

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Bruno de Souza Chaves

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE
TEMPERATURA NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS
À FADIGA A PARTIR DO MODELO S-VECD**

Santa Maria, RS
2019

Bruno de Souza Chaves

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO
DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS À FADIGA A PARTIR DO
MODELO S-VECD**

Trabalho de conclusão, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Civil**.

Orientador: Prof. Deividi da Silva Pereira

Santa Maria, RS
2019

Bruno de Souza Chaves

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO
DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS À FADIGA A PARTIR DO
MODELO S-VECD**

Trabalho de conclusão, apresentado ao Curso de Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Engenheiro Civil**.

Aprovado em 12/07/2018:

Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Silvio Lisboa Schuster, Me. (UFSM)

Profª. Mirela Schramm Tonetto (UFSM)

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, acima de tudo, àquele que fez com que tudo fosse possível, não somente nessa pesquisa, mas também ao longo do progresso científico e que detém todos os conhecimentos e sabedoria acerca de todas as áreas do conhecimento e que, mesmo sendo onipotente e infinito, se curva até a terra para ouvir todos que, humildemente, o reconhecem. Seu nome é Jesus Cristo.

Também agradeço aos meus pais e minha avó. Sem o amor e a disciplina que me passaram desde que nasci, não teria chegado nem perto do final dessa jornada. Deus os iluminou para me educarem com sabedoria e transmitirem a base de princípios que me sustenta até hoje. Além disso, vocês me ajudaram a ter um caráter solidificado, que é aquilo que mais falta na engenharia hoje e que não é ensinado nas salas de aula.

Agradeço ao professor Deividi por ser muito mais que um professor. Em se tratando do ambiente acadêmico das engenharias, é um dos pouquíssimos que consegue “sair da curva” e cumprir a função que um professor verdadeiro sempre deve cumprir, que é educar para a vida. Sua disponibilidade para orientar e aconselhar me deixam sem palavras para agradecer.

Agradeço também ao Silvio por ter sido meu “irmão mais velho” nessa pesquisa. Seguindo na trilha que você já abriu, pude chegar mais seguro ao destino!

Agradeço ao professor Magnos. Obrigado por ter me direcionado a encontrar a área de pesquisa pela qual tanto me apaixonei. Seus conselhos e sua simplicidade também me marcaram muito.

Agradeço aos membros do GEPPASV por todo o auxílio que me deram e pela disposição em tirar minhas dúvidas.

Agradeço à Petrobras, através de cujos investimentos foram realizadas as pesquisas sobre as quais pude me apoiar como “quem sobe em ombros de gigantes”.

Agradeço à equipe do professor Y. Richard Kim e à *North Carolina State University* por ter cedido o LVECD. Sem isso, nada do que foi feito aqui seria possível.

Agradeço ao Lucas Deitos, por ter me ajudado (e muito) na análise econômica. Sua disponibilidade em ter cedido a planilha do orçamento do TCC foi fundamental para mim!

Agradeço ao grupo Farol. Minha passagem pela universidade teria sido completamente mais insípida se não fosse pelas amizades e pela edificação que recebi através de vocês. Levarei para a vida que a fé e a razão caminham juntas e fazem o ser humano chegar mais próximo à estatura plena de maturidade, que é Jesus Cristo.

Agradeço aos meus amigos mais chegados que irmãos da Comunidade Cristã Aprisco. A comunhão e os ensinamentos que aprendi e aprendo a cada dia com vocês me dão força a prosseguir.

*“Um pouco de ciência nos afasta de Deus. Muito,
nos aproxima” Louis Pasteur*

RESUMO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS À FADIGA A PARTIR DO MODELO S-VECD

AUTOR: Bruno de Souza Chaves

ORIENTADOR: Deividi da Silva Pereira

Misturas asfálticas apresentam uma forte correlação entre temperatura e suas propriedades mecânicas. No Brasil, utiliza-se o método de dimensionamento de pavimentos asfálticos do DNER que desconsidera a temperatura para avaliar o comportamento da mistura asfáltica diante dos carregamentos advindos do tráfego. Portanto, em regiões de alta variabilidade térmica durante o ano ou, até mesmo, durante o dia, caso da região central do Rio Grande do Sul, não leva-se em conta a influência que essas alterações na temperatura têm sobre parâmetros mecânicos da mistura. Sendo assim, faz-se necessário adotar uma nova metodologia que considere a suscetibilidade térmica da camada de concreto asfáltico. Para investigar essa influência, são usadas ferramentas que analisam as propriedades viscoelásticas dos pavimentos. No presente trabalho, foi utilizado o *software* LVECD (*Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses*) com dados de entrada de propriedades viscoelásticas advindos do ensaio de módulo complexo, dados de fadiga obtidos pelo ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão e dados de temperatura que simulam o clima de Santa Maria/RS com suas variações térmicas diárias e sazonais em diferentes profundidades do pavimento e, a partir disto, obter o dano por fadiga a partir do modelo S-VECD. Os resultados foram comparados com simulações feitas a diferentes condições de temperatura e foram aplicadas as funções de transferência propostas por Nascimento (2015) para converter o dano em porcentagem de área trincada e fazer uma comparação entre essa abordagem e a do MeDiNa, o novo método nacional de dimensionamento. Os resultados mostraram que a consideração da variação de temperatura resultou em menores valores de dano e de área trincada para os casos estudados quando comparados com os resultados considerando temperatura constante. Ademais, a análise econômica mostrou que o LVECD resultou em custos menores por aplicação de carga que o MeDiNa.

Palavras-chaves: Pavimentos asfálticos. Fadiga. LVECD. Função de transferência.

ABSTRACT

FATIGUE ASPHALTIC PAVEMENT PERFORMANCE TEMPERATURE VARIATION INFLUENCE ANALYSIS FROM S-VECD MODEL

AUTHOR: Bruno de Souza Chaves
ADVISOR: Deividi da Silva Pereira

Asphalt mixes show a strong correlation between its temperature and its mechanical properties. In Brazil, it is used the DNER design method, which does not consider temperature in order to evaluate the behavior of asphalt mixes under traffic loads. Therefore, in regions with high temperature variation during the year or, even, during the day, which is the case of the central region of Rio Grande do Sul, it is not taken into account the influence that these variations have in the mix mechanical parameters. Thus, it is necessary to adopt a new methodology that takes into account the thermal susceptibility of asphalt concrete layer. In order to investigate this influence, one can use tools that analyze viscoelastic properties of pavements. In the current research, the LVECD software was used with viscoelastic inputs from complex modulus test, fatigue inputs obtained from direct tension cyclic fatigue test and temperature inputs which simulate climate in Santa Maria/RS with its daily and seasonal thermal variations at various pavement depths and, thus, to obtain fatigue damage with S-VECD model. Results were compared with simulations run at different temperature conditions and transfer functions proposed by Nascimento (2015) were applied to convert damage into percent cracked area and to compare this approach with MeDiNa's, the new national design method. The results showed that the consideration of temperature change resulted in lower damage and cracked area values for the studied cases when compared with results considering constant temperature. Besides that, economic analysis showed that LVECD resulted in lower costs per load application than MeDiNa.

Keywords: Asphalt pavements. Fatigue. LVECD. Transfer function.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de temperatura média mensal no pavimento versus temperatura a 0,125 pol. de profundidade	32
Figura 2- Gráfico de temperatura média mensal no pavimento versus temperatura a 0,125 pol. de profundidade acrescida da temperatura atmosférica média mensal	32
Figura 3 - Comparação entre resultados de campo e simulações com o MEF para o dia 02 de março de 2004	33
Figura 4 - Gráfico do fator de ajuste de temperaturas baixas em função da temperatura de fissuração por reflexão	34
Figura 5 - Perfil do pavimento analisado por Matic et al. (2012).....	37
Figura 6 - Comparação entre valores medidos e previstos.....	38
Figura 7 - Mapa climático do Brasil	40
Figura 8 - Trocas térmicas presentes em um pavimento.....	42
Figura 9 - Interações presentes no MEPDG.....	46
Figura 10 - Distribuição de frequências de temperaturas no interior do pavimento	49
Figura 11 - Tela do SisPav referente ao clima	49
Figura 12 - Dano sofrido em misturas asfálticas em função do estado de temperatura e taxa de deformação	54
Figura 13 - Variação anual do módulo de resiliência em função da temperatura	55
Figura 14 - Comparação de modelos da variação do módulo de resiliência em função da temperatura.....	55
Figura 15 - Valores de MR de misturas asfálticas do RS a 25 °C.....	57
Figura 16 - Domínios de comportamento mecânico de ligantes asfálticos em função da amplitude de deformações e da temperatura para um mesmo número de solicitações	58
Figura 17 - Domínios de comportamento mecânico de misturas asfálticas em função da amplitude de deformações e do número de solicitações para uma mesma temperatura.....	59
Figura 18 - Aparelhagem para realização do ensaio de MR em misturas asfálticas	62
Figura 19 - Pulso de carga usado no ensaio de MR.....	62
Figura 20 - Duração do pulso e tempo de repouso para ensaio de MR	63
Figura 21 - Gráficos da a) tensão e b) deformação para a função <i>creep</i>	66
Figura 22 - Gráfico da função <i>creep</i> para uma tensão variável.....	67
Figura 23 - Gráficos da a) tensão e b) deformação para a função do módulo de relaxação	68
Figura 24 - Defasagem entre tensão e carga.....	69
Figura 25 - Representação do módulo complexo no plano complexo	71
Figura 26 – Gráfico de tensão-deformação para materiais puramente elásticos e LVE	72
Figura 27 - Curva mestra para temperatura de 20 °C	73
Figura 28 - Corpos de prova preparados para a realização do ensaio de módulo complexo no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM	74
Figura 29 - Esquema do modelo 2S2P1D	74
Figura 30 - Curva de Wöhler.....	76
Figura 31 - Comportamento tensão-deformação em caso de fadiga e deformação permanente	78
Figura 32 - Tipologias usadas para ensaio de fadiga	81
Figura 33 - Comportamento da tensão e deformação para ensaios de fadiga com tensão controlada e deformação controlada	82
Figura 34 - Gráficos do módulo dinâmico e ângulo de fase durante o ensaio de fadiga	83
Figura 35 - Pico do ângulo de fase durante ensaio cíclico	85

Figura 36 - Esquema dos equipamentos usados no ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão	86
Figura 37 - Linearização do gráfico de tensão-deformação através de pseudo-variáveis.....	90
Figura 38 - Curva mestra sem aplicação do <i>shift factor</i>	92
Figura 39 - Curva mestra com aplicação do <i>shift factor</i>	93
Figura 40 - Parâmetros da camada de revestimento na aba <i>Design Structure</i>	97
Figura 41 - Aba <i>Climate Data</i>	98
Figura 42 - Aba <i>Traffic Data</i>	98
Figura 43 - Aba <i>Analysis and Results Options</i>	99
Figura 44 - Exemplo de gráfico de dano gerado pelo LVECD.....	100
Figura 45 - Relação entre dano médio e área trincada em trechos experimentais do projeto Fundão	101
Figura 46 - Determinação dos parâmetros usados para o cálculo do <i>shift factor</i>	102
Figura 47 - Gráfico de T (0,35) versus dano médio para A.T. de 10%	103
Figura 48 - Gráfico de R (12-1) versus dano médio para A.T. de 10%.....	103
Figura 49 - Fator de <i>shift</i> em função de T(0,35).....	104
Figura 50 - Fator de <i>shift</i> em função de R(12-1).....	104
Figura 51 - Área trincada versus dano reduzido para T(0,35).....	105
Figura 52 - Área trincada versus dano reduzido para R(12-1)	106
Figura 53 - <i>Inputs</i> de tráfego do MeDiNa	108
Figura 54 - <i>Inputs</i> de dados do MeDiNa para o concreto asfáltico	109
Figura 55 - <i>Inputs</i> de dados do MeDiNa para materiais granulares	109
Figura 56 - Exemplo de composição do SICRO para o Rio Grande do Sul	112
Figura 57 - Perfil de temperaturas obtidas para o mês de janeiro	120
Figura 58 - Perfil de temperaturas obtidas para o mês de abril	120
Figura 59 - Perfil de temperaturas obtidas para o mês de julho	121
Figura 60 - Perfil de temperaturas obtidas para o mês de outubro	121
Figura 61 - Perfil do pavimento da avenida HÉLVIO BASSO.....	123
Figura 62 - Perfil do pavimento da BR-158.....	124
Figura 63 - Exemplo de trecho de arquivo de texto lido pelo LVECD	130
Figura 64 - Resumo das informações das baterias de simulações	131
Figura 65 - Malha de pontos analisada através das simulações do LVECD.....	132
Figura 66 - Dano total para a faixa 1 da Av. HÉLVIO BASSO.....	141
Figura 67 - Dano total para a faixa 2 da Av. HÉLVIO BASSO.....	141
Figura 68 - Dano total para a faixa 1 da Av. HÉLVIO BASSO a partir das hipóteses de temperatura	142
Figura 69 - Dano total para a faixa 2 da Av. HÉLVIO BASSO a partir das hipóteses de temperatura	143
Figura 70 - Comparação entre simulações com tráfego variável e tráfego uniforme na faixa 1 da Av. HÉLVIO BASSO.....	145
Figura 71 - Comparação entre simulações com tráfego variável e tráfego uniforme na faixa 2 da Av. HÉLVIO BASSO.....	146
Figura 72 - Dano total para a BR-158.....	147
Figura 73 - Dano na camada superior de revestimento para a BR-158	148
Figura 74 - Dano superior e inferior no 1º mês para a faixa 1 da Av. HÉLVIO BASSO.....	149
Figura 75 - Dano superior e inferior no 180º mês para a faixa 1 da Av. HÉLVIO BASSO	150
Figura 76 - Dano superior e inferior no 1º mês para a faixa 2 da Av. HÉLVIO BASSO.....	150
Figura 77 - Dano superior e inferior no 180º mês para a faixa 2 da Av. HÉLVIO BASSO	151
Figura 78 - Gráfico de dano para a faixa 1 da Av. HÉLVIO BASSO e hipótese Var_DAP no 1º mês	151

