades viscoelásticas de material polimérico**. 2004. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2004.

PANIZ, E. **Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil**. 2017. 155f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2017.

PAZOS, A. G. **Efeito de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. 2015. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2015.

PEREIRA, M. M. L. **Estudo de mistura asfáltica de módulo elevado para camadas de base de pavimento**. 2012. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2012.

PORCHER, C. A.; LOPES, R. C. **Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil** – Cachoeira do Sul (folha SH.22-Y-A). Porto Alegre: CPRM, 2000.

PUTMAN, B. J.; AMIRKHANDIAN, S. N. Utilization of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures. **Journal of Resources, Conservation, and Recycling**, v. 24, n. 3, p. 265-274, 2004.

ROBERTS, F. L. et al. **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction**. 2. ed. Lanham: NAPA, 1996.

ROSSATO, F. P. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas de misturas asfálticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas**. 2015. 219f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

SANTOS, J. P. L. **Análise de modelos reológicos viscoelásticos através da formulação mista em elementos finitos**. 2008. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2008.

SCHUSTER, S. L. **Estudo da influência da areia natural nas propriedades mecânicas de uma mistura asfáltica**. 2016. 90f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

SEVERO, L. E. P. et al. Utilização de perfilômetro laser para a medida de irregularidade longitudinal e do afundamento em trilhas de rosa. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 9. 2004, Natal. **Anais...** Natal: ENACOR, 2004.

SILVEIRA, M. **Desenvolvimento de modelos de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria**. 2015. 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

SOMÉ, S. C.; GAUDEFROY, V.; PAVOINE, A. Viscoelastic behavior of fluxed asphalt binders and mixes. In: CONGRÈS FRANÇAIS DE MÉCANIQUE, 22., 2015, Lyon. **Anais...** Lyon: CEREMA/L'UNAM, 2015.

SOUSA, J. B.; CRAUS, J.; MONISMITH, C. L. **Summary report on permanent deformation in asphalt concrete**. SHRP-A/IR-91-104. Washington: Strategic Highway Research Program, 1991.

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus**. 2004. 279f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.

SPECHT, L. P. et al. Application of the theory of viscoelasticity to evaluate the resilient modulus test in asphalt mixes. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 648-658, 2017.

THAO, Dinh Nguyen.; LUU, Xuan Le. Research of asphalt pavement rutting on national roads in Vietnam. In: ASIAN TRANSPORTATION RESEARCH SOCIETY, 9., 2016, Bangkok. **Anais...** Bangkok: ATRANS, 2016. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/307373551\\_RESEARCH\\_OF ASPHALT\\_PAVEMENT\\_RUTTING\\_ON\\_NATIONAL\\_ROADS\\_IN\\_VIETNAM%209th%20ATRAN S](https://www.researchgate.net/publication/307373551_RESEARCH_OF ASPHALT_PAVEMENT_RUTTING_ON_NATIONAL_ROADS_IN_VIETNAM%209th%20ATRAN S)>. Acesso em: 10 mai. 2018.

TRICHÊS, G.; FONTES, L. P. T. da L. Fadiga dos revestimentos. **Fatos & Asfaltos**, Araucária, n. 10, p. 4-5, jun. 2007.

VAVRIK, W. R.; HUBER, G.; PINE, W. J. **Bailey method for gradation selection in HMA mixture design**. Transportation Research Circular Number E-C044. Washington: Transportation Research Board, 2002.

VIERO, A. C.; SILVA, D. R. (Org.). **Geodiversidade do estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: CPRM, 2010.

WITCZAK, M. W. et al. **Simple performance test for Superpave mix design**. NCHRP Report 465. Washington: National Cooperative Highway Research Program, 2002.

WOLDEKIDAN, M. F. **Response modelling of bitumen, bituminous mastic and mortar**. 2011. 240f. Tese (Doutorado) - Faculty of Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology, Holanda, 2011.

YSHIBA, J. K. **Modelo de desempenho de pavimentos**: estudo de rodovias do estado do Paraná. 2003. 222f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

## APÊNDICE A - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO COMPLEXO

U1-DAER-FXA-50/70							
<i>Temperatura</i>	<i>Frequencia (Hz)</i>	<i>Média  E*  (MPa)</i>	<i>DP (MPa)</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Média φ (°)</i>	<i>DP (°)</i>	<i>CV (%)</i>
-10	25	30662	1006	3,28	2,41	0,63	26,17
-10	20	30271	793	2,62	2,67	0,11	3,98
-10	10	29560	759	2,57	3,06	0,13	4,16
-10	5	28847	742	2,57	3,44	0,13	3,91
-10	2	27776	699	2,52	4,01	0,15	3,71
-10	1	26892	651	2,42	4,44	0,10	2,23
-10	0,5	25938	610	2,35	4,93	0,15	3,02
-10	0,2	24509	421	1,72	5,60	0,19	3,41
-10	0,1	23489	261	1,11	6,10	0,17	2,78
-10	0,01	20579	296	1,44	7,79	0,46	5,90
4	25	23765	349	1,47	6,41	0,44	6,84
4	20	23369	461	1,97	6,64	0,54	8,09
4	10	22161	612	2,76	7,38	0,69	9,39
4	5	20865	740	3,55	8,16	0,75	9,19
4	2	19093	878	4,60	9,33	0,83	8,94
4	1	17685	959	5,42	10,28	0,92	8,94
4	0,5	16257	1009	6,21	11,31	1,06	9,38
4	0,2	14389	1063	7,39	12,83	1,15	8,93
4	0,1	13078	996	7,62	13,97	1,22	8,71
4	0,01	9237	393	4,26	18,91	1,20	6,32
21	25	14002	438	3,13	13,94	0,80	5,73
21	20	13443	365	2,71	14,56	0,59	4,08
21	10	11972	306	2,56	16,00	0,81	5,08
21	5	10560	276	2,62	17,64	0,92	5,21
21	2	8777	247	2,81	19,91	0,91	4,55
21	1	7542	203	2,69	21,81	0,78	3,57
21	0,5	6394	192	3,01	23,86	0,71	2,99
21	0,2	5028	172	3,42	26,69	0,58	2,17
21	0,1	4095	156	3,80	28,74	0,25	0,89
21	0,01	1725	37	2,13	33,76	1,24	3,69
37	25	4003	202	5,05	32,56	0,31	0,96
37	20	3727	199	5,33	32,37	0,40	1,22
37	10	2870	209	7,27	34,15	0,39	1,14
37	5	2134	197	9,25	35,68	0,27	0,75
37	2	1394	158	11,36	37,16	0,07	0,19
37	1	988	144	14,57	37,93	0,47	1,23
37	0,5	717	89	12,37	37,31	0,06	0,15
37	0,2	471	49	10,33	36,09	0,50	1,39
37	0,1	343	27	7,79	34,72	1,09	3,14
37	0,01	150	3	1,88	29,66	0,21	0,72
54	25	849	27	3,21	39,72	1,36	3,42
54	20	789	55	6,97	38,08	0,43	1,13
54	10	571	42	7,43	36,20	0,18	0,49
54	5	405	23	5,71	35,01	0,05	0,14
54	2	257	14	5,37	33,85	0,27	0,79
54	1	181	3	1,52	33,07	3,49	10,54
54	0,5	151	5	3,22	29,70	4,94	16,62
54	0,2	120	3	2,13	25,99	6,10	23,45
54	0,1	102	3	2,71	22,73	5,93	26,07
54	0,01	65	6	8,87	16,18	0,01	0,09

U2-DNIT-FXC-65/90							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	28921	1498	5,18	2,90	0,24	8,29
-10	20	29382	797	2,71	3,01	0,28	9,40
-10	10	28724	608	2,12	3,62	0,04	1,17
-10	5	27890	583	2,09	4,03	0,09	2,28
-10	2	26661	550	2,06	4,65	0,11	2,43
-10	1	25695	517	2,01	5,14	0,08	1,65
-10	0,5	24636	465	1,89	5,71	0,10	1,73
-10	0,2	23162	402	1,74	6,46	0,14	2,19
-10	0,1	22088	386	1,75	7,03	0,12	1,71
-10	0,01	19100	573	3,00	8,87	0,22	2,47
4	25	22625	161	0,71	6,90	0,25	3,69
4	20	22070	419	1,90	7,28	0,61	8,35
4	10	20990	702	3,35	8,55	0,16	1,82
4	5	19593	634	3,24	9,45	0,24	2,54
4	2	17694	536	3,03	10,85	0,30	2,74
4	1	16222	451	2,78	11,92	0,33	2,73
4	0,5	14767	380	2,58	13,20	0,30	2,25
4	0,2	12887	214	1,66	14,94	0,41	2,75
4	0,1	11573	132	1,14	16,35	0,40	2,42
4	0,01	7648	380	4,97	20,88	0,88	4,20
21	25	13332	393	2,95	15,75	1,10	6,96
21	20	12858	307	2,39	16,24	0,93	5,71
21	10	11353	313	2,75	17,92	0,86	4,81
21	5	9908	305	3,08	19,71	0,80	4,05
21	2	8097	320	3,96	22,28	0,84	3,78
21	1	6842	282	4,12	24,28	0,78	3,20
21	0,5	5678	267	4,71	26,26	0,61	2,32
21	0,2	4310	228	5,30	28,89	0,39	1,35
21	0,1	3390	192	5,65	30,63	0,13	0,44
21	0,01	1295	84	6,50	33,63	1,17	3,49
37	25	5226	0	0,00	30,28	0,00	0,00
37	20	4912	0	0,00	30,47	0,00	0,00
37	10	3844	0	0,00	32,51	0,00	0,00
37	5	2934	0	0,00	34,05	0,00	0,00
37	2	1994	0	0,00	35,33	0,00	0,00
37	1	1453	0	0,00	35,80	0,00	0,00
37	0,5	1097	0	0,00	35,40	0,00	0,00
37	0,2	758	0	0,00	34,02	0,00	0,00
37	0,1	576	0	0,00	32,00	0,00	0,00
37	0,01	268	0	0,00	26,98	0,00	0,00
54	25	1080	81	7,46	34,95	1,39	3,97
54	20	985	91	9,23	34,34	1,43	4,16
54	10	744	84	11,27	32,48	2,21	6,79
54	5	554	72	13,06	30,79	3,15	10,22
54	2	376	56	14,99	28,28	5,42	19,15
54	1	298	39	13,13	25,15	6,82	27,14
54	0,5	252	39	15,49	22,54	7,57	33,61
54	0,2	202	34	17,00	18,68	9,90	53,00
54	0,1	171	33	19,55	15,07	12,11	80,40
54	0,01	99	23	23,21	18,68	0,00	0,00