Figura 79 - Gráfico de dano para a faixa 1 da Av. Hélvio Basso e hipótese Var_A_6cm no 1º mês	152
Figura 80 - Gráfico de dano para a faixa 1 da Av. Hélvio Basso e hipótese Var_DAP no 180º mês	153
Figura 81 - Gráfico de dano para a faixa 1 da Av. Hélvio Basso e hipótese Var_A_6cm no 180º mês	153
Figura 82 - Gráfico de dano para a faixa 2 da BR-158 e hipótese Var_DAP no 1º mês	154
Figura 83 – Dano e AT no 180º mês para a faixa 1 da Av. Hélvio Basso	155
Figura 84 – Dano e AT no 180º mês para a faixa 2 da Av. Hélvio Basso	155
Figura 85 - Comparação entre AT simulada pelo T(0,35), MeDiNa e AT observada para a faixa 1 da Av. Hélvio Basso ao final de 60 meses	157
Figura 86 - Comparação entre AT simulada pelo R(12-1), MeDiNa e AT observada para a faixa 1 da Av. Hélvio Basso ao final de 60 meses	157
Figura 87 - Comparação entre AT simulada pelo T(0,35), MeDiNa e AT observada para a faixa 2 da Av. Hélvio Basso ao final de 60 meses	158
Figura 88 - Comparação entre AT simulada pelo R(12-1), MeDiNa e AT observada para a faixa 2 da Av. Hélvio Basso ao final de 60 meses	158
Figura 89 - Dano total para a faixa 1 (temperaturas constantes).....	160
Figura 90 - Dano total para a faixa 2 (temperaturas constantes).....	161
Figura 91 - Dano total para a BR-158 (temperaturas constantes)	161
Figura 92 - Comparação entre dano superior e inferior para a faixa 1	163
Figura 93 - Comparação entre dano superior e inferior para a faixa 2	163
Figura 94 - Gráfico de dano do dano para a faixa 1 a 0°C no 1º mês.....	164
Figura 95 - Gráfico de dano para a faixa 2 a 0°C no 1º mês	164
Figura 96 - Gráfico de dano para a faixa 1 a 50°C no 1º mês	165
Figura 97 - Gráfico de dano para a faixa 2 a 50°C no 1º mês	165
Figura 98 - Gráfico de dano para a faixa 1 a 0°C no 120º mês	166
Figura 99 - Gráfico de dano para a faixa 1 a 50°C no 120º mês	166
Figura 100 - Gráfico de dano para a faixa 2 a 0°C no 120º mês	167
Figura 101 - Gráfico de dano para a faixa 2 a 50°C no 120º mês	167
Figura 102 - Dano total e AT no 180º mês para a faixa 1 da Av. Hélvio Basso (temperaturas constantes).....	168
Figura 103 - Dano total e AT no 180º mês para a faixa 2 da Av. Hélvio Basso (temperaturas constantes).....	169
Figura 104 - Dano total e AT no 180º mês para a BR-158 (temperaturas constantes).....	170
Figura 105 - Dano total para Av. Hélvio Basso com N = 1,0E8 em 180 meses	171
Figura 106 - Dano superior e dano inferior para revestimento de 5 cm	172
Figura 107 - Dano superior e dano inferior para revestimento de 10 cm	172
Figura 108 - Dano superior e dano inferior para revestimento de 15 cm	173
Figura 109 - Gráfico de dano para 5 cm de revestimento no 1º mês	173
Figura 110 - Gráfico de dano para 10 cm de revestimento no 1º mês	174
Figura 111 - Gráfico de dano para 15 cm de revestimento no 1º mês	174
Figura 112 - AT para revestimento de 5 cm.....	175
Figura 113 - AT para revestimento de 10 cm.....	175
Figura 114 - AT para revestimento de 15 cm.....	176
Figura 115 - Número N obtido pela AT a partir do LVECD e MeDiNa	178
Figura 116 - Comparação de custo por passagem de eixo-padrão para os diferentes métodos de análise.....	180

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Efeito da variação de diversos fatores sobre a vida de fadiga	80
Tabela 2 - Resultados da retroanálise da avenida Hélvio Basso	124
Tabela 3 - Resultados da retroanálise da BR-158.....	125

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Temperaturas máxima média, compensada média e mínima média de Santa Maria entre 2007 e 2018.....	41
Quadro 2 - Parâmetros obtidos para a função de transferência segundo $T(0,35)$	106
Quadro 3 - Parâmetros obtidos para a função de transferência segundo $R(12-1)$	106
Quadro 4 - Comparação entre dados de Santa Maria e cidades americanas	114
Quadro 5 - Submatriz da tabela de dados de temperatura de San Diego	115
Quadro 6 - Dados de Ijuí para o mês de janeiro	116
Quadro 7 - Formação da hipótese Var_DAP a partir dos dados de San Diego e Ijuí (mês de Janeiro).....	117
Quadro 8 - Resumo das hipóteses de temperatura.....	119
Quadro 9 - Dados referentes ao módulo complexo e à curva de fadiga para o revestimento da avenida Hélvio Basso.....	126
Quadro 10 - Coeficientes da série de Prony para o revestimento da avenida Hélvio Basso..	126
Quadro 11 - Dados referentes ao módulo complexo e à curva de fadiga para o revestimento da BR-158	127
Quadro 12 - Coeficientes da série de Prony para o revestimento da BR-158.....	127
Quadro 13 - <i>Inputs</i> da base, sub-base e subleito da avenida Hélvio Basso no LVECD	128
Quadro 14 - <i>Inputs</i> da base, sub-base e subleito da BR-158 no LVECD	128
Quadro 15 - Distribuição horária de passagem de veículos	129
Quadro 16 - Parâmetros de deformação permanente utilizados no MeDiNa.....	133
Quadro 17 - Área trincada medida em campo na Av. Hélvio Basso	135
Quadro 18 - Distâncias de transporte adotadas para o orçamento da Av. Hélvio Basso	136
Quadro 19 - Submatriz de tabela de dano gerada pelo LVECD.....	140
Quadro 20 - Comparação entre temperaturas e tráfego para cada hora do dia.....	144
Quadro 21 - Número N obtido para diferentes métodos de análise de pavimentos	177
Quadro 22 - Orçamentos para trecho monitorado da Av. Hélvio Basso com revestimento de 5, 10 e 15 cm	179

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2S2P1D	2 Springs, 2 Parabolic Dashpots and 1 Dashpot
AASHO	American Association of State Highway Officials
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AT	Área Trincada
CA	Concreto Asfáltico
CCP	Concreto de Cimento Portland
CENPES	Centro de Pesquisas da Petrobrás
cm	Centímetro
CNT	Confederação Nacional do Transporte
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
DMR	Dynamic Modulus Ratio
DMT	Distância Média de Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
EICM	Enhanced Integrated Climate Model
EVA	Etileno Acetato de Vinila
FIC	Fator de Influência de Chuvas
FR	Fator Climático Regional
FWD	Falling Weight Deflectometer
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
LDVT	Linear Variable Differential Transformer
LVE	Linear Viscoelástico
LVECD	<i>Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MEPDG	Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
MR	Módulo de Resiliência
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NCSU	North Carolina State University
SBS	Estireno-butadieno-estireno
SHRP	Strategic Highway Research Program
SI	Sistema Internacional de Unidades
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
S-VECD	Simplified Viscoelastic Continuum Damage
Unijuí	Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul
VECD	Viscoelastic continuum damage

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	OBJETIVO GERAL	28
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA EM MISTURAS ASFÁLTICAS NO BRASIL E NO MUNDO	31
2.2	TEMPERATURA E CLIMA NO BRASIL E RIO GRANDE DO SUL	39
2.3	TRANSFERÊNCIA DE CALOR	41
2.4	CONSIDERAÇÃO DA TEMPERATURA EM DIFERENTES MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	44
2.4.1	Métodos de dimensionamento norte-americanos	44
2.4.2	Métodos de dimensionamento nacionais	47
2.5	MECÂNICA DE PAVIMENTOS	50
2.5.1	Sistema de camadas	50
2.5.2	Rigidez de misturas asfálticas	52
2.5.3	Análise elástica	60
2.5.4	Análise viscoelástica	64
2.5.5	Fadiga em misturas asfálticas	75
2.5.6	Ensaio de fadiga	81
2.5.7	Modelo viscoelástico de dano contínuo (VECD)	88
2.6	LVECD	97
2.7	CALIBRAÇÃO DO DANO PARA ÁREA TRINCADA	100
2.8	MEDINA	107
2.9	SICRO	111
3	METODOLOGIA	113
3.1	OBTENÇÃO DOS INPUTS CLIMÁTICOS	113
3.1.1	Seleção dos dados	113
3.1.2	Extrapolação dos dados	116
3.2	OBTENÇÃO DOS INPUTS DE TRÁFEGO E DE ESTRUTURA DE PAVIMENTO	122
3.2.1	Tráfego	122
3.2.2	Estrutura	122
3.3	EMPREGO DO LVECD	125
3.3.1	Inputs de tráfego e de materiais	125
3.3.2	Inputs de temperatura	129
3.3.3	Simulações	130
3.3.4	Análise e resultados	132
3.4	EMPREGO DO MEDINA	133
3.5	EMPREGO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DO DNER	134
3.6	APLICAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA CONVERTER DANO EM ÁREA TRINCADA	134
3.7	ANÁLISE COMPARATIVA DE ÁREA TRINCADA ENTRE O MEDINA E O LVECD	135
3.8	ANÁLISE ECONÔMICA ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO	135
4	RESULTADOS E ANÁLISES	139
4.1	1ª BATERIA DE ANÁLISES	139
4.1.1	Comparação de dano entre as hipóteses de temperatura	139
4.1.2	Tipo de fissuração	148

4.1.3 Área trincada	154
4.2 2ª BATERIA DE ANÁLISES	159
4.2.1 Comparação de dano a diferentes temperaturas	159
4.2.2 Tipo de fissuração	162
4.2.3 Área trincada	168
4.3 3ª BATERIA DE ANÁLISES	170
4.3.1 Comparação de dano para as diferentes espessuras de revestimento	171
4.3.2 Tipo de fissuração	171
4.3.3 Área trincada	174
4.3.4 Cálculo do tráfego	177
4.3.5 Orçamento	179
4.3.6 Análise econômica comparativa	179
5 CONCLUSÕES	181
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	182
REFERÊNCIAS	183
APÊNDICE A – INPUTS CLIMÁTICOS	191

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da economia brasileira tem, como fator indispensável, a melhoria da qualidade das rodovias (CNT, 2018). Conforme o Relatório Gerencial da CNT (Confederação Nacional do Transporte) de 2018, mais de 60% do transporte de cargas e 90% dos deslocamentos de passageiros no Brasil são realizados pelo transporte rodoviário.

Devido a isso, o investimento em melhoria da qualidade da malha rodoviária nacional e a consequente redução de acidentes, mortes, consumo de veículos e outros desperdícios não somente trará uma melhoria na qualidade de vida do brasileiro como reduzirá o preço dos produtos nacionais e aumentará sua competitividade no mercado internacional.

Para efetuar essa melhoria, é necessário que sejam reconsideradas as metodologias de dimensionamento de pavimentos adotadas no Brasil. Desse modo, pode ser feita uma análise mais precisa de todos os fatores que influenciarão o desempenho das vias a serem construídas.

A metodologia utilizada atualmente para projetos de pavimentos asfálticos no Brasil foi proposta pelo DNER em 1981. Ela consiste em determinar uma camada teórica de pavimento que protegerá o subleito da ruptura por cisalhamento e, posteriormente, subdivide essa camada fictícia nas camadas reais a serem adotadas. Tal método, como será detalhado na seção destinada a métodos de dimensionamento nacionais, é embasado em observações feitas em pistas de teste no estado da Califórnia, nos Estados Unidos e usa equações de natureza semi-empírica, conforme atesta Balbo (2007).

Ou seja, a utilização de tal método em condições discrepantes em relação àquelas que deram origem a ele, como variação de temperatura ao longo do ano e materiais de insumo característicos de cada lugar, pode conduzir a resultados equivocados. Além disso, o método não considera uma das principais patologias presentes em rodovias brasileiras, que é a fadiga (BERNUCCI et al., 2010).

Como iniciativa para aperfeiçoar o dimensionamento, o MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional) veio com profundas melhorias na análise de pavimentos. A partir da análise elástica de camadas e uso de *inputs* de natureza mais mecânica, tais como módulos de resiliência e curvas de fadiga, pode-se obter resultados que simulam melhor os pavimentos mais comuns usados no país.

Contudo, o MeDiNa ainda não possui entrada para os dados procedentes de séries climáticas. Sendo assim, é adotada uma temperatura constante ao longo do período de projeto.

Outrossim, não são informados os parâmetros das misturas asfálticas que revelam a influência que a temperatura exerce sobre suas propriedades mecânicas, como o módulo complexo.

Considerando, ainda, a variedade de climas presentes no território brasileiro, é de se esperar que haja uma grande discrepância na resposta de pavimentos localizados em regiões de médias térmicas mais altas, como no Nordeste, e regiões mais frias, como é o caso do Sul. A partir dessas informações, o presente trabalho é proposto tencionando verificar qual é a influência que as variações sazonais e diárias de temperatura exercem sobre o desempenho de pavimentos à fadiga.

Essa análise proposta é feita a partir do *software* LVECD (*Layered Viscoelastic Pavement Analysis or Critical Distresses*). Contando com resultados obtidos dos ensaios uniaxiais de fadiga à tração-compressão e de módulo complexo, o programa realiza uma análise baseada no modelo S-VECD (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage*) e fornece o dano em uma malha pré-estabelecida de pontos do revestimento.

Para alimentar os dados referentes ao clima, foram geradas 5 hipóteses de temperatura. Elas são oriundas de uma combinação entre dados medidos de hora em hora ao longo de um ano na cidade americana de San Diego com dados coletados em Ijuí e utilizados por Blass (2011)

Com esses resultados, é possível aplicar as funções de transferência que Nascimento (2015) apresenta em sua tese e obter a porcentagem de área trincada por fadiga.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa consiste em avaliar comparativamente, através de diferentes hipóteses de temperatura, o desempenho à fadiga de pavimentos asfálticos considerando variações sazonais e/ou diárias de temperatura com a hipótese de temperatura constante

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar os resultados de área trincada obtidos através das funções de transferência propostas por Nascimento (2015) e os resultados de área trincada obtidos pelo MeDiNa através da função proposta por Fritzen (2016) com os

resultados observados em campo nos trechos monitorados pelo grupo GEPPASV da UFSM;

- Propor uma análise de sensibilidade para diferentes temperaturas constantes e avaliar que efeito isso exerce em dano obtido via LVECD e área trincada;
- Realizar uma análise econômica comparativa a partir do número N de solicitações do eixo padrão obtido pelo LVECD, MeDiNa (tendo, como critério de ruptura, o valor de 30% para a área trincada) e pelo método de dimensionamento do DNER.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

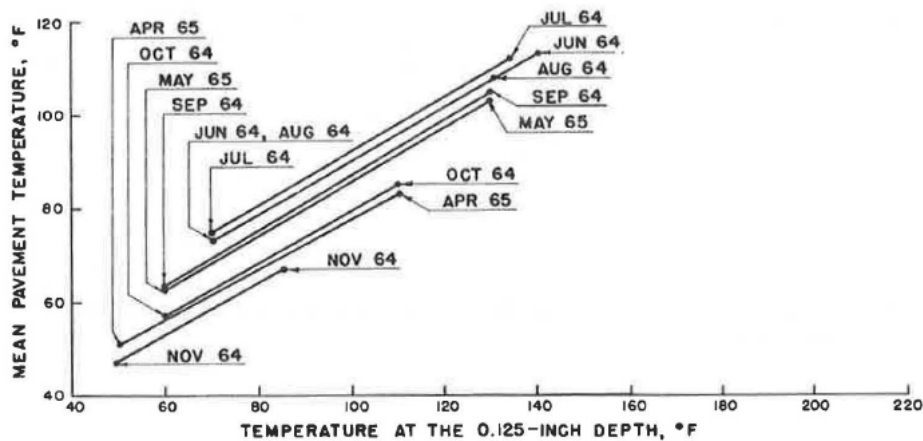
Sabe-se que a performance de pavimentos flexíveis e rígidos tem uma profunda influência das condições ambientais e que estarão submetidos. Fatores externos como precipitação, temperatura, ciclos de congelamento e degelo e nível do lençol freático descrevem como o ambiente molda o desempenho dos pavimentos (NCHRP, 2004a).

Diversos esforços já foram empreendidos para mensurar e prever as influências da temperatura no comportamento de pavimentos asfálticos. Dentre os que se dedicaram a isso, pode-se citar Southgate e Deen (1968) na cidade de Kentucky nos Estados Unidos, Minhoto et al. (2006), na cidade de Bragança, localizada em Portugal e Blass (2011), na cidade de Ijuí, RS. No presente capítulo, será feita uma sucinta revisão destes e outros trabalhos desenvolvidos sob este escopo.

Segundo Ongel e Harvey (2004), o tempo de serviço de um pavimento é um parâmetro que sofre grande influência das variações anuais, sazonais e diárias de temperatura e precipitação. Logo, para que seja alcançado o desempenho almejado em projeto, deve-se levar em consideração a variação de parâmetros climáticos em sua fase de projeto.

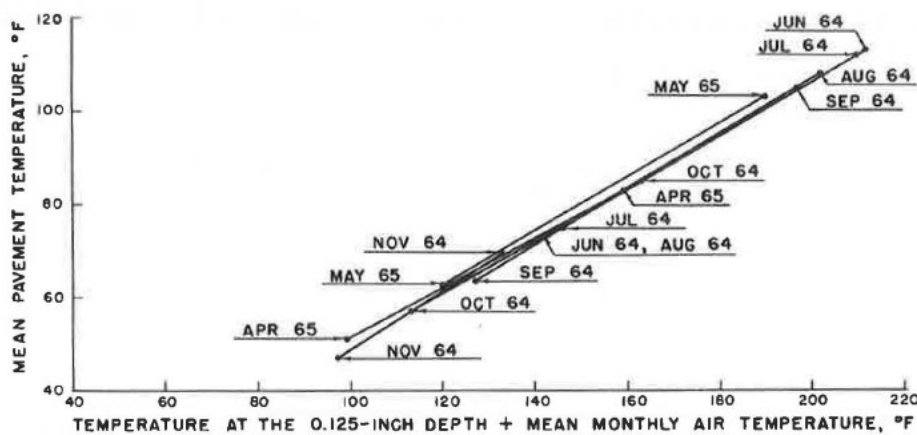
Southgate e Deen (1968) já trabalhavam com medições de temperatura a diferentes profundidades do revestimento, reconhecendo que o perfil de temperaturas em que se encontra a camada de revestimento contribui integralmente para determinar as deflexões que o pavimento sofrerá. Na Figura 1 e Figura 2, estão representados, respectivamente, os resultados obtidos em um gráfico de temperatura média do pavimento versus a temperatura à profundidade de 0,125 polegada para cada mês no período de experimentos e o gráfico das temperaturas médias do pavimento versus a temperatura à profundidade de 0,125 polegada somada da temperatura média atmosférica do respectivo mês. Os dados foram coletados entre 1964 e 1965 pelo laboratório do Asphalt Institute em College Park, Maryland.

Figura 1 - Gráfico de temperatura média mensal no pavimento versus temperatura a 0,125 pol. de profundidade



Fonte: Southgate e Deen (1968)

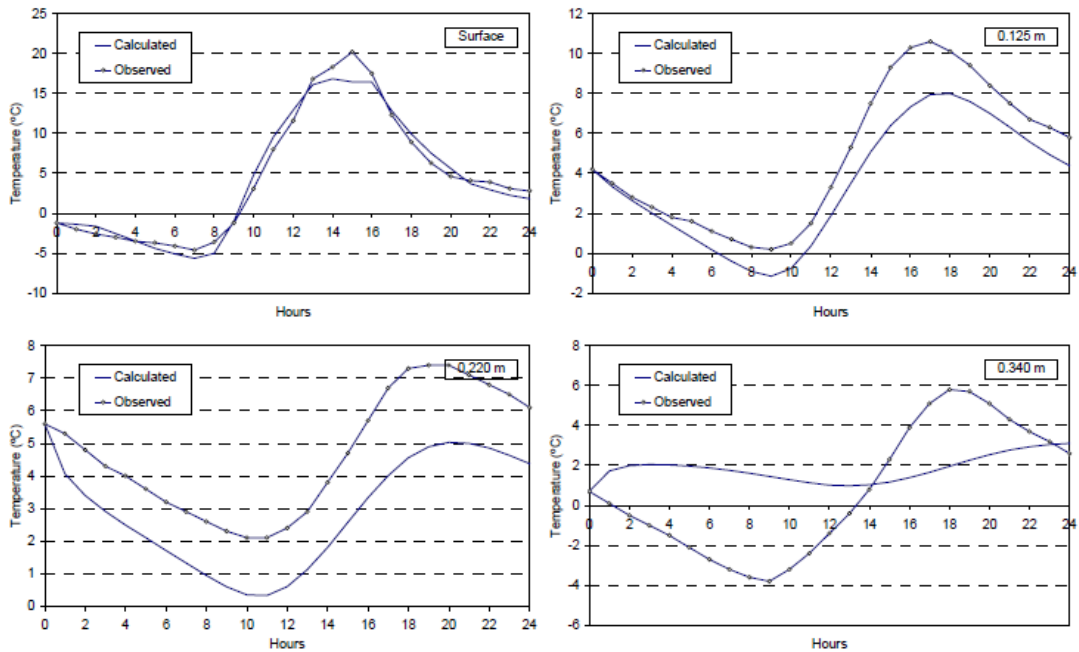
Figura 2- Gráfico de temperatura média mensal no pavimento versus temperatura a 0,125 pol. de profundidade acrescida da temperatura atmosférica média mensal



Fonte: Southgate e Deen (1968)

Já na pesquisa conduzida por Minhoto et al. (2006), foi desenvolvido um modelo 3-D em Elementos Finitos cujos resultados foram comparados com medições feitas em campo durante o ano de 2004, apresentando resultados satisfatórios. O modelo foi alimentado com valores de radiação solar e temperatura a cada hora e valores de velocidade do vento obtidos em uma estação meteorológica. Quanto à medição de temperaturas no pavimento, foram instalados termopares que faziam leituras em 7 diferentes profundidades. Na Figura 3, estão os resultados obtidos pela modelagem em 4 pontos situados a alturas diferentes plotados junto com as medições realizadas em campo no dia 02 de março de 2004.

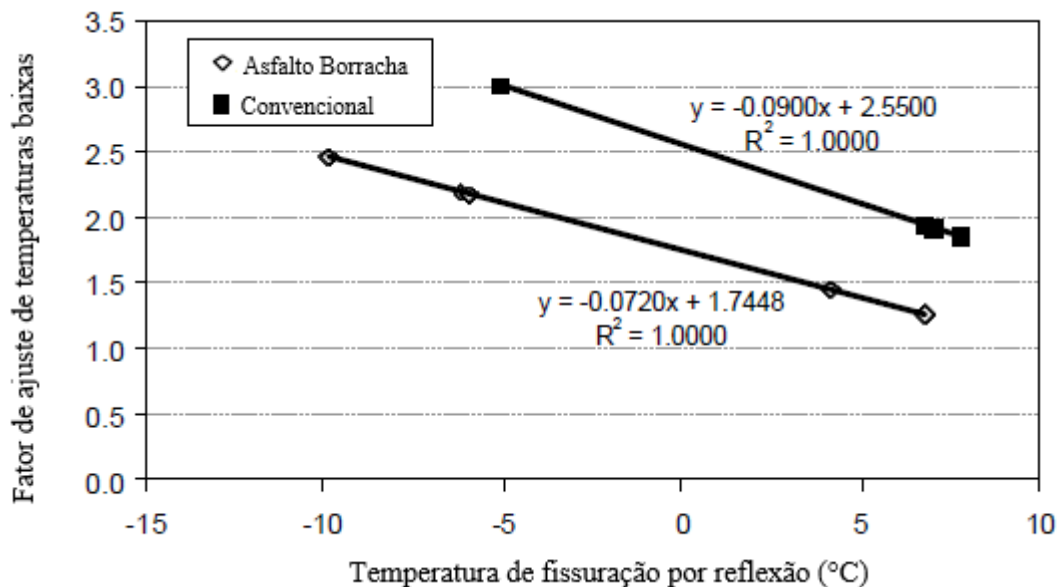
Figura 3 - Comparação entre resultados de campo e simulações com o MEF para o dia 02 de março de 2004



Fonte: Minhoto et al. (2006)

Também Sousa et al. (2002), em um empreendimento para desenvolver um método de dimensionamento de reforço de pavimentos considerando o fenômeno de reflexão de fissuras, levaram em consideração a influência da temperatura. Os autores chegam a ressaltar que o efeito das temperaturas baixas, considerado isoladamente, pode gerar maiores tensões de tração do que o efeito dos carregamentos advindos do tráfego. Para avaliar esses efeitos sobre as deformações calculadas pelo modelo, foi obtido um fator de ajuste da temperatura, conforme mostra a Figura 4, calculado a partir da temperatura de fissuração por reflexão, que foi arbitrada como sendo a média entre temperatura mínima do ar e a temperatura média do ar no mês em questão.

Figura 4 - Gráfico do fator de ajuste de temperaturas baixas em função da temperatura de fissuração por reflexão



Fonte: Adaptado de Sousa et al. (2002)

Alkasawneh et al. (2007), utilizando uma análise de múltiplas camadas em três dimensões, também analisaram a influência dos gradientes de temperatura ao longo da profundidade do pavimento. Ressaltando a influência do perfil de temperaturas na determinação deste parâmetro e reconhecendo que a grande maioria das pesquisas voltadas para análise do comportamento mecânico de pavimentos sempre considera um valor médio do módulo para cada camada, é de se esperar que os resultados estejam subestimando ou superestimando, dependendo das condições climáticas predominantes durante o ano, as propriedades do pavimento relacionadas à rigidez.

Segundo Alkasawneh et al. (2007, p. 203, tradução nossa),

Um estudo de local, ou mais apropriadamente, em âmbito estadual da variação de temperatura pode ser de importância significativa para engenheiros de pavimentos devido à variação nas condições ambientais e climáticas entre diferentes locais. Tais estudos podem prover informações que dizem respeito às suposições feitas durante a análise e projeto de pavimentos, assim, controlando a capacidade de carga e o custo associado a cada dimensionamento.

Ongel e Harvey (2004) citam que, para melhorar a acurácia dos resultados obtidos através de ensaios como o FWD e para melhor diagnosticar o estado dos pavimentos através de

retroanálise, é fundamental que se tenha conhecimento ou sejam obtidas de forma confiável as temperaturas em diferentes profundidades do pavimento e em todas as estações do ano.

No método de dimensionamento desenvolvido pelo NCHRP (National Cooperative Highway Research Program), o NCHRP 1-37A (NCHRP, 2004a), estão inclusos no software dados de temperatura coletados durante 5 anos. Contudo, em certas regiões, é necessário analisar a temperatura durante um período maior do que 5 anos para captar o comportamento térmico do microclima atuante no local do projeto. Além disso, há dados que não informavam em quais anos foram obtidos. Com isso, não se tem conhecimento se se tratava de um período mais quente ou mais frio, mais úmido ou mais seco que o padrão, o que certamente introduz tendências nos dados.

Tendo em vista essas limitações, Ongel e Harvey (2004) desenvolveram uma base de dados de 30 anos com temperaturas obtidas por meio do EICM (Enhanced Integrated Climate Model) para pavimentos típicos da Califórnia. Mais informações sobre o modelo serão apresentadas adiante na mesma obra.

A metodologia Superpave de dosagem também leva em conta *inputs* de temperatura em sua formulação. Ela surgiu nos Estados Unidos como fruto do programa de pesquisas SHRP (*Strategic Highway Research Program*) desenvolvido no final da década de 1980 e início dos anos 1990. O objetivo do programa era fomentar uma melhoria nos métodos de ensaio usados até então e nas especificações para ligantes e agregados e nos procedimentos de dimensionamento e análise de mistura asfálticas misturadas a quente.

O método possui uma base de dados com informações oriundas de 5.313 estações climáticas estadunidenses e 1.515 estações canadenses. Em cada uma dessas cidades, estão disponíveis os dados de temperatura máxima atmosférica média de 7 dias (calculada a partir da média das temperaturas dos 7 dias consecutivos mais quentes durante um ano) durante o ano e a mínima temperatura atmosférica anual. Com tais informações, pode ser selecionado o grau de performance (performance grade) do ligante mais adequado às influências climáticas do local (HUBER, 1994).

Esse processo de escolha do grau de performance, segundo Matic et al. (2012), ocorre do seguinte modo:

- a) A partir da temperatura máxima atmosférica média de 7 dias, obter a temperatura na superfície do pavimento;
- b) Calcular a temperatura máxima média de 7 dias do pavimento na profundidade de projeto;

- c) A partir da temperatura mínima atmosférica, obter a temperatura mínima na superfície do pavimento;
- d) Calcular a temperatura mínima do pavimento na profundidade de projeto.