U2-DNIT-FXC-60/85							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	29445	899	3,05	2,74	0,18	6,71
-10	20	29142	769	2,64	2,88	0,11	3,69
-10	10	28514	737	2,58	3,20	0,23	7,30
-10	5	27788	730	2,63	3,57	0,25	6,94
-10	2	26722	692	2,59	4,09	0,27	6,57
-10	1	25839	685	2,65	4,56	0,30	6,68
-10	0,5	24910	699	2,80	5,00	0,33	6,51
-10	0,2	23607	750	3,18	5,61	0,40	7,06
-10	0,1	22646	798	3,53	6,05	0,40	6,67
-10	0,01	19805	544	2,75	7,75	0,12	1,55
4	25	23333	621	2,66	6,28	0,03	0,45
4	20	22948	501	2,18	6,51	0,04	0,54
4	10	21769	445	2,05	7,18	0,06	0,79
4	5	20519	382	1,86	8,00	0,13	1,68
4	2	18775	325	1,73	9,08	0,16	1,79
4	1	17396	212	1,22	9,97	0,14	1,42
4	0,5	16047	120	0,75	10,90	0,16	1,43
4	0,2	14284	52	0,37	12,33	0,16	1,32
4	0,1	12999	15	0,11	13,39	0,08	0,63
4	0,01	9030	197	2,18	17,64	0,09	0,52
21	25	14305	1010	7,06	13,29	1,45	10,91
21	20	13826	1091	7,89	13,98	1,52	10,88
21	10	12370	1067	8,63	15,41	1,40	9,09
21	5	10926	1069	9,79	16,93	1,74	10,27
21	2	9142	996	10,90	19,19	2,16	11,24
21	1	7896	948	12,00	21,17	2,25	10,62
21	0,5	6721	875	13,02	23,30	2,25	9,65
21	0,2	5311	783	14,75	26,27	2,16	8,21
21	0,1	4313	716	16,61	28,35	2,19	7,73
21	0,01	1851	452	24,42	31,59	0,00	0,00
37	25	3099	525	16,93	33,03	1,52	4,60
37	20	2875	465	16,16	33,03	1,56	4,71
37	10	2191	339	15,46	34,54	2,12	6,14
37	5	1627	265	16,30	35,95	2,85	7,93
37	2	1082	210	19,42	37,33	3,54	9,47
37	1	793	199	25,15	37,52	3,62	9,65
37	0,5	611	170	27,76	36,05	3,51	9,75
37	0,2	447	133	29,73	33,59	2,54	7,56
37	0,1	353	129	36,51	31,78	0,61	1,91
37	0,01	197	115	58,55	26,58	2,11	7,93
54	25	1145	165	14,45	38,19	1,23	3,22
54	20	1040	139	13,33	37,60	0,76	2,01
54	10	770	104	13,54	36,62	0,43	1,18
54	5	564	83	14,64	35,93	0,30	0,85
54	2	384	56	14,54	34,99	0,14	0,40
54	1	308	46	14,98	32,17	0,13	0,40
54	0,5	254	39	15,31	29,37	0,25	0,84
54	0,2	200	29	14,55	26,16	0,26	1,00
54	0,1	166	23	13,82	24,46	0,79	3,24
54	0,01	104	6	5,66	14,75	5,12	34,71

U2-DAER-FXB-50/70							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	30441	2067	6,79	2,93	0,32	10,88
-10	20	30318	1667	5,50	2,97	0,33	10,95
-10	10	29722	1721	5,79	3,16	0,52	16,36
-10	5	29024	1773	6,11	3,54	0,63	17,80
-10	2	27985	1822	6,51	4,05	0,66	16,26
-10	1	27120	1826	6,73	4,49	0,73	16,24
-10	0,5	26214	1865	7,12	4,93	0,75	15,20
-10	0,2	24939	1899	7,61	5,60	0,84	15,04
-10	0,1	23971	1845	7,70	6,05	0,91	14,96
-10	0,01	21120	1086	5,14	7,70	0,86	11,20
4	25	25459	274	1,08	5,37	1,29	23,97
4	20	25139	342	1,36	5,90	0,88	14,86
4	10	23966	471	1,97	6,45	1,17	18,10
4	5	22658	474	2,09	7,16	1,27	17,69
4	2	20865	482	2,31	8,20	1,34	16,38
4	1	19434	494	2,54	8,97	1,63	18,13
4	0,5	17953	477	2,65	9,84	1,90	19,34
4	0,2	16008	495	3,09	11,35	1,86	16,39
4	0,1	14633	474	3,24	12,39	2,07	16,73
4	0,01	10219	91	0,89	14,92	4,74	31,81
21	25	15101	236	1,56	13,56	0,60	4,43
21	20	14539	359	2,47	14,18	0,60	4,24
21	10	12958	351	2,71	15,68	0,35	2,21
21	5	11418	373	3,27	17,30	0,42	2,41
21	2	9514	362	3,81	19,73	0,53	2,69
21	1	8168	347	4,25	21,70	0,62	2,84
21	0,5	6928	327	4,73	23,70	0,68	2,86
21	0,2	5432	310	5,72	26,66	0,84	3,16
21	0,1	4394	291	6,61	28,81	1,05	3,66
21	0,01	1788	203	11,35	35,70	2,31	6,48
37	25	6417	52	0,80	28,13	0,49	1,76
37	20	6128	65	1,06	27,87	0,23	0,84
37	10	4978	74	1,49	30,11	0,13	0,45
37	5	3888	86	2,22	32,56	0,32	0,98
37	2	2675	88	3,30	36,15	0,55	1,53
37	1	1930	54	2,82	38,92	1,16	2,98
37	0,5	1373	16	1,18	40,64	2,57	6,33
37	0,2	875	12	1,35	42,47	4,23	9,96
37	0,1	616	8	1,38	43,14	5,56	12,88
37	0,01	216	3	1,24	34,18	4,41	12,91
54	25	465	54	11,56	38,01	4,19	11,03
54	20	939	72	7,62	37,44	3,19	8,52
54	10	650	40	6,08	36,56	3,31	9,05
54	5	437	31	7,07	35,39	2,56	7,23
54	2	269	22	8,26	33,78	4,08	12,08
54	1	190	29	15,27	31,98	1,80	5,64
54	0,5	147	25	17,18	28,70	1,42	4,95
54	0,2	116	16	13,69	24,60	0,93	3,77
54	0,1	111	31	28,28	18,33	4,60	25,12
54	0,01	69	14	20,58	16,29	0,00	0,00

U3-DAER-FXB-ECO							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	20267	141	0,69	4,19	0,20	4,73
-10	20	20178	42	0,21	4,21	0,31	7,39
-10	10	19503	86	0,44	4,73	0,36	7,63
-10	5	18754	110	0,58	5,22	0,29	5,56
-10	2	17704	129	0,73	5,93	0,38	6,44
-10	1	16871	89	0,53	6,47	0,47	7,21
-10	0,5	15962	40	0,25	7,16	0,47	6,62
-10	0,2	14736	59	0,40	8,18	0,44	5,36
-10	0,1	13879	94	0,68	8,96	0,45	4,97
-10	0,01	11546	185	1,60	11,38	0,57	4,97
4	25	14572	167	1,15	8,46	0,00	0,00
4	20	14292	10	0,07	8,72	0,00	0,00
4	10	13293	145	1,09	9,84	0,00	0,00
4	5	12256	286	2,33	10,99	0,00	0,00
4	2	10822	412	3,80	12,65	0,00	0,00
4	1	9734	461	4,74	14,07	0,00	0,00
4	0,5	8678	509	5,87	15,71	0,00	0,00
4	0,2	7348	472	6,42	18,13	0,00	0,00
4	0,1	6451	428	6,63	19,87	0,00	0,00
4	0,01	3881	29	0,75	26,96	0,00	0,00
21	25	7422	1264	17,03	21,24	3,83	18,01
21	20	7081	1197	16,91	22,90	5,30	23,13
21	10	6019	1126	18,70	24,07	3,93	16,33
21	5	5015	1060	21,14	26,26	3,89	14,81
21	2	3813	948	24,87	29,24	3,75	12,82
21	1	3023	837	27,69	31,28	3,46	11,08
21	0,5	2354	716	30,40	33,03	3,13	9,46
21	0,2	1636	545	33,33	34,91	2,53	7,25
21	0,1	1216	405	33,31	35,76	1,92	5,36
21	0,01	447	113	25,28	34,63	0,54	1,57
37	25	1677	0	0,00	36,73	0,00	0,00
37	20	1484	0	0,00	38,09	0,00	0,00
37	10	1061	0	0,00	39,55	0,00	0,00
37	5	759	0	0,00	40,82	0,00	0,00
37	2	489	0	0,00	42,32	0,00	0,00
37	1	331	0	0,00	42,87	0,00	0,00
37	0,5	243	0	0,00	42,87	0,00	0,00
37	0,2	164	0	0,00	39,51	0,00	0,00
37	0,1	121	0	0,00	41,27	0,00	0,00
37	0,01	26	0	0,00	30,21	0,00	0,00
54	25	427	80	18,83	41,28	2,29	5,55
54	20	377	93	24,80	41,04	0,16	0,38
54	10	267	64	24,11	39,00	0,42	1,07
54	5	186	44	23,51	37,74	0,29	0,77
54	2	112	22	19,54	36,31	0,69	1,89
54	1	86	14	15,91	33,40	1,39	4,17
54	0,5	69	10	14,40	30,67	0,81	2,63
54	0,2	53	5	10,19	27,79	1,07	3,84
54	0,1	44	1	3,24	25,21	1,97	7,80
54	0,01	29	4	14,21	22,28	2,42	10,85