A diferença entre a temperatura na superfície do revestimento e a temperatura atmosférica, dada em graus Celsius, é calculada em função da latitude do local, expressa em graus, e está representada na Equação 1:

$$T_{sup} - T_{ar} = -0,00618 \text{ lat}^2 + 0,2289 \text{ lat} + 24,4 \quad (1)$$

Para obter a temperatura no interior do pavimento (T_d), dada em graus Fahrenheit, multiplica-se a temperatura na superfície por um fator que é calculado a partir da profundidade, dada em polegadas, de acordo com a Equação 2:

$$T_d = T_{sup}(1 - 0,063d + 0,007d^2 - 0,0004d^3) \quad (2)$$

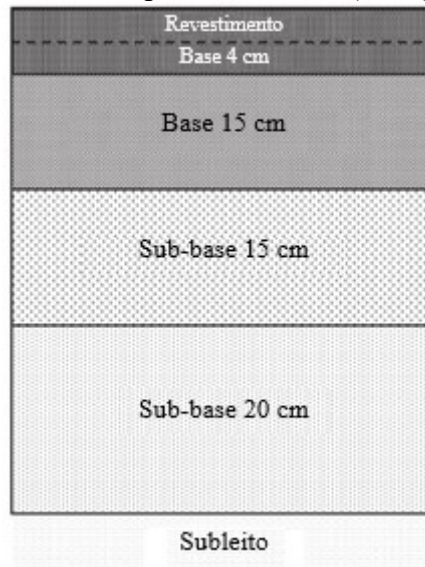
Convertendo as unidades das grandezas na Equação 2 para o S.I. e substituindo a Equação 1 na Equação 2, pode-se obter a fórmula contida no Superpave (Equação 3) para o cálculo da temperatura a 20 mm, que é a temperatura máxima de projeto.

$$T_{20mm} = (T_{ar} - 0,00618 \text{ lat}^2 + 0,2289 \text{ lat} + 42,2)(0,9545) - 17,78 \quad (3)$$

Matic et al. (2012), a partir de dados colhidos durante 9 anos consecutivos, fez um modelo baseado na análise de regressão dos mesmos. Com as equações obtidas, é possível prever a máxima e mínima temperatura do pavimento a partir das temperaturas máxima e mínima do ar durante o dia.

A estrutura usada pelos autores é de um pavimento semirrígido, que está esquematizado na Figura 5. O resultado da análise de regressão para a previsão da máxima temperatura no pavimento (Equação 4) apresentou coeficiente de regressão igual a 0,972651, enquanto expressão usada para obter a temperatura mínima do pavimento (Equação 5) teve coeficiente de correlação de 0,980397. O gráfico confrontando os resultados medidos e previstos está representado na Figura 6.

Figura 5 - Perfil do pavimento analisado por Matic et al. (2012)



Fonte: Adaptado de Matic et al. (2012)

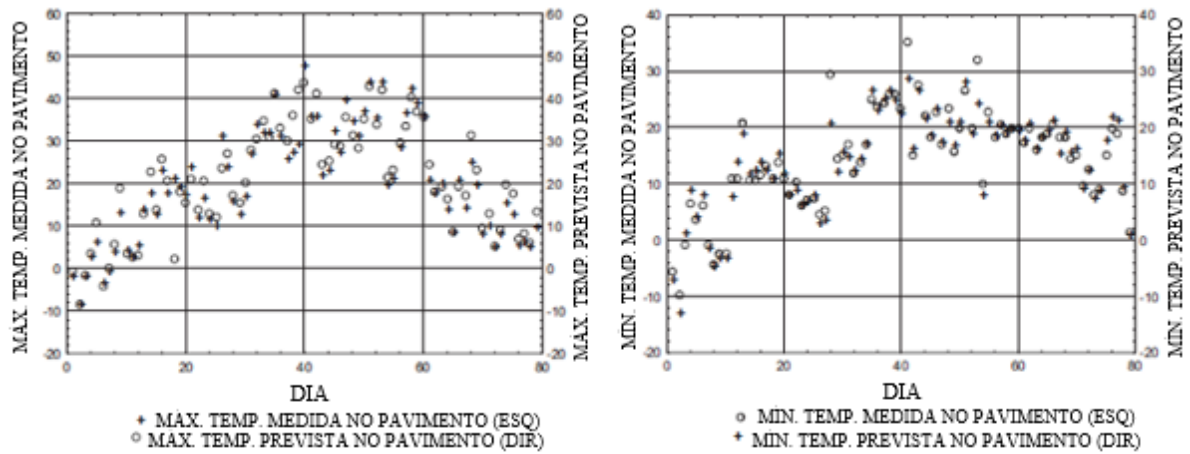
$$Y_{p,max} = 0,065567 + 1,268887 \cdot X_{a,max} \quad (4)$$

$$Y_{p,min} = 0,318933 + 1,10967 \cdot X_{a,min} \quad (5)$$

No Brasil, o trabalho de Previtera (1974) analisou as consequências que a temperatura ambiente tem nas deflexões dos pavimentos. Na mesma obra, o autor se propôs a obter perfis de temperatura na camada de revestimento do pavimento em função de fatores climáticos e, a partir disso, obter informações relevantes para prever o comportamento mecânico do concreto asfáltico. Nas conclusões, observou que as deflexões medidas no centro de cargas chegaram a ser três vezes maiores no verão do que no inverno, em função da diminuição da rigidez da mistura asfáltica em função da temperatura.

Analisando trabalhos mais próximos à região de Santa Maria, Killp (2004) também estudou a influência da temperatura atmosférica sobre o perfil de temperaturas do pavimento. Nas cidades de Ijuí e Sobradinho, localizadas no Rio Grande do Sul, foram feitas medições na superfície do revestimento asfáltico, a 2cm e a 5cm de profundidade, tanto em locais com sombra como expostos ao sol com o objetivo de gerar modelos para calcular a temperatura de pavimentos válidos para todo o estado.

Figura 6 - Comparação entre valores medidos e previstos



Fonte: Adaptado de Matic et al. (2012)

A partir das medições feitas, foram desenvolvidos modelos globais a partir das coletas realizadas nos dois municípios que podem ser utilizados em outras regiões de clima subtropical (KILLP, 2004). Seguem as Equações 6 a 8, para as temperaturas máximas na superfície, a 2cm e a 5cm de profundidade, respectivamente.

$$T_{sup} = -0,72 + 1,34T_{ar} \quad (6)$$

$$T_{2\text{ cm}} = -2,10 + 1,48T_{ar} \quad (7)$$

$$T_{5\text{ cm}} = -1,39 + 1,48T_{ar} \quad (8)$$

Para as temperaturas mínimas, foram obtidas as Equações 9, 10 e 11:

$$T_{sup} = 0,78 + 1,11T_{ar} \quad (9)$$

$$T_{2\text{ cm}} = 1,98 + 1,09T_{ar} \quad (10)$$

$$T_{5\text{ cm}} = 1,60 + 1,12T_{ar} \quad (11)$$

Blass (2011) também desenvolveu um trabalho semelhante ao feito de Minhoto (2006) em Portugal. Este monitorou a temperaturas em diferentes profundidades de um pavimento localizado no Laboratório de Engenharia Civil da Unijuí e os valores obtidos em campo foram comparados com resultados gerados por um modelo em elementos finitos. Mais detalhes sobre a abordagem feita pelo autor serão mostrados no capítulo seguinte do presente trabalho.

2.2 TEMPERATURA E CLIMA NO BRASIL E RIO GRANDE DO SUL

Segundo Moraes (2001), o clima de um determinado local é o conjunto de estados atmosféricos ao longo do tempo. Isto é, as informações referentes à precipitação, temperatura e todas as demais variáveis meteorológicas em um período de tempo constituem o clima de um determinado local.

Dada a extensão territorial do Brasil, diversas variáveis levam a uma imensa variedade de climas por todo o território nacional, tais como: posição geográfica, latitude, configuração do território e sistemas atmosféricos. Segundo o mesmo autor, 92% do território brasileiro se encontra na zona intertropical e os 8% restantes, compreendendo quase a totalidade da região Sul do país, estão na zona temperada. Pode-se observar na Figura 7 os principais climas zonais atuantes no Brasil e sua correlação com as massas de ar que atuam no território (MORAES, 2001, p.105-106).

Seguindo a abordagem de Moraes (2001), os principais climas atuantes no território brasileiro são:

- Equatorial (úmido e semiúmido): apresenta temperaturas altas, na média de 24 °C a 26 °C, que não variam muito ao longo do ano. Tem níveis de precipitação acima de 2.000 mm sem estação seca. Atua na região amazônica;
- Tropical: apresenta uma estação chuvosa e outra seca, configurando, assim, o verão e o inverno, respectivamente, como estações bem definidas. As médias anuais acercam os 22 °C e os índices pluviométricos ficam em torno de 1.500 mm. Abrange a maior parte do território do Brasil;
- Tropical de altitude: clima que apresenta grande influência do relevo e, por isso, exhibe médias mais amenas que o clima tropical mais comum no país. As médias giram entre 17 °C e 22°C e a precipitação anual também beira os 1.500 mm. É comum em regiões de maior altitude na região Sudeste;
- Tropical úmido: clima quente e úmido. Tem médias térmicas em torno de 25 °C e médias pluviométricas entre 1.250 mm e 2.000 mm. Aparece em regiões litorâneas;
- Semi-árido: é um clima quente e seco. Suas temperaturas ficam com médias entre 26 °C e 28°C e apresenta menos de 750 mm de chuva ao longo do ano. É característico do sertão nordestino;

- Subtropical: é o clima com as maiores amplitudes térmicas do país. Tem chuvas distribuídas ao longo do ano todo mas que predominam no verão. As médias térmicas giram em torno de 18 °C e os índices pluviométricos são superiores a 1.250 mm. É o clima típico do Sul do Brasil.

Analisando os dados climáticos referentes à cidade de Santa Maria entre os anos de 2007 e 2018, pode-se perceber que a variabilidade da temperatura e as médias coincidem com a descrição do clima subtropical apresentada por Moraes (2001). Os dados estão indicados no Quadro 1 e foram obtidos a partir de registros do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

Figura 7 - Mapa climático do Brasil



Fonte: IBGE (2019)

Quadro 1 - Temperaturas máxima média, compensada média e mínima média de Santa Maria entre 2007 e 2018

Ano	T. Máx. Média (°C)	T. Compensada média (°C)	T. Mín. Média (°C)
2007	25,30	19,25	14,76
2008	25,34	19,05	14,30
2009	25,29	18,98	14,31
2010	25,21	19,21	14,69
2011	25,36	19,10	14,50
2012	26,74	20,13	15,23
2013	25,23	18,86	14,13
2014	26,01	20,07	15,63
2015	25,57	19,93	15,87
2016	25,09	19,05	14,80
2017	26,30	20,17	15,78
2018	25,21	19,46	15,08
MÉDIA	25,55	19,44	14,92

Fonte: Dados da Rede do INMET

2.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

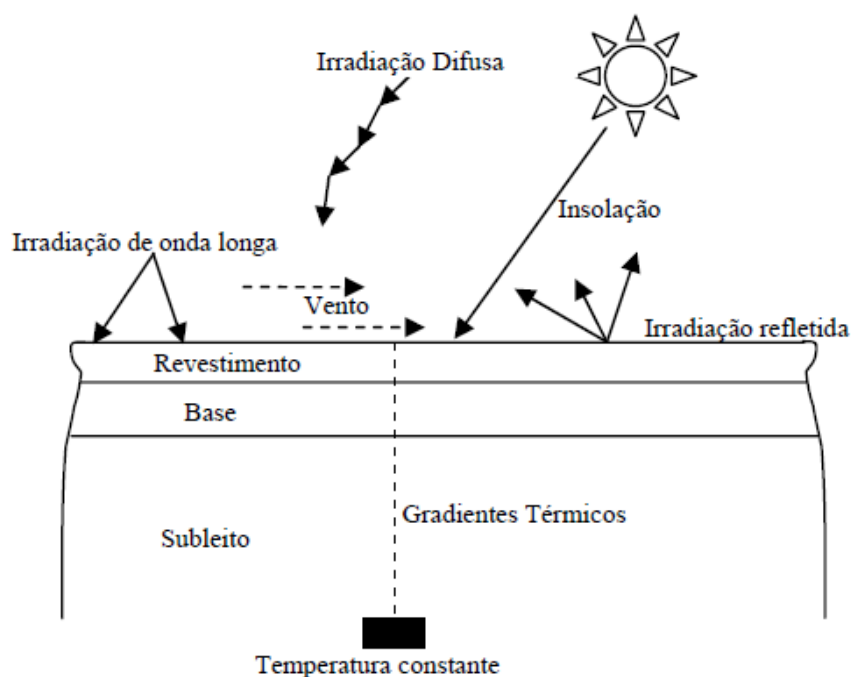
Pode-se considerar que o equilíbrio térmico de um conjunto de sistemas é o estado que caracteriza a ausência das variações das temperaturas destes. Ou seja, quando diversos corpos, a diferentes temperaturas, interagem termicamente, suas temperaturas se aproximarão cada vez mais de um valor comum após um certo tempo. Considerando que essa situação ideal fosse atingida, ter-se-ia um estado ideal de equilíbrio térmico (HALLIDAY et al., 2003).

Quando um sistema está desequilibrado termicamente, ocorre a transferência de calor, que, segundo Bergman et al. (2014), pode ser conceituada como sendo o fluxo de energia térmica, que ocorre sempre em função de uma diferença de temperatura entre pontos diferentes no espaço.

Wolfe et al. (1995) salienta como os fenômenos térmicos estão presentes de forma constante na estrutura de um pavimento. Como pode-se observar na Figura 8, a fonte de toda energia térmica em todos os processos é o sol, que transmite sua energia à superfície da Terra por meio da radiação. Essa radiação, por sua vez, pode ser direta, no caso de regiões expostas

diretamente, ou difusa, como é o caso das partes do pavimento que ficam na sombra e recebem a luz que é refletida no ambiente. Além disso, é necessário contabilizar no balanço térmico a radiação emitida pelo próprio asfalto, as ondas de onda longa provenientes do ar e a temperatura do ar e velocidade do vento, que influirão diretamente na quantidade de energia que será transmitida para o pavimento. Analisando o interior da estrutura do pavimento, percebe-se que, a partir de certa profundidade do subleito, pode-se considerar que a temperatura se mantém constante, pois a energia térmica proveniente da atmosfera já se dissipou até chegar nesse ponto. E, por fim, no meio desse percurso, onde estão compreendidas as demais camadas do pavimento, se formam gradientes térmicos, ou seja, variações da temperatura ao longo da profundidade que, segundo Medina (1997), podem gerar movimento de água em forma de vapor.

Figura 8 - Trocas térmicas presentes em um pavimento



Fonte: Adaptado de Wolfe et al. (1995)

Segundo Minhoto et al. (2005), em sua análise a respeito da influência da temperatura no desempenho de reforços de pavimentos, a influência da variação de temperatura é mais relevante que a ação do tráfego para pavimentos de maior espessura.