U4-DNIT-FXC-50/70							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	27834	878	3,15	2,49	0,12	4,84
-10	20	28008	1051	3,75	2,55	0,14	5,55
-10	10	27515	950	3,45	2,91	0,18	6,09
-10	5	26900	941	3,50	3,30	0,21	6,22
-10	2	25985	925	3,56	3,83	0,18	4,62
-10	1	25243	937	3,71	4,27	0,16	3,81
-10	0,5	24416	929	3,81	4,75	0,16	3,43
-10	0,2	23242	863	3,71	5,43	0,18	3,26
-10	0,1	22306	842	3,78	5,92	0,17	2,87
-10	0,01	19718	378	1,91	7,69	0,06	0,83
4	25	24076	2466	10,24	5,40	0,93	17,17
4	20	23684	2310	9,75	5,76	0,64	11,18
4	10	22624	2265	10,01	6,40	0,76	11,93
4	5	21488	2181	10,15	7,16	0,84	11,76
4	2	19905	2121	10,66	8,21	0,95	11,63
4	1	18665	2046	10,96	9,10	0,96	10,57
4	0,5	17369	2003	11,53	10,10	1,07	10,64
4	0,2	15637	1875	11,99	11,62	1,14	9,80
4	0,1	14342	1676	11,68	12,81	1,10	8,56
4	0,01	9971	1012	10,15	18,21	0,97	5,32
21	25	13418	762	5,68	14,90	0,69	4,65
21	20	12970	620	4,78	15,69	0,54	3,47
21	10	11480	544	4,74	17,67	0,58	3,28
21	5	10002	474	4,74	19,68	0,72	3,66
21	2	8181	411	5,02	22,60	0,74	3,29
21	1	6883	397	5,77	24,91	0,78	3,12
21	0,5	5715	375	6,56	27,16	0,76	2,81
21	0,2	4351	322	7,41	30,16	0,67	2,23
21	0,1	3418	266	7,78	32,07	0,59	1,83
21	0,01	1347	98	7,24	36,17	0,36	1,00
37	25	5542	351	6,34	32,03	3,56	11,13
37	20	5200	371	7,13	32,40	3,55	10,96
37	10	4079	352	8,63	35,29	3,92	11,10
37	5	3089	308	9,96	38,16	4,12	10,80
37	2	2054	238	11,60	41,29	3,85	9,33
37	1	1462	199	13,60	42,88	3,17	7,39
37	0,5	1036	155	14,92	43,58	2,52	5,78
37	0,2	661	107	16,22	43,25	1,80	4,17
37	0,1	469	80	16,99	42,24	1,58	3,75
37	0,01	168	18	10,72	35,13	1,92	5,46
54	25	692	42	6,04	45,29	0,93	2,05
54	20	615	40	6,45	43,75	1,53	3,49
54	10	412	27	6,47	42,55	1,93	4,54
54	5	273	18	6,46	42,04	1,80	4,29
54	2	164	9	5,70	39,59	2,50	6,31
54	1	124	8	6,12	35,96	2,17	6,04
54	0,5	97	5	4,89	31,90	1,92	6,03
54	0,2	73	1	1,25	27,35	2,00	7,32
54	0,1	76	22	29,21	16,05	12,29	76,57
54	0,01	52	13	25,77	16,78	1,33	7,92

U4-DNIT-FXB-50/70							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média $E^*$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\varphi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	29038	2092	7,20	2,12	0,13	6,35
-10	20	28899	1965	6,80	2,34	0,10	4,23
-10	10	28414	1979	6,97	2,60	0,08	3,26
-10	5	27856	1964	7,05	2,95	0,08	2,88
-10	2	27027	1911	7,07	3,38	0,10	2,93
-10	1	26349	1857	7,05	3,77	0,08	2,25
-10	0,5	25558	1860	7,28	4,17	0,13	3,05
-10	0,2	24434	1962	8,03	4,73	0,17	3,59
-10	0,1	23538	1826	7,76	5,24	0,21	3,92
-10	0,01	21276	1807	8,49	7,10	0,52	7,28
4	25	24176	101	0,42	5,27	0,52	9,80
4	20	23794	98	0,41	5,60	0,58	10,35
4	10	22779	59	0,26	6,29	0,69	11,02
4	5	21677	4	0,02	7,03	0,73	10,37
4	2	20131	114	0,57	8,09	0,85	10,49
4	1	18899	216	1,14	9,02	0,98	10,90
4	0,5	17611	313	1,78	9,98	1,07	10,77
4	0,2	15922	407	2,56	11,46	1,22	10,68
4	0,1	14746	466	3,16	12,58	1,27	10,12
4	0,01	10423	106	1,02	17,86	1,38	7,72
21	25	13750	793	5,77	15,24	0,36	2,37
21	20	13362	657	4,92	15,94	0,40	2,53
21	10	11835	538	4,55	17,84	0,30	1,66
21	5	10379	402	3,87	19,85	0,39	1,96
21	2	8504	275	3,23	22,59	0,48	2,13
21	1	7179	172	2,39	24,64	0,52	2,12
21	0,5	5949	88	1,47	26,70	0,69	2,57
21	0,2	4447	25	0,56	29,32	0,81	2,77
21	0,1	3424	4	0,10	31,02	0,93	2,99
21	0,01	1172	30	2,60	33,64	2,04	6,08
37	25	4239	161	3,79	34,66	0,33	0,96
37	20	3873	121	3,12	34,69	0,19	0,55
37	10	2886	111	3,85	36,57	0,11	0,29
37	5	2079	88	4,25	38,01	0,13	0,33
37	2	1317	58	4,40	38,94	0,16	0,42
37	1	925	41	4,44	38,75	0,25	0,64
37	0,5	672	32	4,71	37,54	0,13	0,34
37	0,2	448	23	5,21	35,28	0,11	0,32
37	0,1	331	17	5,10	33,12	0,33	0,98
37	0,01	169	3	1,96	28,34	4,95	17,47
54	25	812	0	0,00	39,18	0,00	0,00
54	20	706	0	0,00	39,65	0,00	0,00
54	10	497	0	0,00	37,68	0,00	0,00
54	5	351	0	0,00	36,02	0,00	0,00
54	2	228	0	0,00	34,12	0,00	0,00
54	1	172	0	0,00	29,04	0,00	0,00
54	0,5	137	0	0,00	22,61	0,00	0,00
54	0,2	101	0	0,00	17,50	0,00	0,00
54	0,1	69	0	0,00	25,89	0,00	0,00
54	0,01	-	-	-	-	-	-

U5-DAER-FXB-ECO							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	24055	1170	4,87	3,59	1,17	32,70
-10	20	23911	1125	4,71	3,74	1,00	26,85
-10	10	23252	873	3,75	4,16	1,05	25,36
-10	5	22496	639	2,84	4,68	1,05	22,36
-10	2	21391	392	1,83	5,37	1,12	20,81
-10	1	20491	257	1,25	5,98	1,15	19,29
-10	0,5	19559	105	0,54	6,51	1,28	19,68
-10	0,2	18313	9	0,05	7,29	1,41	19,32
-10	0,1	17475	13	0,07	7,81	1,46	18,65
-10	0,01	15242	83	0,54	10,64	0,11	1,00
4	25	17630	1304	7,40	8,01	0,42	5,21
4	20	17283	1190	6,89	8,32	0,44	5,27
4	10	16175	1001	6,19	9,14	0,42	4,64
4	5	14989	783	5,23	10,06	0,45	4,50
4	2	13394	518	3,87	11,43	0,54	4,77
4	1	12194	330	2,70	12,56	0,67	5,35
4	0,5	11023	181	1,64	13,78	0,69	4,98
4	0,2	9526	1	0,01	15,55	0,88	5,69
4	0,1	8561	59	0,69	16,73	0,94	5,62
4	0,01	5368	352	6,56	21,95	0,47	2,16
21	25	8450	967	11,44	18,86	1,31	6,94
21	20	8084	904	11,19	19,36	1,22	6,32
21	10	6951	779	11,21	21,14	1,24	5,89
21	5	5893	687	11,66	22,91	1,19	5,19
21	2	4652	553	11,89	25,28	0,95	3,75
21	1	3816	465	12,19	27,05	0,66	2,46
21	0,5	3097	389	12,56	28,65	0,12	0,42
21	0,2	2274	310	13,65	30,72	0,54	1,77
21	0,1	1745	253	14,51	32,02	1,12	3,49
21	0,01	639	117	18,30	37,35	0,74	1,99
37	25	1873	245	13,06	36,84	1,97	5,36
37	20	1691	241	14,26	37,34	1,34	3,58
37	10	1239	173	13,99	38,06	1,72	4,52
37	5	885	121	13,66	38,42	1,88	4,90
37	2	556	77	13,80	39,72	2,83	7,12
37	1	389	42	10,77	38,26	1,80	4,69
37	0,5	286	35	12,37	36,69	1,42	3,87
37	0,2	189	24	12,70	33,63	0,52	1,54
37	0,1	139	20	14,52	30,36	3,71	12,23
37	0,01	129	66	51,39	34,76	3,90	11,21
54	25	466	36	7,79	37,23	2,02	5,41
54	20	368	19	5,15	40,23	2,86	7,10
54	10	271	6	2,35	37,44	3,46	9,25
54	5	194	2	0,88	35,73	3,52	9,86
54	2	120	2	1,47	34,47	2,48	7,21
54	1	96	4	3,68	31,38	2,45	7,82
54	0,5	80	0	0,35	29,27	1,39	4,76
54	0,2	62	1	1,72	26,26	1,59	6,06
54	0,1	51	3	6,23	24,57	2,22	9,04
54	0,01	55	29	52,84	26,78	8,53	31,88

U5-DNIT-FXB-ECO							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média $E^*$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\varphi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	23467	116	0,49	3,83	0,00	0,00
-10	20	23286	185	0,79	4,01	0,01	0,35
-10	10	22570	187	0,83	4,44	0,02	0,48
-10	5	21772	168	0,77	4,95	0,04	0,71
-10	2	20658	148	0,72	5,57	0,01	0,13
-10	1	19740	129	0,66	6,13	0,02	0,35
-10	0,5	18798	112	0,60	6,64	0,06	0,85
-10	0,2	17467	84	0,48	7,53	0,01	0,09
-10	0,1	16502	43	0,26	8,14	0,05	0,61
-10	0,01	14034	308	2,19	9,72	0,10	1,02
4	25	18084	1056	5,84	7,41	0,47	6,30
4	20	17732	1035	5,84	7,86	0,45	5,67
4	10	16640	1003	6,03	8,46	0,26	3,09
4	5	15512	965	6,22	9,39	0,33	3,54
4	2	14005	955	6,82	10,65	0,40	3,72
4	1	12848	976	7,60	11,74	0,49	4,22
4	0,5	11699	979	8,37	12,93	0,63	4,87
4	0,2	10203	1006	9,86	14,63	0,88	6,04
4	0,1	9114	915	10,04	15,91	0,78	4,93
4	0,01	5904	739	12,52	20,99	0,89	4,24
21	25	9151	271	2,96	17,43	0,27	1,54
21	20	8795	305	3,47	17,93	0,04	0,24
21	10	7658	301	3,92	19,81	0,01	0,04
21	5	6586	291	4,42	21,56	0,14	0,66
21	2	5307	271	5,10	23,99	0,35	1,44
21	1	4429	250	5,64	25,79	0,59	2,28
21	0,5	3654	221	6,04	27,56	0,76	2,77
21	0,2	2753	188	6,83	29,83	0,98	3,27
21	0,1	2150	161	7,47	31,24	1,11	3,55
21	0,01	818	87	10,62	34,89	2,09	5,98
37	25	2372	54	2,27	35,56	1,49	4,20
37	20	2181	51	2,33	35,78	1,37	3,83
37	10	1616	78	4,81	36,98	1,94	5,26
37	5	1212	26	2,16	37,51	1,73	4,60
37	2	784	26	3,33	38,38	2,24	5,84
37	1	568	30	5,32	37,52	2,02	5,37
37	0,5	411	30	7,19	36,14	1,50	4,15
37	0,2	270	27	10,00	33,90	0,71	2,09
37	0,1	197	22	11,26	32,25	0,19	0,59
37	0,01	92	8	8,28	24,05	0,87	3,62
54	25	576	0	0,00	38,64	0,00	0,00
54	20	501	0	0,00	38,66	0,00	0,00
54	10	356	0	0,00	36,92	0,00	0,00
54	5	248	0	0,00	35,46	0,00	0,00
54	2	153	0	0,00	33,85	0,00	0,00
54	1	119	0	0,00	29,93	0,00	0,00
54	0,5	96	0	0,00	27,44	0,00	0,00
54	0,2	74	0	0,00	27,75	0,00	0,00
54	0,1	53	0	0,00	24,09	0,00	0,00
54	0,01	-	-	-	-	-	-

U5-DNIT-FXB-60/85							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	28919	512	1,77	2,42	0,45	18,70
-10	20	31467	89	0,28	2,74	0,16	5,95
-10	10	30935	71	0,23	3,06	0,16	5,32
-10	5	30329	70	0,23	3,44	0,15	4,32
-10	2	29508	52	0,18	3,98	0,21	5,33
-10	1	28789	6	0,02	4,47	0,17	3,80
-10	0,5	28050	69	0,24	4,98	0,22	4,41
-10	0,2	26956	47	0,17	5,66	0,16	2,75
-10	0,1	26076	41	0,16	6,26	0,18	2,83
-10	0,01	22982	97	0,42	8,03	0,21	2,64
4	25	23287	45	0,19	6,55	0,28	4,32
4	20	22882	22	0,10	7,01	0,21	3,03
4	10	21620	113	0,52	7,77	0,10	1,27
4	5	20293	237	1,17	8,71	0,28	3,17
4	2	18477	355	1,92	10,05	0,33	3,31
4	1	17103	438	2,56	11,15	0,41	3,68
4	0,5	15670	506	3,23	12,39	0,40	3,25
4	0,2	13826	590	4,27	13,93	0,20	1,42
4	0,1	12582	586	4,66	15,17	0,05	0,33
4	0,01	8742	589	6,74	20,47	0,47	2,31
21	25	13564	180	1,33	14,75	0,06	0,43
21	20	13044	61	0,47	15,41	0,06	0,37
21	10	11454	9	0,08	17,08	0,00	0,00
21	5	9947	56	0,56	18,95	0,06	0,34
21	2	8038	93	1,15	21,58	0,13	0,59
21	1	6722	115	1,70	23,64	0,22	0,93
21	0,5	5518	127	2,29	25,65	0,32	1,24
21	0,2	4100	129	3,16	28,43	0,47	1,64
21	0,1	3167	134	4,24	30,29	0,69	2,29
21	0,01	1131	54	4,82	34,95	0,49	1,42
37	25	4171	808	19,38	33,88	1,61	4,74
37	20	3796	800	21,09	33,61	1,50	4,46
37	10	2806	668	23,79	35,05	1,77	5,04
37	5	2017	521	25,84	36,51	1,77	4,86
37	2	1285	354	27,52	37,62	2,09	5,56
37	1	915	270	29,55	38,37	1,40	3,65
37	0,5	683	201	29,35	36,60	2,82	7,71
37	0,2	474	120	25,26	34,38	3,41	9,91
37	0,1	364	83	22,91	31,90	4,33	13,59
37	0,01	196	9	4,80	29,52	1,63	5,51
54	25	1106	67	6,09	38,59	1,40	3,63
54	20	987	53	5,35	37,57	0,94	2,50
54	10	700	36	5,16	35,45	1,15	3,23
54	5	498	23	4,63	33,56	1,17	3,50
54	2	332	13	3,92	31,27	0,95	3,03
54	1	263	16	6,10	27,70	0,87	3,14
54	0,5	217	13	5,87	29,94	5,81	19,41
54	0,2	172	9	4,97	21,92	1,66	7,58
54	0,1	148	9	5,98	19,32	0,95	4,90
54	0,01	98	16	16,38	20,81	9,15	43,97

U6-DNIT-FXC-60/85							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\varphi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	23129	1710	7,39	1,87	0,19	10,24
-10	20	23103	1679	7,27	2,13	0,03	1,33
-10	10	22778	1838	8,07	2,46	0,16	6,62
-10	5	22357	1890	8,45	2,79	0,22	7,87
-10	2	21745	1946	8,95	3,20	0,25	7,75
-10	1	21219	1963	9,25	3,56	0,30	8,34
-10	0,5	20636	1956	9,48	3,92	0,32	8,13
-10	0,2	19810	1962	9,91	4,40	0,37	8,36
-10	0,1	19186	2019	10,52	4,78	0,45	9,47
-10	0,01	17516	2104	12,01	6,35	1,28	20,17
4	25	19106	465	2,44	5,12	0,42	8,16
4	20	18960	354	1,87	5,61	0,06	1,14
4	10	18252	182	1,00	5,82	0,53	9,12
4	5	17485	40	0,23	6,20	0,76	12,21
4	2	16408	148	0,91	6,96	0,83	11,99
4	1	15557	291	1,87	7,56	0,96	12,72
4	0,5	14655	437	2,98	8,26	1,03	12,42
4	0,2	13470	552	4,10	9,17	1,25	13,66
4	0,1	12612	592	4,69	10,08	1,18	11,72
4	0,01	9655	723	7,48	13,29	1,42	10,70
21	25	12297	176	1,43	11,82	1,09	9,21
21	20	11968	241	2,01	12,19	1,11	9,11
21	10	10869	366	3,37	13,57	1,24	9,17
21	5	9747	466	4,78	14,99	1,41	9,43
21	2	8314	506	6,08	17,04	1,68	9,84
21	1	7256	539	7,43	18,69	1,85	9,91
21	0,5	6269	546	8,71	20,31	1,97	9,68
21	0,2	5041	532	10,56	22,45	2,12	9,45
21	0,1	4183	487	11,65	24,00	2,13	8,87
21	0,01	1971	310	15,71	28,14	2,45	8,72
37	25	3747	85	2,26	28,58	0,09	0,32
37	20	3514	117	3,32	29,28	0,14	0,48
37	10	2782	115	4,14	31,21	1,03	3,31
37	5	2151	104	4,83	32,74	1,85	5,66
37	2	1466	4	0,29	29,87	2,94	9,85
37	1	1042	105	10,11	31,81	0,92	2,89
37	0,5	799	105	13,09	32,24	4,72	14,63
37	0,2	547	88	16,08	23,37	6,04	25,84
37	0,1	397	73	18,47	27,16	0,07	0,26
37	0,01	190	91	47,99	23,45	5,90	25,15
54	25	465	0	0,00	35,36	0,00	0,00
54	20	997	0	0,00	35,06	0,00	0,00
54	10	743	0	0,00	34,77	0,00	0,00
54	5	551	0	0,00	34,52	0,00	0,00
54	2	374	0	0,00	34,18	0,00	0,00
54	1	302	0	0,00	32,38	0,00	0,00
54	0,5	246	0	0,00	30,54	0,00	0,00
54	0,2	189	0	0,00	27,67	0,00	0,00
54	0,1	155	0	0,00	24,76	0,00	0,00
54	0,01	89	0	0,00	5,27	0,00	0,00