A transferência de calor pode se dar por intermédio de três processos:

- Condução: a condução é a transferência de calor que ocorre de átomo para átomo ou de molécula para molécula sem que haja movimentação relativa entre eles (TIPLER e MOSCA, 2009). Hellmann (2008), em sua dissertação, determinou a condutividade térmica de diversas misturas asfálticas com diferentes tipos e teores de ligantes, volumes de vazios. Para maiores informações, consultar a obra.
- Convecção: conforme Halliday et al. (2003), a convecção ocorre quando um fluido (em estado líquido ou gasoso), entra em contato com uma superfície a uma temperatura maior. Essa diferença de temperatura gera uma dinâmica no fluido em função da alteração em sua densidade, fazendo com que as regiões mais quentes ascendam e as mais frias descendam. Com isso, ocorre a transferência de energia térmica. Tramontini (2007), após analisar a influência que a condutividade térmica, calor específico e coeficiente de convecção do ar sobre a temperatura de pavimentos flexíveis e rígidos, chegou à conclusão de que o coeficiente de convecção tem influência bem maior que as outras variáveis.
- Radiação: de acordo com Tipler e Mosca (2003), todos os corpos emitem uma radiação eletromagnética quantificada pela Equação 12, também chamada de lei de Stefan-Boltzmann:

$$P_r = e\sigma AT^4 \quad (12)$$

Onde

P_r = potência irradiada

e = emissividade, com valores entre 0 e 1

σ = constante de Stefan, que é igual a $5,6703 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

A = área da superfície

T = temperatura absoluta do corpo

Segundo Motta (1991), o principal fator causador de fluxo de calor dentro da estrutura do pavimento e através do pavimento é a radiação proveniente do sol. Esse fator é influenciado, disserta a autora, pela sazonalidade, pela localização geográfica do local e pela altitude.

2.4 CONSIDERAÇÃO DA TEMPERATURA EM DIFERENTES MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

Tendo em vista tudo o que foi exposto a respeito da influência da temperatura no desempenho de pavimentos, será feita uma breve exposição relativa à sua consideração em métodos de dimensionamento no Brasil e em outros lugares do mundo.

2.4.1 Métodos de dimensionamento norte-americanos

Nessa seção, serão analisadas as abordagens de dois diferentes métodos de dimensionamentos americanos quanto à sua consideração da temperatura.

2.4.1.1 *Guia de Dimensionamento da AASHTO (1993)*

O material publicado pela AASHTO em 1993 veio como uma revisão do Guide for the Design of Pavement Structures, que é, em grande parte, baseado nas pistas de teste da antiga AASHO (American Association of State Highway Officials). A abordagem feita a partir das medições nas pistas de teste será abordada mais adiante, na subseção que trata do método do DNER no Brasil.

A partir da revisão realizada, foram incluídos diversos fatores e, dentre eles, foram feitas considerações para computar as variações sazonais das variáveis climáticas no desempenho dos pavimentos. As duas principais variáveis levadas em conta foram temperatura e precipitação. (AASHTO, 1993).

Contudo, percebe-se que foram feitas considerações de temperatura voltadas somente na questão de prever o comportamento dos pavimentos ante os ciclos de congelamento e descongelamento. O método não incorporou nenhuma entrada de dados que considerasse a temperatura ambiente para corrigir as propriedades mecânicas dos materiais usados na pavimentação.

2.4.1.2 MEPDG

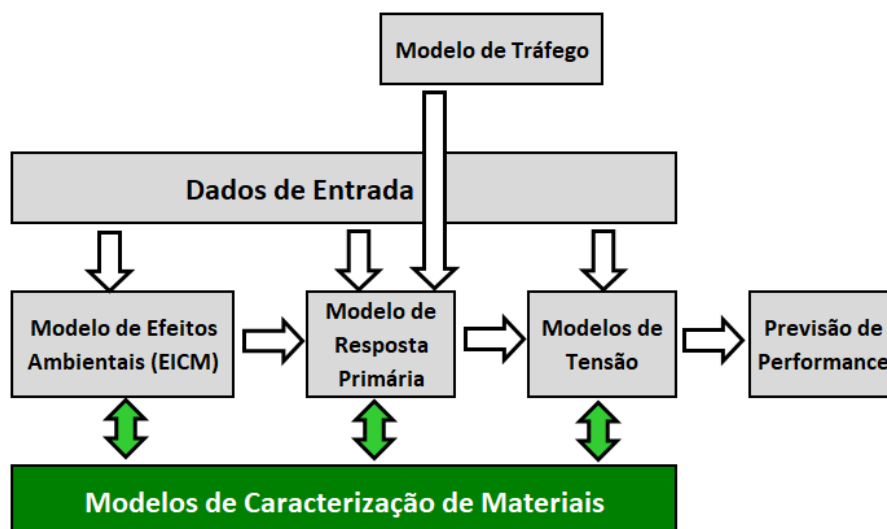
Durante anos, os dados colhidos na pista de testes da AASHO foram de suma importância na compreensão do comportamento de pavimentos e, fundamentado nisso, a AASHTO (*American Association of Highway and Transportation Officials*), herdeira da AASHO, desenvolveu métodos de dimensionamento (LI et al., 2011)

Entretanto, conforme continuam os autores a dissertar, os dados usados no desenvolvimento de tais métodos foram de base empírica, ou seja, foram obtidos para um tipo específico de solicitações, para uma envoltória específica de fatores climáticos de uma região específica e com materiais de pavimentação específicos. Tendo em vista essas limitantes, era necessário que fosse dado um passo em direção a modelos de natureza mais mecanística, que abrangessem todas as possíveis variáveis que podem atuar em diferentes estruturas de pavimentos sujeitos a condições ambientais várias.

Com esse cenário, o NCHRP, após anos de pesquisa, desenvolveu o guia mecanístico-empírico para dimensionamento de pavimentos (MEPDG). O novo método traz uma análise muito mais próxima de cada realidade de dimensionamento corrente pelo mundo, mas, por outro lado, como Li et al. (2011) afirmam, demanda uma quantidade muito maior de dados de entrada por parte do projetista, que pode enfrentar desafios como: ausência de medições em certos locais, inacessibilidade de tais medições caso existam ou necessidade de pré-processamento desses dados antes de alimentarem o programa. Um desses dados de entrada é o modelo para previsão de efeitos ambientais, o EICM.

O *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM) é um programa voltado para a modelagem de efeitos climáticos em pavimentos desenvolvido pela Universidade de Illinois que foi utilizado no método de dimensionamento elaborado pela NCHRP (ONGEL e HARVEY, 2004). O método recebe dados de entrada dos materiais, do tráfego e do clima (onde entra o EICM) e realiza interações entre as informações, gerando as respostas estruturais e a previsão de performance do pavimento, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Interações presentes no MEPDG



Fonte: Adaptado de NCHRP (2004a)

Alkasawneh et al. (2007) definem o EICM como sendo um programa que traz a modelagem tanto de fluxo de calor como de umidade e, a partir de dados coletados durante vários anos, pode prever diversos parâmetros de um pavimento, tais como: temperatura, fatores de ajuste do módulo de resiliência, poropressão, umidade, congelamento e performance de drenagem ao longo do perfil do pavimento

Os dados de entrada do EICM referentes ao ambiente para pavimentos flexíveis novos são (NCHRP, 2004a):

- Mês e ano de conclusão de camadas de base e subleito: o programa inicia a modelagem do fluxo de umidade na estrutura do pavimento a partir deste momento e corrige os valores dos módulos à medida que é atingida uma umidade de equilíbrio;
- Mês e ano da construção do pavimento: necessário para o cálculo das rigidezes e parâmetros de resistência dos materiais;
- Mês e ano da abertura ao tráfego: determina as condições climáticas iniciais da utilização do pavimento e, subsequentemente, os gradientes de temperatura e os módulos de cada camada;
- Dados horários de temperatura do ar: usado na equação de balanço de calor para obter os valores de radiação de ondas longas emitidas pelo ar e para obter o calor transferido por convecção entre a superfície do revestimento e o ar;

- Dados de precipitação: usados para computar informações referentes ao envelhecimento do ligante;
- Dados horários de velocidade do vento: informação essencial para o cálculo do coeficiente de transferência de calor na superfície do pavimento;

A partir do processamento interno do programa, pode-se citar os seguintes dados de saída, que são pertinentes para o presente trabalho:

- Dados horários de temperatura na superfície e em incrementos de profundidade (a cada polegada)
- Fatores de ajuste para o módulo de resiliência dos materiais granulares e solos

2.4.2 Métodos de dimensionamento nacionais

Será abordado, nessa seção, acerca da consideração da temperatura em métodos de dimensionamento brasileiros.

2.4.2.1 Método de dimensionamento do DNER

No método de dimensionamento do DNER, proposto pelo Engenheiro Murillo Lopes de Souza em 1981, foram adotados diversos fatores para o cálculo do número N de solicitações do eixo-padrão ao longo do período de projeto de um pavimento.

Dentre eles, está o fator climático regional (FR), que, segundo Souza (1981), tem a função de levar em conta as variações de umidade dos materiais ao longo do ano, reduzindo, assim, sua capacidade de carga. Segundo o autor, nas pistas experimentais da AASTHO, tal coeficiente variou entre 0,2, para casos em que havia pouca umidade ambiente, até 5,0, em casos de influência significativa da umidade.

Fora este fator, não há mais nenhuma menção a fatores ambientais no método. Ou seja, conclui-se que não foram considerados fatores térmicos no projeto de pavimentos segundo o método do DNER.

2.4.2.2 *Método da Resiliência*

A metodologia proposta em 1996 no Manual de Pavimentação – IPR 697 pelo DNER prevê um aprimoramento do método proposto por Souza (1981). A limitação imposta à espessura da camada granular e uma maior rigidez quanto ao uso de solos argilosos com baixo grau de resiliência foram previstas para considerar o efeito de fadiga devido à parcela elástica nas deformações do pavimento.

Contudo, assim como o método anteriormente utilizado, não há considerações de fatores climáticos referentes à temperatura.

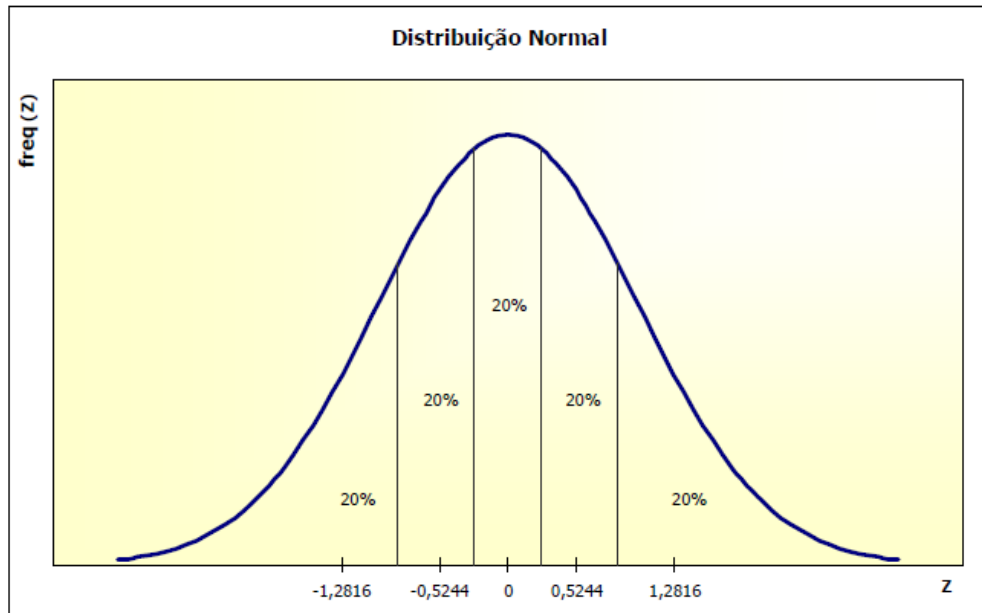
2.4.2.3 *SisPav*

Franco (2007) propôs um método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos que considerou análise elástico linear e elástico não linear e utilizou modelos de previsão de fadiga, deformação permanente e deformação máxima admissível no topo do subleito para prever o dano.

Ao contrário dos métodos previstos anteriormente pelo DNER, o SisPav possui em sua interface um espaço onde são considerados os fatores climáticos referentes à temperatura. Caso o local de projeto não esteja no banco de dados interno do programa, podem ser inseridas manualmente, pelo projetista, as informações.

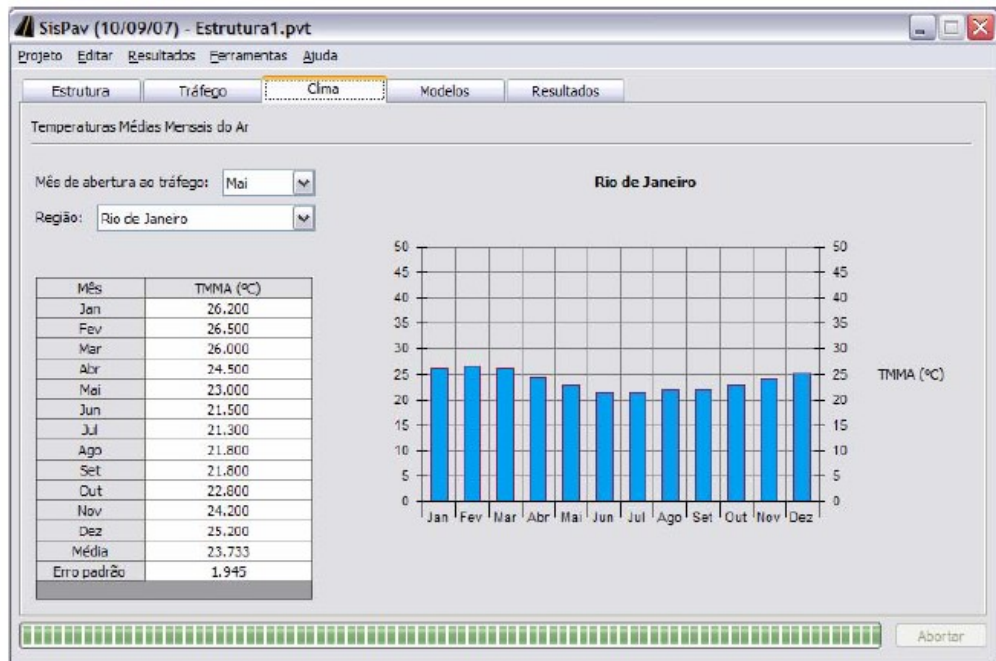
Nos cálculos executados pelo algoritmo do SisPav, são consideradas quatro estações climáticas, que são divididas em cinco sub-períodos. Em cada um dos sub-períodos, são estimadas as temperaturas no revestimento e, conseqüentemente, o módulo de resiliência da camada asfáltica. Na Figura 10, extraída do trabalho de Ayres (1997) e citado por Franco (2007), são mostradas as distribuições de probabilidades utilizadas para realizar a distribuição das temperaturas nos sub-períodos. Na Figura 11, está representada a tela do programa onde são selecionados ou inseridos os dados de temperatura do local do projeto.

Figura 10 - Distribuição de frequências de temperaturas no interior do pavimento



Fonte: Ayres (1997)

Figura 11 - Tela do SisPav referente ao clima



Fonte: Franco (2007)

2.4.2.4 MeDiNa

Será dedicada uma subseção somente para a descrição do MeDiNa, que é uma versão do SisPav. Porém, pode-se afirmar que, ainda que o método tenha substanciais melhorias quando comparado à abordagem empírica dos métodos atualmente usados no Brasil, ele ainda não considera dados de temperatura. Tendo em vista que o revestimento não tem *inputs* advindos do ensaio de módulo complexo, não há a consideração da variação da temperatura e frequência de cargas sobre o comportamento do material betuminoso.