U7-DNIT-FXC-60/85							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	20217	977	4,83	2,12	0,17	8,00
-10	20	20151	936	4,64	2,24	0,21	9,47
-10	10	19799	951	4,80	2,53	0,20	7,83
-10	5	19402	967	4,98	2,79	0,20	7,10
-10	2	18816	973	5,17	3,19	0,26	8,21
-10	1	18339	975	5,32	3,50	0,29	8,30
-10	0,5	17805	1023	5,75	3,82	0,35	9,08
-10	0,2	17121	1115	6,51	4,29	0,42	9,89
-10	0,1	16542	1082	6,54	4,61	0,41	8,90
-10	0,01	14988	955	6,37	6,00	1,47	24,51
4	25	16491	71	0,43	4,97	0,12	2,42
4	20	16324	59	0,36	5,22	0,04	0,81
4	10	15686	91	0,58	5,67	0,07	1,25
4	5	15015	79	0,53	6,21	0,08	1,37
4	2	14102	79	0,56	6,85	0,08	1,24
4	1	13388	47	0,35	7,41	0,05	0,67
4	0,5	12655	34	0,27	7,98	0,00	0,00
4	0,2	11704	5	0,04	8,84	0,04	0,40
4	0,1	10958	21	0,19	9,57	0,01	0,15
4	0,01	8502	106	1,25	12,86	0,06	0,50
21	25	10738	655	6,10	10,83	1,05	9,73
21	20	10471	629	6,01	11,20	1,09	9,72
21	10	9595	636	6,63	12,25	1,27	10,34
21	5	8719	653	7,49	13,40	1,47	10,98
21	2	7578	666	8,79	15,07	1,73	11,45
21	1	6734	675	10,02	16,39	1,95	11,91
21	0,5	5920	675	11,41	17,78	2,16	12,17
21	0,2	4898	669	13,66	19,68	2,49	12,65
21	0,1	4157	653	15,72	21,06	2,72	12,93
21	0,01	2150	584	27,17	24,97	3,77	15,10
37	25	3984	440	11,04	25,41	0,61	2,39
37	20	3750	420	11,20	25,99	0,47	1,80
37	10	3062	368	12,01	27,66	0,25	0,89
37	5	2453	306	12,48	29,15	0,01	0,05
37	2	1806	222	12,29	30,37	0,54	1,79
37	1	1425	163	11,41	30,78	0,96	3,12
37	0,5	1125	107	9,50	30,77	1,37	4,46
37	0,2	821	44	5,33	30,47	1,85	6,06
37	0,1	646	6	0,88	29,97	2,22	7,41
37	0,01	324	79	24,33	26,79	4,37	16,31
54	25	1782	905	50,79	31,19	4,16	13,36
54	20	1602	946	59,09	30,92	3,80	12,30
54	10	1259	807	64,08	30,59	2,24	7,33
54	5	978	674	68,89	30,37	1,01	3,33
54	2	698	517	74,12	30,19	0,00	0,00
54	1	555	415	74,81	29,60	0,58	1,96
54	0,5	468	294	62,88	30,12	0,86	2,86
54	0,2	355	200	56,45	29,05	0,04	0,12
54	0,1	285	146	51,18	28,98	0,96	3,32
54	0,01	129	76	59,38	25,22	2,96	11,72

U8-DNIT-FXB-50/70							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média $E^*$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\varphi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	30995	1807	5,83	1,84	0,08	4,61
-10	20	30798	1837	5,96	1,99	0,01	0,71
-10	10	30325	1756	5,79	2,25	0,06	2,51
-10	5	29780	1669	5,61	2,53	0,06	2,24
-10	2	28991	1548	5,34	2,94	0,09	3,13
-10	1	28336	1409	4,97	3,27	0,15	4,55
-10	0,5	27590	1371	4,97	3,64	0,13	3,50
-10	0,2	26459	1266	4,79	4,13	0,20	4,79
-10	0,1	25570	1124	4,40	4,59	0,26	5,71
-10	0,01	23055	842	3,65	6,15	0,33	5,29
4	25	25881	2336	9,03	4,68	0,18	3,93
4	20	25657	2190	8,54	4,95	0,11	2,29
4	10	24661	2068	8,39	5,62	0,06	1,13
4	5	23601	1961	8,31	6,25	0,03	0,45
4	2	22090	1816	8,22	7,17	0,09	1,28
4	1	20899	1686	8,07	7,96	0,11	1,42
4	0,5	19643	1519	7,73	8,83	0,19	2,16
4	0,2	17941	1300	7,24	10,15	0,34	3,34
4	0,1	16720	1063	6,36	11,18	0,37	3,29
4	0,01	12515	412	3,29	15,52	1,10	7,11
21	25	17619	205	1,16	10,78	1,29	11,94
21	20	17229	56	0,32	11,98	0,26	2,18
21	10	15838	132	0,83	13,34	0,61	4,56
21	5	14353	173	1,21	14,94	0,76	5,07
21	2	12406	204	1,64	17,16	0,79	4,62
21	1	10944	211	1,93	18,84	0,82	4,35
21	0,5	9545	235	2,46	20,56	0,83	4,02
21	0,2	7791	279	3,58	22,85	0,94	4,12
21	0,1	6485	290	4,47	24,52	0,96	3,92
21	0,01	2878	315	10,96	29,81	0,78	2,63
37	25	5241	317	6,04	31,97	0,95	2,96
37	20	4865	284	5,83	31,63	0,89	2,82
37	10	3696	273	7,38	33,47	1,15	3,44
37	5	2714	264	9,72	35,40	1,61	4,53
37	2	1740	235	13,54	37,29	2,11	5,65
37	1	1218	204	16,78	38,26	2,48	6,49
37	0,5	872	164	18,82	37,75	2,53	6,71
37	0,2	568	122	21,39	36,51	2,38	6,51
37	0,1	411	91	22,00	35,55	2,28	6,43
37	0,01	194	45	23,30	25,70	2,65	10,32
54	25	1324	380	28,69	40,40	2,84	7,02
54	20	1146	343	29,96	40,43	3,49	8,64
54	10	787	240	30,54	39,83	2,92	7,33
54	5	534	162	30,31	39,37	2,60	6,61
54	2	325	109	33,45	39,13	3,74	9,56
54	1	244	79	32,56	34,45	1,94	5,62
54	0,5	194	60	31,09	30,43	1,17	3,86
54	0,2	149	44	29,75	25,18	0,34	1,35
54	0,1	124	33	26,80	23,32	1,54	6,61
54	0,01	78	28	35,97	15,07	2,43	16,14

U8-DNIT-FXC-50/70							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	28615	491	1,72	2,21	0,23	10,58
-10	20	28362	426	1,50	2,35	0,19	8,14
-10	10	27899	337	1,21	2,66	0,21	7,97
-10	5	27311	314	1,15	2,95	0,27	9,11
-10	2	26436	252	0,95	3,52	0,19	5,43
-10	1	25697	185	0,72	3,91	0,27	6,87
-10	0,5	24888	206	0,83	4,39	0,23	5,15
-10	0,2	23796	141	0,59	5,02	0,21	4,09
-10	0,1	23033	185	0,80	5,42	0,27	4,96
-10	0,01	21271	525	2,47	6,65	0,12	1,81
4	25	24078	1874	7,78	5,20	0,57	10,88
4	20	23782	1864	7,84	5,44	0,61	11,18
4	10	22817	1873	8,21	6,13	0,67	10,97
4	5	21765	1912	8,78	6,87	0,77	11,23
4	2	20249	1954	9,65	8,01	0,88	10,95
4	1	19012	1981	10,42	8,95	1,02	11,38
4	0,5	17742	1968	11,09	10,00	1,10	11,03
4	0,2	16021	1925	12,02	11,57	1,30	11,25
4	0,1	14757	1799	12,19	12,76	1,32	10,37
4	0,01	10283	1211	11,77	19,20	1,53	7,99
21	25	14024	753	5,37	14,82	0,35	2,34
21	20	13555	747	5,51	15,38	0,40	2,62
21	10	12045	661	5,49	17,29	0,44	2,54
21	5	10534	596	5,66	19,27	0,45	2,31
21	2	8666	502	5,79	21,93	0,49	2,23
21	1	7340	409	5,57	23,92	0,45	1,89
21	0,5	6093	338	5,55	25,89	0,47	1,80
21	0,2	4614	260	5,62	28,42	0,47	1,67
21	0,1	3623	227	6,27	30,01	0,47	1,58
21	0,01	1320	90	6,81	33,29	0,04	0,13
37	25	4033	292	7,24	33,95	0,76	2,23
37	20	3685	293	7,96	34,40	0,84	2,45
37	10	2717	257	9,47	36,28	0,83	2,28
37	5	1941	206	10,60	37,77	0,87	2,30
37	2	1211	139	11,44	38,77	0,75	1,93
37	1	848	97	11,45	38,14	0,38	1,00
37	0,5	612	60	9,78	36,64	0,22	0,60
37	0,2	407	30	7,34	33,89	0,95	2,82
37	0,1	303	16	5,18	31,67	1,68	5,31
37	0,01	150	5	3,25	25,24	2,65	10,51
54	25	698	59	8,45	40,22	0,69	1,71
54	20	589	51	8,63	41,05	0,75	1,83
54	10	400	30	7,52	39,06	0,68	1,74
54	5	270	16	5,85	37,30	0,44	1,18
54	2	163	3	1,78	34,44	1,30	3,78
54	1	129	2	1,75	29,10	3,81	13,10
54	0,5	107	1	1,38	26,90	1,96	7,28
54	0,2	87	4	4,72	23,16	3,51	15,18
54	0,1	75	3	4,55	20,02	5,88	29,39
54	0,01	52	0	0,00	20,96	0,00	0,00

U9-DNIT-FXC-60/85							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média $E^*$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\varphi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	27340	1030	3,77	2,11	0,16	7,73
-10	20	27201	1118	4,11	2,21	0,18	8,32
-10	10	26699	1035	3,88	2,61	0,07	2,71
-10	5	26127	969	3,71	2,96	0,11	3,59
-10	2	25291	862	3,41	3,45	0,07	2,05
-10	1	24594	781	3,17	3,87	0,05	1,28
-10	0,5	23824	707	2,97	4,30	0,07	1,64
-10	0,2	22695	631	2,78	4,93	0,13	2,73
-10	0,1	21856	598	2,74	5,42	0,08	1,44
-10	0,01	19672	923	4,69	7,13	0,44	6,15
4	25	22322	1110	4,97	5,53	0,19	3,46
4	20	22043	1083	4,91	5,75	0,16	2,71
4	10	21065	1033	4,90	6,42	0,17	2,64
4	5	20006	957	4,78	7,13	0,18	2,48
4	2	18538	882	4,76	8,13	0,13	1,65
4	1	17372	822	4,73	8,98	0,13	1,50
4	0,5	16178	725	4,48	9,87	0,13	1,29
4	0,2	14597	635	4,35	11,16	0,12	1,08
4	0,1	13461	598	4,44	12,15	0,17	1,40
4	0,01	9475	155	1,63	16,45	0,23	1,38
21	25	11966	1162	9,71	14,82	2,45	16,51
21	20	11532	1102	9,55	15,23	1,87	12,26
21	10	10208	1011	9,91	16,71	1,70	10,16
21	5	8940	900	10,07	18,57	1,63	8,76
21	2	7379	750	10,16	21,05	1,70	8,06
21	1	6294	683	10,85	23,03	1,57	6,82
21	0,5	5302	625	11,79	24,94	1,48	5,93
21	0,2	4129	579	14,03	27,36	1,34	4,91
21	0,1	3388	576	16,99	28,84	1,36	4,73
21	0,01	1534	393	25,63	29,96	2,63	8,78
37	25	3342	173	5,16	34,30	0,30	0,89
37	20	2999	40	1,34	34,33	0,39	1,13
37	10	2280	19	0,84	36,33	0,20	0,54
37	5	1686	6	0,34	37,93	0,15	0,39
37	2	1099	4	0,39	39,41	0,30	0,77
37	1	794	5	0,67	39,83	0,71	1,78
37	0,5	581	3	0,50	39,32	1,14	2,90
37	0,2	387	6	1,46	37,59	0,86	2,29
37	0,1	286	5	1,83	35,72	0,77	2,16
37	0,01	136	3	2,55	27,59	0,60	2,18
54	25	617	47	7,55	40,54	1,43	3,52
54	20	536	54	10,05	41,10	2,03	4,94
54	10	378	38	10,03	39,38	2,03	5,15
54	5	266	27	10,22	37,74	1,97	5,23
54	2	166	16	9,71	35,29	1,08	3,07
54	1	134	14	10,38	31,87	1,11	3,48
54	0,5	110	12	10,91	28,25	0,20	0,70
54	0,2	82	15	18,36	19,24	8,32	43,22
54	0,1	64	21	32,09	19,24	5,58	29,00
54	0,01	51	0	0,55	22,71	6,32	27,84