2.5 MECÂNICA DE PAVIMENTOS

Nessa seção, será exibida uma revisão acerca dos pressupostos que fundamentam as metodologias de análise de pavimentos usadas neste trabalho.

2.5.1 Sistema de camadas

Segundo a definição clássica apresentada por Balbo (2007), os pavimentos são sistemas de camadas que têm como função estrutural transmitir os esforços, de maneira atenuada, até a fundação. À medida que o fluxo de cargas passa pelo corpo da estrutura, é mister que cada camada apresente espessuras e rigidezes que possibilitem a compatibilização das deformações, de modo que não haja processos de danificação e ruptura de forma precoce.

Pode-se dizer que a vida útil de um pavimento é consequência do seu comportamento estrutural enquanto um sistema de camadas. Por isso, o bom projeto de pavimentos é aquele que especifica espessuras e materiais para cada camada de modo que as respostas de tensões, deformações e deslocamentos seja satisfatória (BERNUCCI et al., 2010).

Balbo (2007) também declara que as interações que ocorrem entre as solicitações do tráfego e os materiais de pavimentação devem levar em conta que o pavimento é um sistema de camadas com propriedades reológicas distintas e que responde, de forma monolítica, às cargas advindas do tráfego.

A transmissão de cargas que ocorre entre uma camada e outra depende das condições de contorno presentes na interface entre as camadas. Conforme Mangiafico (2014), essas condições oferecem diferentes graus de aderência entre as camadas. Sendo assim, a flexão causada pela passagem de veículos gerará uma distribuição de tensões de tração e compressão ao longo da profundidade que dependerá de tais condições de contorno.

Os estudos relacionados à determinação de tensões devido a cargas em meios homogêneos se devem a Joseph Boussinesq (1842-1929). Contudo, segundo Medina (1997), as equações desenvolvidas por Boussinesq conduzem a resultados de deflexões diferentes daqueles medidos em campo.

Dado que o fenômeno de fadiga está relacionado ao surgimento de tensões de tração na camada de revestimento, era fundamental que fosse realizada uma abordagem que pudesse prever com maior acurácia o comportamento elástico de pavimentos.

Nesse contexto, Burmister (1943, 1945) propôs suas teorias acerca de Teoria da Elasticidade aplicada a meios estratificados, para 2 e 3 camadas, com o propósito de dimensionar fundações de pavimentos de aeródromos. Tal teoria considera um módulo de elasticidade distinto para cada camada, o que se aproxima mais da realidade de um pavimento.

A abordagem de Burmister considerou a aplicação de uma carga em área circular. Por isso, as equações são expressas em coordenadas cilíndricas. As Equações 13 a 15 descrevem as equações de tensão nas direções radial, tangencial e vertical, respectivamente, e a Equação 16 descreve a expressão encontrada para o deslocamento vertical total.

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right) \quad (13)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \nabla^2 \varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \quad (14)$$

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2 - \mu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right] \quad (15)$$

$$W_r = \frac{1 + \mu}{E} \left[2(1 - \mu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right] \quad (16)$$

Onde

φ = função de tensão

E = módulo de elasticidade

No sistema de camadas adotado em estruturas de pavimentos flexíveis, a camada que requer maior atenção é a do revestimento. Segundo Balbo (2007), é essa camada a responsável

por absorver o carregamento do tráfego e precisa, por isso ter um desempenho satisfatório em termos de comportamento mecânico para que sejam contidas as deformações plásticas e elásticas, dentre outros fatores.

O presente trabalho, no restante da subseção, se dedicará ao comportamento mecânico da camada de revestimento.

2.5.2 Rigidez de misturas asfálticas

Segundo diversos autores, como Kim (2009) e Anderson et al. (1994), a rigidez de misturas asfálticas é uma propriedade de valor inestimável para compreender o desempenho de pavimentos asfálticos.

Pode-se dizer que a rigidez é uma propriedade intrínseca do material e que corresponde à inclinação da curva no gráfico de tensão-deformação. Afirmar que se trata de algo intrínseco do material significa que ela não depende dos métodos de ensaio utilizados para ser obtida nem das características geométricas do corpo de prova. Desse modo, é possível descrever o material numa abordagem que se aproxima mais do modelo mecanístico e, conseqüentemente, pode-se descrever uma gama maior de situações às quais os pavimentos estarão expostos em campo.

Ainda segundo o mesmo autor, diversas modalidades de ensaio com padrões vários de carregamento podem ser utilizados para se obter a rigidez de misturas asfálticas. Pode-se citar:

- a) Carregamento monotônico (tanto de deformação controlada como de tensão controlada)
- b) Varredura de frequência
- c) Propagação de ondas e impulsos
- d) Cargas repetidas
- e) *Creep*
- f) Relaxação

Pode-se dizer que o asfalto é um material reológico. Ou seja, sua rigidez é uma função da temperatura e da frequência de carregamento.

2.5.2.1 *Influência da temperatura na rigidez de misturas asfálticas*

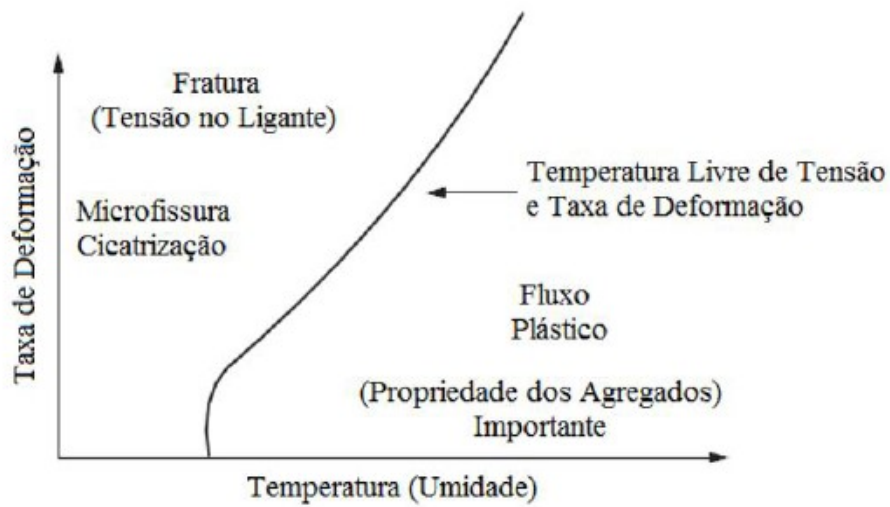
Conforme será abordado mais adiante, a temperatura e a frequência de aplicação de cargas podem ser agrupados em um único parâmetro através do princípio de superposição tempo-temperatura. Por isso, ainda que o foco do presente trabalho seja na influência da temperatura sobre os compostos betuminosos, a frequência também entrará nessa parte da revisão.

É evidente que as propriedades relacionadas à rigidez de materiais betuminosos estão intimamente ligadas à temperatura e à taxa da aplicação de cargas. À medida que o asfalto aumenta sua temperatura, sua rigidez diminui e, quando diminui a temperatura, a rigidez aumenta. Quando submetido a uma frequência maior de aplicação de cargas, enrijece e, quando exposto a cargas mais lentas, sua rigidez cai. (ALKASAWNEH et al., 2007; KIM, 2009; MANGIAFICO, 2014)

Desde Hveem (1955), já era perceptível que a abordagem de aplicações monotônicas de cargas não era suficiente para descrever o comportamento mecânico do concreto asfáltico. Conforme o autor relata, seria necessário desenvolver, futuramente, métodos de dimensionamento que levassem em conta, dentre outros fatores, a magnitude e a repetição (frequência) das cargas.

Declara Kim (2009) que, a qualquer temperatura, as misturas asfálticas deformam de modo permanente se submetidas a uma aplicação lenta de carregamento e se enrijecerão tendendo à fratura, quando submetidas a carregamentos de maior frequência. Além disso, para qualquer taxa de aplicação de cargas, haverá uma temperatura acima da qual o asfalto aliviará suas tensões de modo que não acumulará dano. A visualização gráfica disso pode ser expressa na Figura 12.

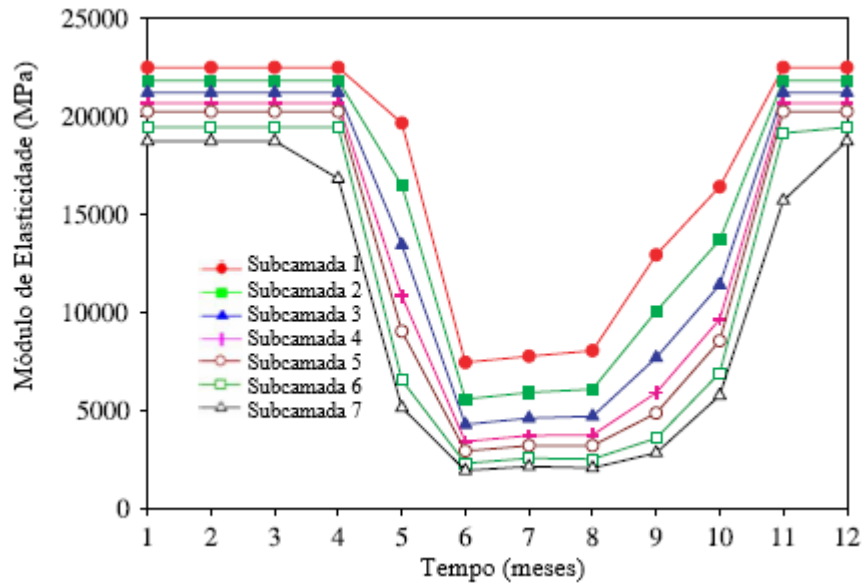
Figura 12 - Dano sofrido em misturas asfálticas em função do estado de temperatura e taxa de deformação



Fonte: Adaptado de Kim (2009)

Coree et al. (2005), usando o *output* de dados obtido a partir do MEPDG, simulou a variação do módulo de resiliência em diferentes subcamadas do revestimento ao longo do ano. Segundo análise posterior destes resultados feita por Alkasawneh et al. (2007), os resultados mostraram uma redução de 2 a 3 vezes dos valores de rigidez em função das variações climáticas para diferentes subcamadas do revestimento asfáltico, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Variação anual do módulo de resiliência em função da temperatura



Fonte: Adaptado de Alkasawneh et al. (2007) a partir dos dados de Coree et al. (2005)

Conforme Alkasawneh et al. (2007), diversos autores obtiveram equações para previsão do módulo de resiliência a partir de ensaios em laboratório e/ou procedimentos de campo. Dentre eles, pode-se citar Ullidtz (1987), Witczak (1989), Janoo e Berg (1991) e Ali e Lopez (1996), cujos modelos estão representados, respectivamente, pelas equações 17 a 20. O gráfico comparativo entre os modelos está representado na Figura 14.

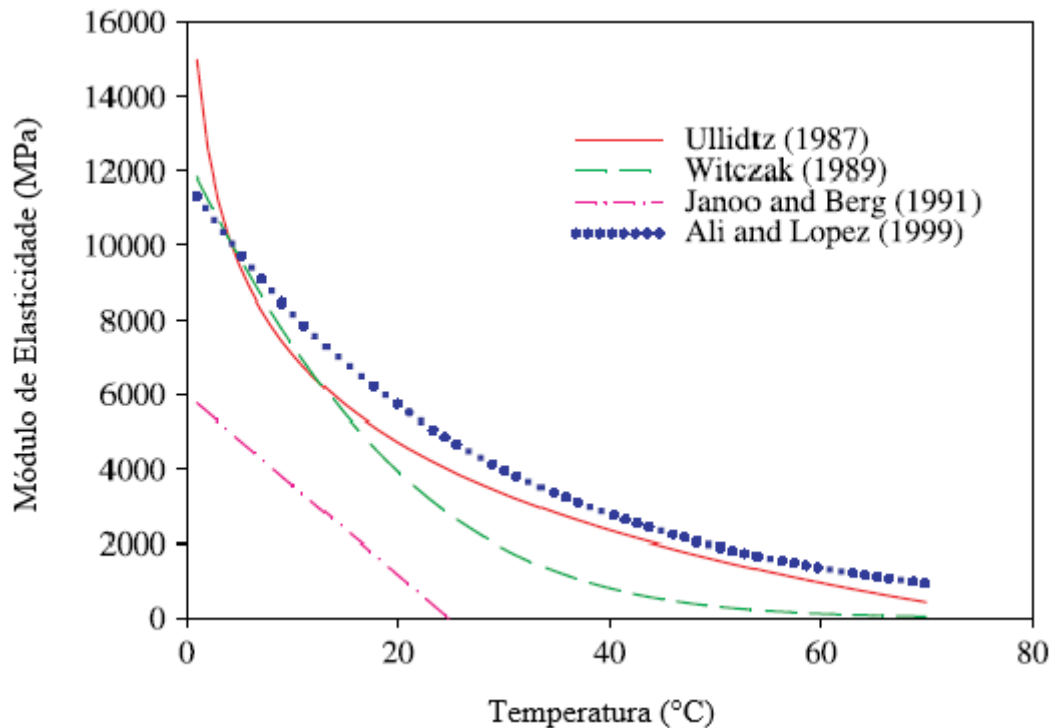
$$E = 1.500 - 7.900 \log(T) \quad (17)$$

$$\log(E) = 6,53658 - 0,006447 T - 0,00007404 T^2 \quad (18)$$

$$E = 5.994 - 242 T \quad (19)$$

$$E = \exp(9,37196 - 0,03608145 T) \quad (20)$$

Figura 14 - Comparação de modelos da variação do módulo de resiliência em função da temperatura



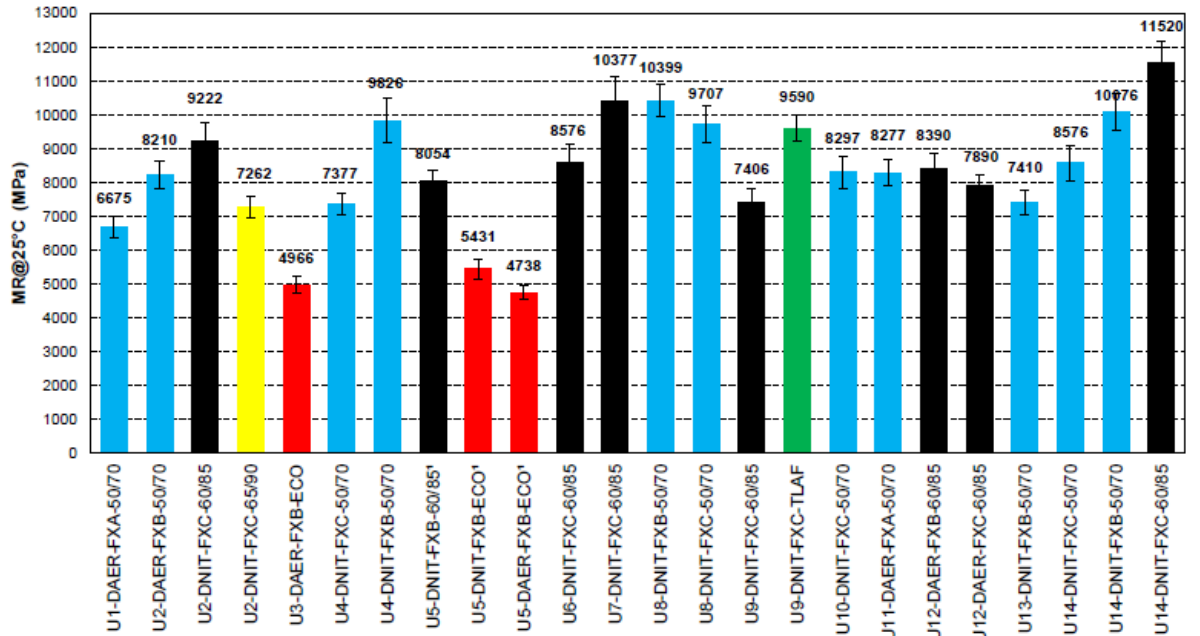
Fonte: Alkasawneh et al. (2007)

Comparando os valores de módulo de resiliência (MR) acima apresentados com resultados obtidos no Rio Grande do Sul, percebe-se que tais equações conduzem a valores de rigidez muito reduzidos. Faccin (2018) analisou misturas asfálticas oriundas de diferentes localidades do estado a 25 °C (Figura 15) e obteve valores entre 4.738 e 11.520 MPa para o MR com média de 8.260 MPa. Para mais detalhes sobre a análise, recomenda-se consultar a obra de Faccin (2018).