U9-DNIT-FXC-TLAF							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	25215	817	3,24	2,31	0,25	11,02
-10	20	25230	677	2,68	2,39	0,37	15,38
-10	10	24704	716	2,90	2,66	0,33	12,52
-10	5	24228	651	2,69	2,94	0,40	13,47
-10	2	23514	528	2,25	3,34	0,47	13,97
-10	1	22946	410	1,79	3,62	0,49	13,67
-10	0,5	22297	326	1,46	3,98	0,54	13,70
-10	0,2	21431	276	1,29	4,39	0,54	12,24
-10	0,1	20820	331	1,59	4,67	0,53	11,37
-10	0,01	19294	690	3,58	5,94	0,23	3,93
4	25	21403	1549	7,24	4,71	0,32	6,76
4	20	21206	1503	7,09	4,86	0,24	4,95
4	10	20405	1475	7,23	5,36	0,15	2,77
4	5	19583	1438	7,34	5,86	0,12	2,05
4	2	18436	1379	7,48	6,51	0,06	0,87
4	1	17517	1336	7,63	7,02	0,09	1,31
4	0,5	16603	1327	7,99	7,61	0,10	1,30
4	0,2	15398	1201	7,80	8,42	0,07	0,84
4	0,1	14530	1056	7,27	9,05	0,05	0,55
4	0,01	11422	587	5,14	12,26	0,02	0,17
21	25	13508	421	3,11	11,21	0,50	4,48
21	20	13206	333	2,52	11,46	0,41	3,58
21	10	12123	280	2,31	12,64	0,50	3,97
21	5	11029	206	1,87	13,78	0,47	3,39
21	2	9605	110	1,15	15,44	0,57	3,71
21	1	8575	33	0,39	16,83	0,62	3,70
21	0,5	7575	19	0,25	18,24	0,66	3,64
21	0,2	6286	60	0,96	20,28	0,62	3,03
21	0,1	5320	84	1,58	21,90	0,60	2,75
21	0,01	2570	45	1,76	27,88	0,40	1,42
37	25	5490	396	7,21	24,96	1,50	6,01
37	20	5214	441	8,45	25,20	1,46	5,81
37	10	4316	419	9,72	26,83	1,39	5,19
37	5	3515	391	11,13	28,26	1,38	4,88
37	2	2600	327	12,59	29,96	1,33	4,44
37	1	2027	287	14,16	31,03	1,27	4,10
37	0,5	1568	231	14,75	31,53	0,98	3,12
37	0,2	1076	161	15,01	32,11	0,71	2,20
37	0,1	781	111	14,27	32,20	0,45	1,38
37	0,01	319	44	13,72	29,95	0,07	0,24
54	25	2030	81	4,01	34,25	0,91	2,64
54	20	1877	78	4,14	33,98	0,86	2,52
54	10	1414	57	4,05	34,35	0,88	2,55
54	5	1043	41	3,93	34,49	1,05	3,06
54	2	687	29	4,17	34,60	1,40	4,05
54	1	512	25	4,94	33,72	1,65	4,91
54	0,5	383	20	5,27	32,54	1,67	5,13
54	0,2	263	15	5,87	30,90	1,48	4,78
54	0,1	193	13	6,66	29,58	1,12	3,78
54	0,01	98	23	23,45	29,69	1,46	4,93

U10-DNIT-FXC-50/70							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média $E^*$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\varphi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	29160	1423	4,88	2,11	0,09	4,37
-10	20	29007	1526	5,26	2,25	0,18	7,87
-10	10	28501	1592	5,58	2,57	0,23	9,10
-10	5	27913	1657	5,94	2,97	0,30	10,00
-10	2	27038	1725	6,38	3,48	0,30	8,53
-10	1	26326	1763	6,70	3,88	0,38	9,84
-10	0,5	25510	1804	7,07	4,42	0,42	9,60
-10	0,2	24290	1954	8,05	5,09	0,52	10,15
-10	0,1	23424	1965	8,39	5,60	0,55	9,85
-10	0,01	21228	1905	8,97	7,06	0,64	9,12
4	25	24737	1523	6,16	4,93	0,44	8,89
4	20	24529	1553	6,33	5,17	0,37	7,26
4	10	23543	1445	6,14	5,93	0,30	5,13
4	5	22494	1414	6,28	6,65	0,35	5,21
4	2	20999	1376	6,55	7,74	0,36	4,66
4	1	19785	1334	6,74	8,65	0,40	4,58
4	0,5	18515	1284	6,94	9,68	0,40	4,17
4	0,2	16778	1225	7,30	11,18	0,51	4,55
4	0,1	15457	1216	7,87	12,47	0,59	4,71
4	0,01	10495	869	8,28	18,38	0,19	1,04
21	25	14941	508	3,40	13,31	0,16	1,22
21	20	14704	476	3,24	13,93	0,11	0,76
21	10	13240	390	2,95	15,88	0,06	0,36
21	5	11746	303	2,58	17,86	0,16	0,87
21	2	9802	229	2,34	20,58	0,23	1,13
21	1	8393	175	2,09	22,69	0,29	1,28
21	0,5	7086	110	1,56	24,82	0,46	1,85
21	0,2	5478	74	1,36	27,72	0,62	2,24
21	0,1	4368	52	1,18	29,72	0,73	2,45
21	0,01	1680	18	1,05	34,94	1,82	5,20
37	25	4166	95	2,29	34,64	0,52	1,51
37	20	3827	74	1,94	34,87	0,37	1,07
37	10	2831	49	1,75	36,76	0,18	0,50
37	5	2026	36	1,78	38,27	0,04	0,09
37	2	1262	28	2,19	39,61	0,07	0,18
37	1	877	21	2,45	39,58	0,32	0,80
37	0,5	622	18	2,90	38,64	0,61	1,57
37	0,2	402	15	3,71	36,70	0,93	2,54
37	0,1	293	11	3,66	34,97	0,98	2,79
37	0,01	144	3	2,36	28,18	1,78	6,32
54	25	658	4	0,68	42,49	1,70	3,99
54	20	578	5	0,86	42,50	2,05	4,82
54	10	393	12	2,93	41,09	2,13	5,18
54	5	265	12	4,38	39,93	1,65	4,13
54	2	161	11	6,55	37,00	0,20	0,54
54	1	131	8	6,44	32,54	0,64	1,96
54	0,5	107	7	6,94	27,72	1,65	5,94
54	0,2	66	4	5,39	26,82	1,80	6,72
54	0,1	55	5	8,59	24,55	11,15	45,43
54	0,01	74	31	42,40	18,13	3,69	20,36

U11-DAER-FXA-50/70							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	23896	2689	11,25	2,19	0,13	6,15
-10	20	23702	2637	11,13	2,27	0,10	4,36
-10	10	23304	2575	11,05	2,50	0,11	4,25
-10	5	22854	2572	11,25	2,85	0,15	5,22
-10	2	22182	2532	11,42	3,27	0,25	7,78
-10	1	21592	2529	11,71	3,65	0,27	7,36
-10	0,5	20947	2528	12,07	4,05	0,28	6,98
-10	0,2	20095	2483	12,36	4,59	0,40	8,79
-10	0,1	19480	2373	12,18	5,00	0,34	6,79
-10	0,01	18019	1764	9,79	6,28	0,40	6,42
4	25	17974	3748	20,85	5,24	0,00	0,00
4	20	18566	2471	13,31	5,42	0,00	0,00
4	10	18890	762	4,04	5,79	0,36	6,23
4	5	18025	684	3,80	6,68	0,08	1,17
4	2	16760	598	3,57	7,64	0,06	0,74
4	1	15776	548	3,47	8,45	0,12	1,42
4	0,5	14743	496	3,37	9,29	0,11	1,14
4	0,2	13418	466	3,47	10,52	0,08	0,81
4	0,1	12476	474	3,80	11,50	0,06	0,55
4	0,01	9334	425	4,55	15,75	0,21	1,35
21	25	11622	800	6,88	14,47	0,80	5,52
21	20	11468	419	3,65	13,44	1,20	8,89
21	10	10424	224	2,15	14,51	2,16	14,87
21	5	9202	190	2,06	16,12	2,40	14,87
21	2	7659	172	2,24	19,06	1,80	9,42
21	1	6571	152	2,31	21,56	1,02	4,72
21	0,5	5537	175	3,17	24,10	0,34	1,41
21	0,2	4317	136	3,14	27,87	1,04	3,73
21	0,1	3449	110	3,18	30,42	1,58	5,21
21	0,01	1299	13	0,98	41,12	6,48	15,77
37	25	3853	209	5,41	33,20	1,51	4,56
37	20	3647	252	6,90	32,84	1,51	4,59
37	10	2830	234	8,27	34,75	1,73	4,99
37	5	2104	201	9,54	36,67	1,94	5,30
37	2	1349	143	10,59	39,06	2,28	5,85
37	1	940	105	11,17	40,06	2,67	6,66
37	0,5	651	72	11,13	40,10	2,79	6,95
37	0,2	397	43	10,76	39,38	3,30	8,37
37	0,1	266	24	9,15	38,29	3,17	8,27
37	0,01	106	10	9,44	35,42	4,72	13,34
54	25	688	0	0,00	42,19	0,00	0,00
54	20	611	0	0,00	41,29	0,00	0,00
54	10	416	0	0,00	39,70	0,00	0,00
54	5	282	0	0,00	38,20	0,00	0,00
54	2	165	0	0,00	36,24	0,00	0,00
54	1	128	0	0,00	31,33	0,00	0,00
54	0,5	103	0	0,00	27,48	0,00	0,00
54	0,2	79	0	0,00	24,70	0,00	0,00
54	0,1	65	0	0,00	15,92	0,00	0,00
54	0,01	98	0	0,00	3,52	0,00	0,00