Mangiafico (2014) declara que a temperatura, a amplitude das deformações e o N (que simula o carregamento proveniente do tráfego rodoviário) são fatores que influenciam o desempenho do asfalto. Na Figura 16 e na Figura 17, pode-se observar os diferentes domínios de comportamento mecânico que os compostos asfálticos apresentam para um mesmo número de solicitações (Figura 16) variando a temperatura e a deformação e para uma mesma temperatura variando o número N e a deformação sofrida (Figura 17).

Conforme pode-se observar na Figura 16, para temperaturas baixas, sobretudo valores abaixo de T_g (ponto de vitrificação do ligante) e pequenas deformações, o asfalto apresenta comportamento elástico linear, isto é, pode ser descrito apenas a partir de seu módulo de resiliência, sem apresentar comportamento viscoso. Nesse domínio, o composto se mostra mais frágil e suscetível à falha por trincamento térmico ou por fadiga.

Figura 15 - Valores de MR de misturas asfálticas do RS a 25 °C



Fonte: Faccin (2018)

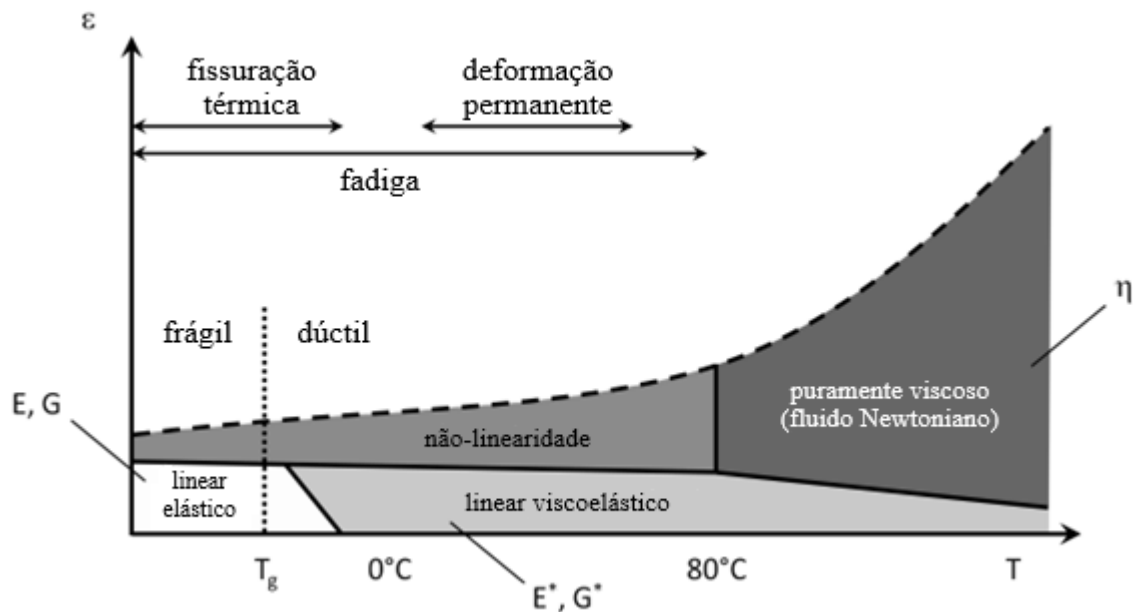
Contudo, à medida que a temperatura aumenta, a parcela viscosa começa a ter maior representatividade nas respostas do material e o comportamento passa a ser descrito como viscoelástico. Quanto maior a temperatura, o material tende a apresentar maiores deformações permanentes devido à sua elevada ductilidade. Assim, parâmetros puramente elásticos já não conseguem captar a gama de comportamentos que o material apresenta frente a diferentes envelopes de temperatura e frequência de cargas, sendo necessário recorrer a outros parâmetros para caracterização, como o módulo complexo. Pode-se observar, também, que para deformações elevadas, a resposta às solicitações passa a ser não-linear, quer dizer, a transformação de tensões em deformações deixa de ser uma transformação linear, conforme será pormenorizado adiante. Segundo Mangiafico et al. (2017), esse valor limite entre comportamento linear e não-linear é de cerca de 1% para misturas asfálticas.

Conforme Kim (2009), materiais asfálticos apresentam comportamento Newtoniano apenas a grandes temperaturas, acima do ponto de amolecimento ou a baixas taxas de cisalhamento, o que é de rara ocorrência em campo.

Analisando a Figura 17, percebe-se que o comportamento linear viscoelástico ocorre apenas para um número limitado de solicitações e para uma amplitude de deformações pequena.

Aumentando-se o número de ciclos de carga, o material passa a se danificar por fadiga e, aumentando a amplitude das deformações, entra-se no comportamento não-linear. Combinando-se um aumento tanto do número N como da amplitude de deformações, a mistura atinge o comportamento viscoplástico e sofre deformações permanentes.

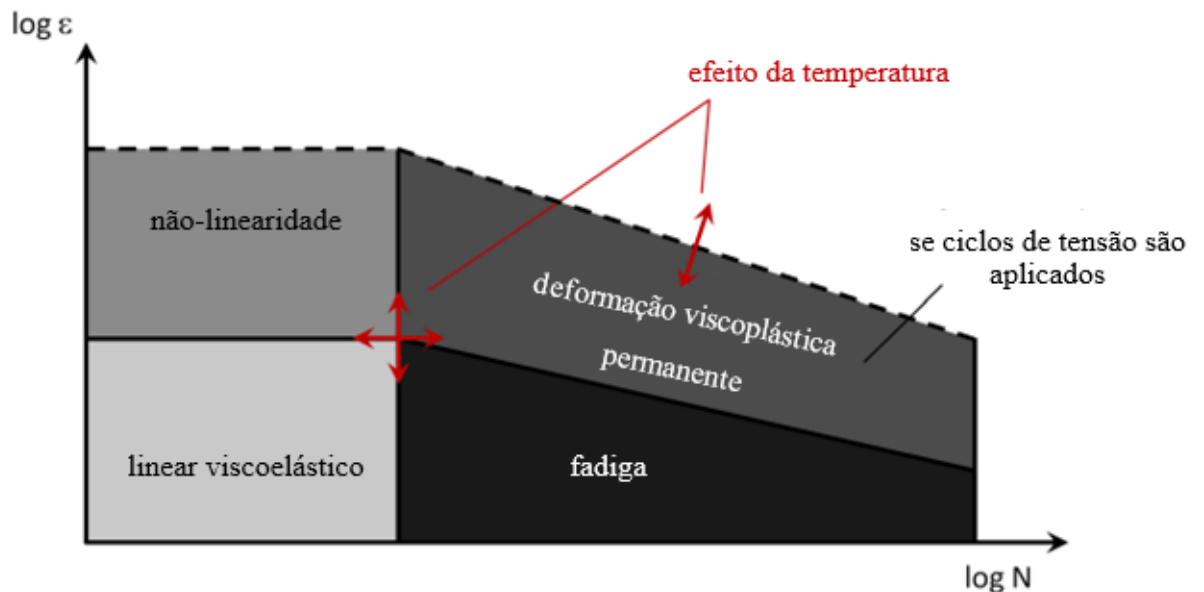
Figura 16 - Domínios de comportamento mecânico de ligantes asfálticos em função da amplitude de deformações e da temperatura para um mesmo número de solicitações



Fonte: Adaptado por Mangiafico (2014)

Pode-se concluir que o concreto asfáltico, herdando tais propriedades do ligante, apresenta mecanismos de falha distintos que são causados por fatores diversos. Citando a situação mais comum em países de clima tropical, como é o caso do Brasil, os principais tipos de falha observados são por fadiga e deformação permanente. Quando o revestimento apresenta comportamento mais rígido, ocasionado por temperaturas mais baixas ou carregamento mais rápido, tende-se a formar as microfissuras decorrentes das deformações elásticas que, por fim, gerarão a fadiga. Por outro lado, quando se tem temperaturas mais elevadas e carregamentos mais lentos atuando, o material apresenta-se mais dúctil e tende a deformar plasticamente.

Figura 17 - Domínios de comportamento mecânico de misturas asfálticas em função da amplitude de deformações e do número de solicitações para uma mesma temperatura



Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014)

Com isso, percebe-se que o dimensionamento do pavimento deve chegar a um equilíbrio, a um teor “ótimo” que gere o mínimo de dano por fadiga e por deformação permanente (SCHUSTER, 2018). Portanto, para realizar um projeto de pavimento adequado às condições específicas ambientais e de tráfego, é necessário conhecimento técnico relativo ao comportamento viscoelástico do asfalto.

A partir do que foi exposto até então, pode-se dizer, em síntese, que a análise mecânica de pavimentos asfálticos e, conseqüentemente, seu adequado dimensionamento só são possíveis se a influência da temperatura for bem determinada. Isso se evidencia ainda mais quando se analisa viscoelasticamente os pavimentos, como será mostrado adiante. É a partir dessas premissas que diferentes métodos de dimensionamento, como foi apresentado, vão aprimorando cada vez mais a análise dos *inputs* climáticos que, apesar de tornar mais complexo o projeto de pavimentos, simula de forma mais realista o estado de tensões e deformações que será verificado em campo.

Tendo em vista que será usado o MeDiNa na presente metodologia, será abordada, de forma sucinta, a análise de pavimentos a partir do seu comportamento elástico.

2.5.3 Análise elástica

Segundo Bernucci et al. (2010), foi Francis Hveem quem iniciou pesquisas para investigar a relação entre as trincas surgidas nos pavimentos asfálticos com as deformações elásticas por eles apresentadas. Além disso, foi ele quem primeiro empregou o termo “resiliência” para misturas asfálticas.

Pode-se entender o termo resiliência como sendo uma propriedade que mede a capacidade de um material retornar imediatamente ao seu estado original de tensões e deformações após cessada a ação de uma carga sobre ele. Ou seja, ela contabiliza a parcela de energia que é devolvida após a ação externa de uma força externa (BALBO, 2007)

Quanto ao termo módulo de resiliência (MR), é necessário fazer um esclarecimento, pois, segundo Bernucci et al. (2010) usa-se diversos termos semelhantes que geram, por vezes, imprecisão devido à falta de rigorosidade no seu uso.

O MR pode ser diferenciado do módulo de Young, apesar de ambos descreverem o comportamento elástico de um material. Enquanto o módulo de elasticidade de Young descreve a relação entre tensão e deformação para a aplicação de cargas monotônicas, ou seja, que agem uma única vez até a falha da amostra, o MR descreve a relação entre tensão e deformação para cargas repetidas e que geram deformações muito inferiores às necessárias para atingir a ruptura (HVEEM, 1955).

O resumo do que foi dito no parágrafo anterior pode ser resumido na Equação 21.

$$M.R. = \frac{\sigma}{\varepsilon_R} \quad (21)$$

Sendo

$M.R.$ = módulo de resiliência

σ = tensão normal

ε_R = deformação elástica (recuperável)

Segundo Balbo, (2007), para descrever um sistema de camadas elasticamente, faz-se necessário o uso de duas medidas. Uma delas é o MR de cada camada e a outra é o coeficiente de Poisson. Com esses valores, pode-se utilizar a Lei de Hooke generalizada (Equações 22 a 24) para se obter as tensões e deformações no pavimento.

$$\varepsilon_x = \frac{1}{M.R.} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (22)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{M.R.} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \quad (23)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{M.R.} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (24)$$

Onde

σ_x, σ_y e σ_z = tensões nas direções x, y e z

$\varepsilon_x, \varepsilon_y$ e ε_z = deformações nas direções x, y e z

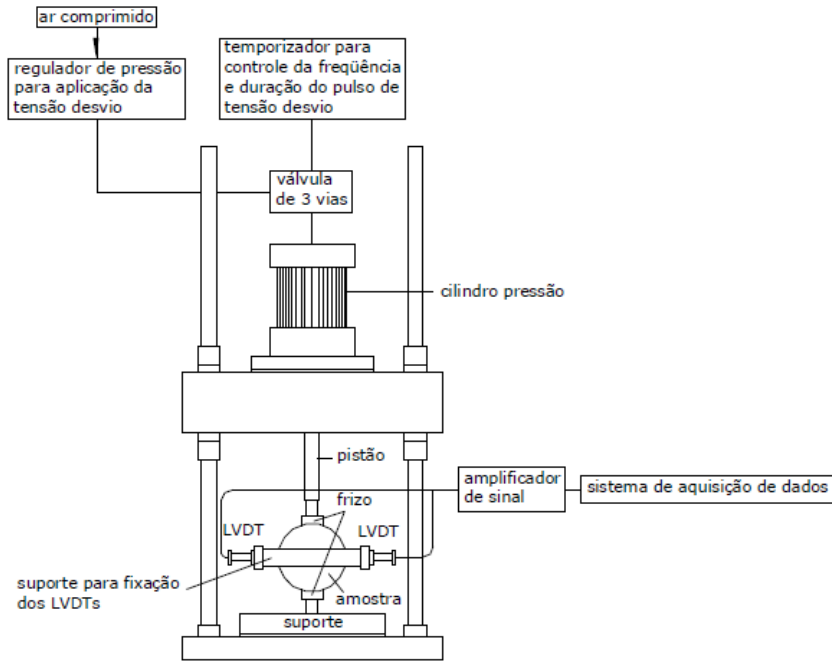
ν = coeficiente de Poisson

A norma vigente para a determinação do MR e coeficiente de Poisson de misturas asfálticas, no Brasil é encontrada em DNIT 135/2018 – ME (DNIT, 2018). O método de ensaio se dá por compressão diametral de cargas repetidas, a temperatura de 25 °C em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 101,6 mm de diâmetro por altura entre 35 a 70 mm, sendo possível ser moldados no compactador Marshall.