U12-DAER-FXB-60/85							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média $E^*$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\varphi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	22544	2298	10,19	2,69	0,11	3,95
-10	20	22440	2396	10,68	2,70	0,04	1,57
-10	10	22057	2362	10,71	3,03	0,06	2,10
-10	5	21604	2302	10,66	3,34	0,03	0,85
-10	2	20929	2233	10,67	3,83	0,05	1,29
-10	1	20350	2144	10,54	4,24	0,06	1,33
-10	0,5	19730	2063	10,46	4,72	0,02	0,45
-10	0,2	18805	2015	10,72	5,34	0,00	0,00
-10	0,1	18075	1978	10,95	5,89	0,02	0,36
-10	0,01	15880	1948	12,27	7,46	0,39	5,22
4	25	17911	930	5,19	6,64	0,11	1,70
4	20	17699	966	5,46	6,89	0,25	3,59
4	10	16826	898	5,34	7,72	0,37	4,86
4	5	15888	807	5,08	8,53	0,51	5,97
4	2	14609	720	4,93	9,70	0,62	6,35
4	1	13604	639	4,70	10,72	0,71	6,67
4	0,5	12577	565	4,49	11,87	0,92	7,74
4	0,2	11229	490	4,36	13,45	1,15	8,57
4	0,1	10195	237	2,32	14,62	1,41	9,67
4	0,01	7364	392	5,32	18,98	1,60	8,42
21	25	9614	845	8,79	17,40	0,23	1,30
21	20	9376	803	8,57	18,01	0,43	2,40
21	10	8226	676	8,22	20,15	0,53	2,63
21	5	7087	526	7,42	22,25	0,61	2,73
21	2	5652	398	7,04	25,09	0,59	2,37
21	1	4645	295	6,35	27,28	0,68	2,49
21	0,5	3727	217	5,83	29,26	0,69	2,34
21	0,2	2670	139	5,22	31,87	0,57	1,80
21	0,1	2011	91	4,54	33,57	0,60	1,79
21	0,01	678	44	6,46	39,50	0,07	0,18
37	25	2319	18	0,79	37,76	1,24	3,30
37	20	2133	44	2,06	37,40	1,38	3,69
37	10	1545	46	2,98	38,25	1,42	3,72
37	5	1097	37	3,35	38,68	1,26	3,25
37	2	689	18	2,58	38,78	1,07	2,75
37	1	499	8	1,52	37,19	0,54	1,45
37	0,5	370	1	0,27	35,12	0,04	0,12
37	0,2	255	5	2,05	31,78	1,65	5,21
37	0,1	196	6	3,28	29,19	2,64	9,06
37	0,01	110	0	0,00	25,44	0,00	0,00
54	25	516	0	0,00	38,65	0,00	0,00
54	20	475	0	0,00	37,85	0,00	0,00
54	10	355	0	0,00	35,67	0,00	0,00
54	5	267	0	0,00	33,98	0,00	0,00
54	2	187	0	0,00	29,86	0,00	0,00
54	1	151	0	0,00	26,67	0,00	0,00
54	0,5	130	0	0,00	24,79	0,00	0,00
54	0,2	109	0	0,00	20,88	0,00	0,00
54	0,1	96	0	0,00	19,15	0,00	0,00
54	0,01	46	0	0,00	20,16	0,00	0,00

U12-DAER-FXC-60/85							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	25019	117	0,47	2,87	0,27	9,36
-10	20	24893	45	0,18	3,02	0,33	11,02
-10	10	24424	21	0,09	3,26	0,49	15,18
-10	5	23855	91	0,38	3,68	0,52	14,22
-10	2	22994	211	0,92	4,23	0,64	15,23
-10	1	22256	348	1,56	4,66	0,70	15,04
-10	0,5	21495	463	2,15	5,12	0,71	13,96
-10	0,2	20403	543	2,66	5,85	0,83	14,15
-10	0,1	19650	584	2,97	6,35	0,78	12,25
-10	0,01	17677	218	1,23	7,69	0,35	4,51
4	25	20439	940	4,60	6,34	0,74	11,60
4	20	20061	923	4,60	6,60	0,77	11,69
4	10	19038	992	5,21	7,44	0,81	10,83
4	5	17956	1073	5,97	8,29	0,94	11,35
4	2	16482	1163	7,06	9,59	1,08	11,29
4	1	15326	1206	7,87	10,70	1,17	10,97
4	0,5	14108	1246	8,83	11,91	1,27	10,69
4	0,2	12550	1267	10,10	13,70	1,34	9,81
4	0,1	11292	1311	11,61	15,06	1,32	8,78
4	0,01	7416	730	9,85	21,19	0,45	2,10
21	25	10383	171	1,65	17,72	0,48	2,71
21	20	10171	23	0,22	18,46	0,71	3,83
21	10	8852	12	0,14	20,54	0,62	3,00
21	5	7580	66	0,88	22,66	0,57	2,53
21	2	5988	134	2,23	25,51	0,57	2,25
21	1	4887	167	3,41	27,66	0,59	2,12
21	0,5	3900	170	4,35	29,61	0,71	2,41
21	0,2	2798	140	5,00	32,22	1,03	3,20
21	0,1	2109	134	6,34	34,14	1,75	5,12
21	0,01	754	56	7,42	35,68	0,43	1,21
37	25	2561	75	2,93	35,15	0,09	0,26
37	20	2312	71	3,06	35,63	0,14	0,40
37	10	1673	57	3,38	36,62	0,52	1,43
37	5	1207	50	4,16	37,00	0,82	2,22
37	2	795	67	8,37	36,67	0,87	2,37
37	1	598	63	10,54	35,39	1,39	3,94
37	0,5	467	61	13,06	32,98	0,74	2,23
37	0,2	348	61	17,42	30,41	0,85	2,79
37	0,1	284	58	20,42	21,88	8,29	37,92
37	0,01	162	30	18,59	19,01	4,70	24,74
54	25	836	0	0,00	38,54	0,00	0,00
54	20	746	0	0,00	38,54	0,00	0,00
54	10	550	0	0,00	36,38	0,00	0,00
54	5	404	0	0,00	34,15	0,00	0,00
54	2	274	0	0,00	32,20	0,00	0,00
54	1	229	0	0,00	28,79	0,00	0,00
54	0,5	195	0	0,00	26,19	0,00	0,00
54	0,2	160	0	0,00	23,40	0,00	0,00
54	0,1	137	0	0,00	22,16	0,00	0,00
54	0,01	0	-	-	-	-	-

U13-DNIT-FXB-50/70							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média $E^*$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\varphi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	25930	725	2,80	2,08	0,12	5,79
-10	20	25940	603	2,33	2,47	0,49	19,79
-10	10	25831	190	0,74	2,63	0,32	12,12
-10	5	25432	79	0,31	3,05	0,57	18,55
-10	2	24324	651	2,67	3,37	0,40	11,75
-10	1	23717	723	3,05	3,77	0,43	11,46
-10	0,5	23046	767	3,33	4,16	0,48	11,56
-10	0,2	22108	851	3,85	4,78	0,51	10,65
-10	0,1	21304	828	3,89	5,24	0,57	10,94
-10	0,01	19281	1010	5,24	6,83	0,04	0,52
4	25	21738	536	2,47	5,81	0,15	2,56
4	20	21438	537	2,50	6,21	0,26	4,22
4	10	20434	542	2,65	6,80	0,22	3,23
4	5	19393	546	2,81	7,49	0,23	3,02
4	2	17918	563	3,14	8,50	0,30	3,49
4	1	16764	583	3,48	9,38	0,32	3,39
4	0,5	15579	602	3,86	10,30	0,34	3,30
4	0,2	14019	625	4,46	11,67	0,36	3,09
4	0,1	12926	567	4,39	12,79	0,35	2,76
4	0,01	9885	63	0,64	16,24	0,35	2,18
21	25	12194	483	3,96	14,65	0,52	3,52
21	20	11791	407	3,45	15,28	0,57	3,75
21	10	10510	396	3,77	16,97	0,58	3,42
21	5	9249	364	3,94	18,82	0,59	3,12
21	2	7641	311	4,07	21,39	0,65	3,04
21	1	6524	301	4,61	23,41	0,66	2,84
21	0,5	5488	270	4,92	25,44	0,68	2,67
21	0,2	4215	247	5,86	28,09	0,76	2,72
21	0,1	3361	234	6,96	29,88	1,00	3,34
21	0,01	1296	130	10,04	33,95	1,07	3,17
37	25	3555	190	5,33	34,86	1,13	3,25
37	20	3295	183	5,56	34,99	0,94	2,69
37	10	2485	149	6,01	36,55	0,77	2,11
37	5	1823	112	6,17	37,64	0,62	1,65
37	2	1168	74	6,36	38,69	0,27	0,69
37	1	830	49	5,95	38,53	0,15	0,39
37	0,5	595	34	5,77	37,61	0,32	0,85
37	0,2	391	22	5,75	36,08	0,89	2,47
37	0,1	282	10	3,58	34,95	1,85	5,28
37	0,01	203	111	54,40	30,08	4,72	15,68
54	25	755	113	14,95	39,03	0,66	1,69
54	20	651	95	14,59	39,45	0,36	0,91
54	10	454	58	12,84	37,74	0,62	1,65
54	5	314	33	10,46	36,19	0,95	2,64
54	2	199	21	10,33	34,05	0,96	2,82
54	1	160	10	6,21	30,02	0,08	0,28
54	0,5	133	10	7,36	26,70	0,36	1,35
54	0,2	129	23	17,60	19,76	4,30	21,76
54	0,1	112	20	17,95	15,75	6,35	40,32
54	0,01	72	0	0,00	17,15	0,00	0,00

U14-DNIT-FXC-60/85							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	26548	1454	5,48	1,85	0,34	18,35
-10	20	30309	1404	4,63	2,17	0,02	0,98
-10	10	29887	1397	4,68	2,49	0,02	0,85
-10	5	29377	1397	4,76	2,73	0,05	1,82
-10	2	28617	1332	4,66	3,10	0,01	0,23
-10	1	27988	1240	4,43	3,39	0,01	0,42
-10	0,5	27285	1104	4,05	3,70	0,02	0,57
-10	0,2	26298	1104	4,20	4,13	0,06	1,54
-10	0,1	25573	1023	4,00	4,46	0,02	0,48
-10	0,01	23197	988	4,26	5,45	0,21	3,77
4	25	25264	429	1,70	4,84	0,07	1,46
4	20	25082	612	2,44	5,08	0,06	1,25
4	10	24068	595	2,47	5,63	0,10	1,76
4	5	23012	542	2,36	6,11	0,08	1,39
4	2	21470	467	2,17	6,88	0,11	1,64
4	1	20247	409	2,02	7,54	0,18	2,35
4	0,5	18983	380	2,00	8,20	0,13	1,55
4	0,2	17337	334	1,93	9,23	0,13	1,46
4	0,1	16130	380	2,36	10,02	0,09	0,92
4	0,01	11939	431	3,61	13,43	0,25	1,84
21	25	15438	1022	6,62	13,43	1,51	11,27
21	20	14946	905	6,06	14,00	1,49	10,66
21	10	13472	903	6,70	15,42	1,72	11,15
21	5	12025	906	7,53	16,91	1,90	11,25
21	2	10104	883	8,74	18,91	2,11	11,14
21	1	8753	865	9,88	20,43	2,22	10,87
21	0,5	7443	843	11,32	21,95	2,26	10,28
21	0,2	5869	793	13,52	24,02	2,33	9,69
21	0,1	4736	725	15,32	25,49	2,33	9,15
21	0,01	1889	370	19,58	29,11	2,24	7,70
37	25	5801	305	5,27	32,55	1,82	5,60
37	20	5411	314	5,80	32,61	1,93	5,92
37	10	4279	283	6,61	34,17	2,21	6,48
37	5	3286	256	7,79	35,58	2,40	6,74
37	2	2235	219	9,81	36,76	2,32	6,31
37	1	1626	192	11,81	37,93	2,23	5,87
37	0,5	1191	166	13,93	36,31	1,94	5,36
37	0,2	777	139	17,92	33,83	1,61	4,75
37	0,1	559	134	23,91	32,50	0,76	2,33
37	0,01	235	109	46,41	23,08	7,64	33,13
54	25	1425	170	11,93	38,97	2,45	6,28
54	20	1305	159	12,17	37,94	2,40	6,34
54	10	933	135	14,51	36,18	2,16	5,98
54	5	662	116	17,59	34,30	2,11	6,16
54	2	425	98	22,95	32,20	2,60	8,08
54	1	325	86	26,34	28,94	2,33	8,04
54	0,5	259	76	29,28	26,20	2,22	8,47
54	0,2	198	65	32,90	21,74	0,21	0,98
54	0,1	165	59	35,51	18,50	1,19	6,42
54	0,01	104	43	41,15	13,59	2,14	15,77

U14-DNIT-FXC-50/70							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média $E^*$ (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\varphi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	23670	2256	9,53	2,52	0,54	21,33
-10	20	23566	2286	9,70	2,55	0,39	15,28
-10	10	23143	2335	10,09	2,85	0,47	16,65
-10	5	22655	2369	10,46	3,18	0,54	17,15
-10	2	21967	2382	10,84	3,67	0,61	16,57
-10	1	21354	2408	11,28	4,07	0,68	16,68
-10	0,5	20639	2456	11,90	4,52	0,78	17,38
-10	0,2	19712	2425	12,30	5,18	0,78	15,17
-10	0,1	19015	2274	11,96	5,63	0,81	14,46
-10	0,01	16900	1757	10,40	7,17	0,33	4,54
4	25	18567	1600	8,62	6,01	0,13	2,24
4	20	18359	1537	8,37	6,30	0,18	2,81
4	10	17550	1500	8,55	6,95	0,18	2,65
4	5	16661	1425	8,55	7,58	0,29	3,83
4	2	15418	1318	8,55	8,57	0,31	3,63
4	1	14442	1234	8,54	9,45	0,39	4,12
4	0,5	13443	1140	8,48	10,38	0,38	3,68
4	0,2	12149	1050	8,64	11,71	0,46	3,93
4	0,1	11238	923	8,22	12,78	0,33	2,60
4	0,01	8298	655	7,90	16,85	0,40	2,39
21	25	10186	255	2,50	13,38	1,94	14,54
21	20	10307	207	2,01	13,82	2,57	18,58
21	10	9157	217	2,37	15,50	2,58	16,66
21	5	8011	158	1,97	16,96	3,22	19,01
21	2	6576	108	1,65	19,55	3,42	17,51
21	1	5569	87	1,56	22,17	2,84	12,82
21	0,5	4645	91	1,95	25,12	1,73	6,87
21	0,2	3524	69	1,95	28,53	0,83	2,90
21	0,1	2779	40	1,45	30,72	0,19	0,62
21	0,01	1053	64	6,04	33,39	1,29	3,88
37	25	3030	272	8,99	28,92	8,03	27,78
37	20	2767	260	9,40	30,26	6,68	22,06
37	10	2006	274	13,68	35,40	1,89	5,33
37	5	1395	287	20,58	39,05	2,04	5,23
37	2	791	149	18,81	36,05	0,89	2,47
37	1	520	71	13,74	37,65	1,46	3,87
37	0,5	390	54	13,77	35,08	2,52	7,18
37	0,2	268	33	12,48	32,77	2,84	8,65
37	0,1	204	31	15,31	30,84	3,84	12,45
37	0,01	68	24	35,23	27,39	0,00	0,00
54	25	611	0	0,00	41,82	0,00	0,00
54	20	559	0	0,00	40,21	0,00	0,00
54	10	405	0	0,00	38,41	0,00	0,00
54	5	288	0	0,00	37,01	0,00	0,00
54	2	181	0	0,00	35,66	0,00	0,00
54	1	147	0	0,00	32,31	0,00	0,00
54	0,5	123	0	0,00	29,30	0,00	0,00
54	0,2	100	0	0,00	25,88	0,00	0,00
54	0,1	85	0	0,00	23,72	0,00	0,00
54	0,01	60	0	0,00	18,79	0,00	0,00

U14-DNIT-FXB-50/70							
Temperatura	Frequencia (Hz)	Média  E*  (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média $\phi$ (°)	DP (°)	CV (%)
-10	25	27241	858	3,15	2,07	0,47	22,55
-10	20	27045	851	3,15	2,26	0,56	24,77
-10	10	26562	942	3,55	2,52	0,61	24,13
-10	5	26062	1022	3,92	2,83	0,72	25,49
-10	2	25280	1114	4,41	3,30	0,83	25,11
-10	1	24637	1193	4,84	3,68	0,88	24,05
-10	0,5	23949	1281	5,35	4,08	0,98	24,12
-10	0,2	22937	1395	6,08	4,62	1,03	22,22
-10	0,1	22214	1312	5,91	4,99	1,00	20,00
-10	0,01	20482	1029	5,02	5,97	0,56	9,36
4	25	23061	1359	5,89	4,78	0,24	5,03
4	20	22839	1377	6,03	4,91	0,33	6,62
4	10	21997	1346	6,12	5,54	0,47	8,42
4	5	21057	1324	6,29	6,18	0,40	6,53
4	2	19719	1267	6,43	7,06	0,37	5,21
4	1	18634	1201	6,45	7,72	0,42	5,41
4	0,5	17502	1135	6,48	8,55	0,32	3,72
4	0,2	15961	1054	6,60	9,71	0,34	3,50
4	0,1	14907	997	6,69	10,62	0,35	3,33
4	0,01	10987	676	6,15	13,99	0,04	0,30
21	25	13518	523	3,87	14,11	0,00	0,00
21	20	13072	635	4,86	14,62	0,09	0,63
21	10	11641	612	5,26	16,45	0,10	0,60
21	5	10250	552	5,38	18,27	0,17	0,93
21	2	8485	467	5,51	20,80	0,31	1,50
21	1	7236	412	5,70	22,83	0,40	1,73
21	0,5	6060	318	5,25	24,84	0,48	1,94
21	0,2	4626	171	3,70	27,60	0,70	2,54
21	0,1	3645	55	1,51	29,54	0,95	3,21
21	0,01	1372	106	7,73	33,91	1,75	5,17
37	25	3711	233	6,29	36,08	1,38	3,82
37	20	3423	221	6,47	35,67	1,50	4,20
37	10	2510	162	6,45	37,46	1,53	4,10
37	5	1766	113	6,41	39,10	1,55	3,96
37	2	1086	57	5,21	40,37	1,65	4,08
37	1	756	28	3,65	40,51	2,35	5,81
37	0,5	537	10	1,79	39,25	2,48	6,32
37	0,2	351	2	0,56	36,75	2,59	7,04
37	0,1	257	4	1,41	34,24	2,06	6,03
37	0,01	131	10	7,47	29,87	6,04	20,22
54	25	567	0	0,00	43,26	0,00	0,00
54	20	508	0	0,00	41,70	0,00	0,00
54	10	357	0	0,00	39,78	0,00	0,00
54	5	250	0	0,00	38,15	0,00	0,00
54	2	159	0	0,00	34,39	0,00	0,00
54	1	126	0	0,00	27,30	0,00	0,00
54	0,5	109	0	0,00	22,44	0,00	0,00
54	0,2	72	0	0,00	20,00	0,00	0,00
54	0,1	54	0	0,00	17,00	0,00	0,00
54	0,01	49	0	0,00	13,00	0,00	0,00