As cargas são aplicadas no plano diametral vertical por meio de frisos e a medição pode ser feita de dois modos. O primeiro modo de medição consiste em utilizar LVDT's (*Linear Variable Differential Transformer*) para medição dos deslocamentos somente na direção horizontal. Nesse caso, o ensaio dá, como resultado, o MR e adota-se um valor para o coeficiente de Poisson de 0,25 ou 0,30 para a temperatura de ensaio de 25 °C. O segundo modo consiste em medir os deslocamentos posicionando os LVDT's nas direções horizontal e vertical. Desse modo, pode-se calcular, também, o coeficiente de Poisson do material. O esquema da aparelhagem para o ensaio está exposto na Figura 18.

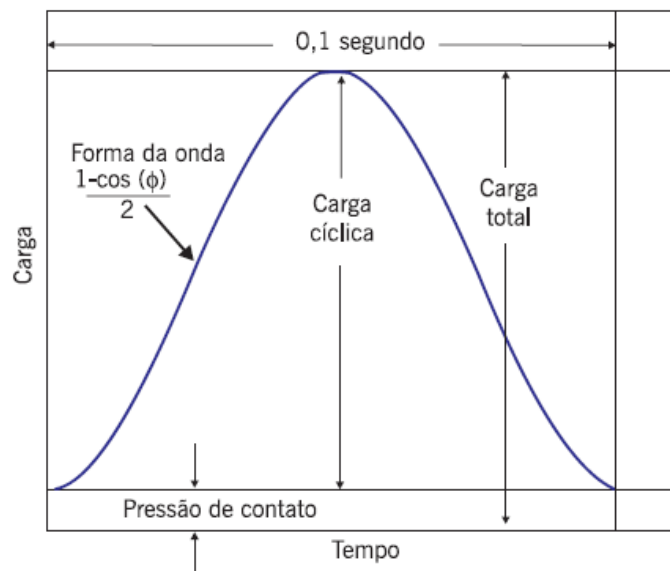
Os pulsos de carga aplicados no corpo de prova devem se aproximar o máximo possível de uma cossenoide, variando entre a carga de contato (P_c) e a carga máxima (P_m). Cada pulso tem duração de 0,1 s com tempo de repouso de 0,9 s, configurando, assim, uma frequência de 1 Hz, conforme indicado na Figura 19 e na Figura 20.

Figura 18 - Aparelhagem para realização do ensaio de MR em misturas asfálticas



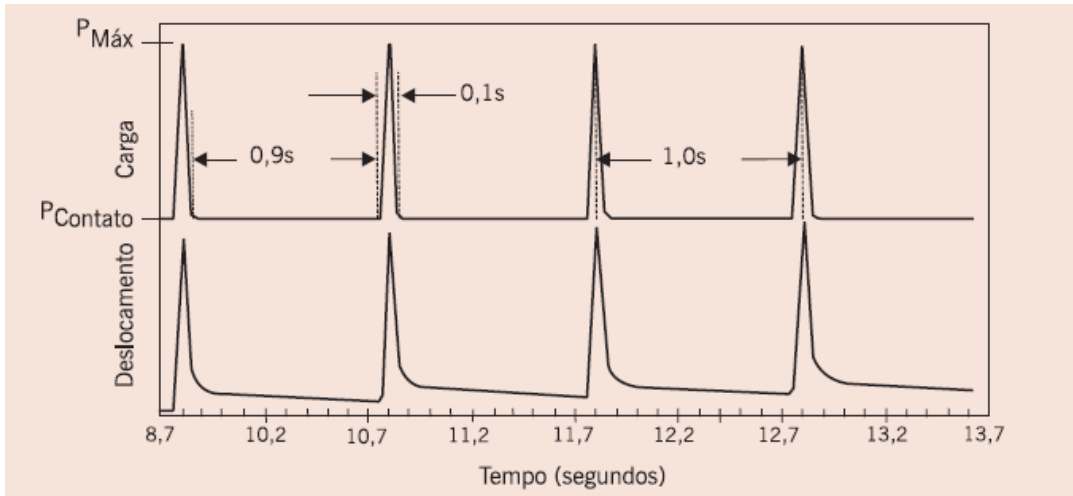
Fonte: DNIT (2018)

Figura 19 - Pulso de carga usado no ensaio de MR



Fonte: Adaptado de NCHRP (2004b) por Bernucci et al. (2010)

Figura 20 - Duração do pulso e tempo de repouso para ensaio de MR



Fonte: Bernucci et al. (2010)

Quando são medidas as deformações em ambos os sentidos, os valores do coeficiente de Poisson (total) para comprimento de medida de meio diâmetro e de um quarto de diâmetro são dados pelas Equações 25 e 26, respectivamente. O MR, por sua vez, é calculado pela Equação 27.

$$\mu_t = \frac{-0,23 + 1,07 \left| \frac{\Delta H_t}{\Delta V_t} \right|}{0,78 - 0,31 \left| \frac{\Delta H_t}{\Delta V_t} \right|} \quad (25)$$

$$\mu_t = \frac{-0,14 + 0,49 \left| \frac{\Delta H_t}{\Delta V_t} \right|}{0,45 - 0,16 \left| \frac{\Delta H_t}{\Delta V_t} \right|} \quad (26)$$

$$MR = \frac{P}{|\Delta H|_t} (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (27)$$

Sendo

ΔH = deslocamento horizontal resiliente do corpo de prova

ΔH_t = deslocamento horizontal total do corpo de prova

ΔV_t = deslocamento vertical total do corpo de prova

P = carga cíclica, dada em Newtons

t = altura do corpo de prova, dada em milímetros

μ = coeficiente de Poisson

O MR é afetado por diversos fatores externos, sendo a temperatura um dos mais preponderantes deles. Além deste fator, pode-se citar, também, a umidade, viscosidade, teor de ligante, tipo de compactação, tempo de aplicação e tempo de repouso da carga (ALKASAWNEH et al., 2007; BERNUCCI et al., 2010; MARQUES, 2004).

Ainda que pesquisas tenham sido feitas para prever o comportamento do concreto asfáltico a partir do MR em diferentes temperaturas, como a realizada por Alkasawneh et al. (2007), pode-se dizer, conforme Bernucci et al. (2010), que esse parâmetro não é totalmente elástico para o asfalto. Como a aplicação de esforços gera deformações viscoelásticas que são, em parte, medidas no ensaio, chega-se à conclusão que a análise elástica não é suficiente para prever o comportamento das misturas asfálticas.

2.5.4 Análise viscoelástica

A viscoelasticidade de um dado material é, como Mangiafico (2014) define, seu comportamento de apresentar tanto a resposta elástica como a viscosa ao se deformar. É um comportamento, ao contrário daquele apresentado por materiais ideais puramente elásticos, que depende do tempo da aplicação das cargas.

Pagliosa (2004) declara que materiais viscoelásticos possuem um comportamento que é a soma da resposta elástica de materiais cuja tensão é proporcional à deformação (Equação 28) com a resposta de fluidos cuja tensão é proporcional à derivada temporal da deformação (Equação 29). Como resultado, a tensão é função tanto da deformação como do tempo (Equação 30)

$$\sigma = E\epsilon \quad (28)$$

$$\sigma = \mu d\epsilon/dt \quad (29)$$

$$\sigma = F(\epsilon, t) \quad (30)$$

Tais materiais, por apresentarem tanto respostas elásticas quanto viscosas, devem ser submetidos, para sua adequada caracterização, a ensaios que levem em conta tanto a frequência de carregamento quanto a temperatura, conforme Anderson et al. (1994). Ou seja, atribuir

apenas o MR, que é feito para condições específicas de frequência e temperatura, se torna insuficiente para compreender como um material viscoelástico funciona.

Balbo (2007) disserta que, ao se deformar, um material de comportamento viscoelástico apresenta dois fenômenos. Um deles é a deformação elástica instantânea e recuperável e o outro é a deformação viscosa, que é dependente do tempo, que pode ocasionar plastificação caso a carga aumente.

Dentre os materiais viscoelásticos, há aqueles que são considerados como viscoelásticos lineares. Tais materiais, segundo Schuster (2018), são aqueles que, além de dependerem de seu histórico de cargas, situando-se entre um material puramente elástico e um puramente viscoso, satisfazem as propriedades da homogeneidade, representada na Equação 31, e da superposição, conforme a Equação 32.

$$R\{AI\} = AR\{I\} \quad (31)$$

$$R\{I_1 + I_2\} = R\{I_1\} + R\{I_2\} \quad (32)$$

Sendo

I, I_1 e $I_2 = input$ com histórico de dados

$R = resposta$ ao *input*

$A = constante$ arbitrária

Ou seja, pode-se dizer, a partir da homogeneidade, que o material oferece respostas diretamente proporcionais ao histórico de solicitações aplicadas. A partir da superposição, conclui-se que a resposta à soma de *inputs* é a soma das respostas aos *inputs*, quando considerados individualmente.

Segundo Zhang (2012), para materiais LVE, as relações entre tensão e deformação são dadas por integrais de convolução (Equações 33 e 34), que levam em conta o histórico de solicitações do material.

$$\sigma = \int_0^t E(t - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (33)$$

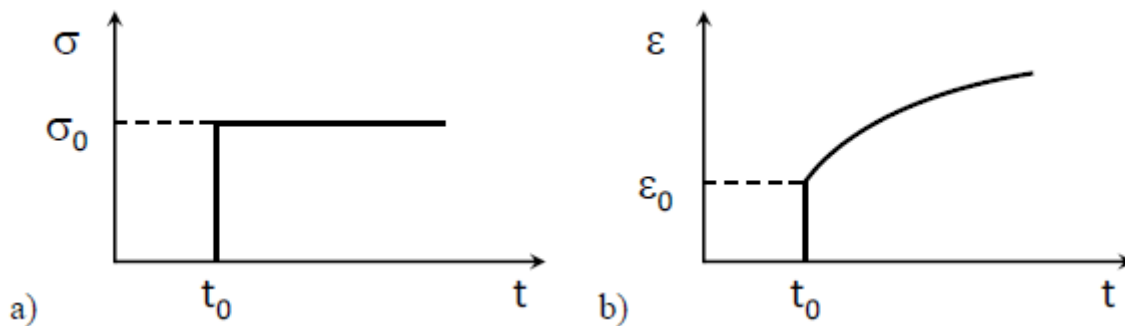
$$\varepsilon = \int_0^t D(t - \tau) \frac{d\sigma}{d\tau} d\tau \quad (34)$$

Sendo que τ é a variável de integração, E corresponde à função módulo de relaxação e D é a função *creep*. Essas funções, juntamente com o módulo complexo, são chamadas de funções unitárias e serão adiante abordadas

2.5.4.1 Creep

Segundo Mangiafico (2014), o *creep* pode ser definido como a função da deformação em relação ao tempo para uma dada tensão, conforme a Figura 21.

Figura 21 - Gráficos da a) tensão e b) deformação para a função *creep*



Fonte: Mangiafico (2014)

Assim sendo, pode-se obter a deformação em função do tempo $\epsilon(t)$ da amostra sujeita a uma tensão inicial σ_0 por meio da Equação 35:

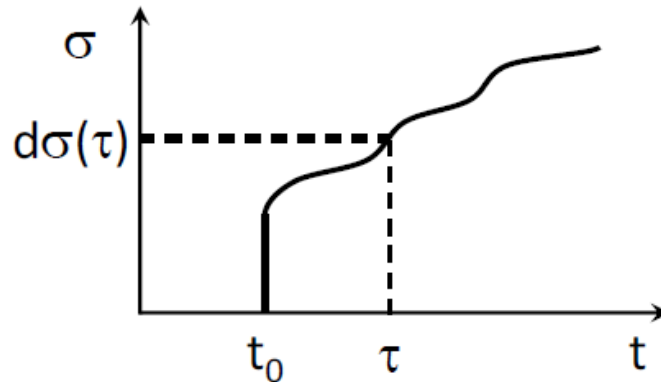
$$\epsilon(t) = \sigma_0 D(t_0, t) \quad (35)$$

Sendo

$D(t_0, t)$ = função horária do *creep* dada em função do tempo inicial

No caso de tensões variáveis ao longo do tempo (Figura 22), pode-se obter as deformações por meio da Equação 36:

Figura 22 - Gráfico da função *creep* para uma tensão variável



Fonte: Mangiafico (2014)

$$\varepsilon(t) = \int_{t_0}^t D(t, \tau) d\sigma(\tau) \quad (36)$$

Considerando que $\sigma(t)$ seja diferenciável e desprezando o efeito do envelhecimento, obtém-se a Equação 37:

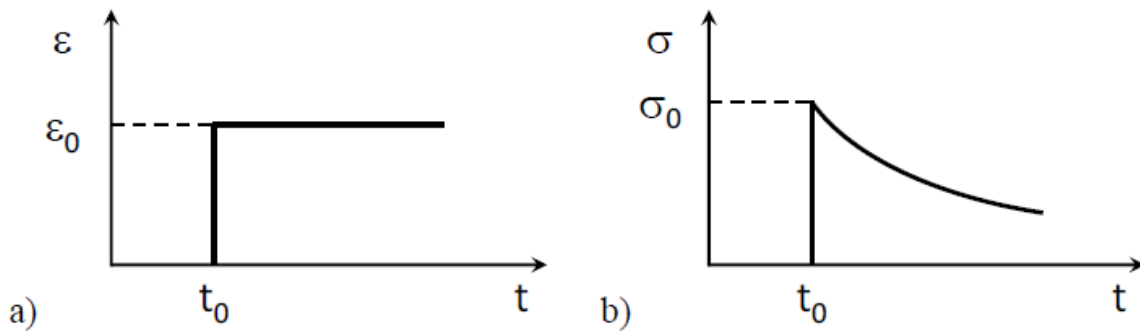
$$\varepsilon(t) = \sigma(t)D(0) + \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial D}{\partial \tau} (t - \tau) d\tau \quad (37)$$

Segundo Schuster (2018), a primeira parcela da Equação 37 representa a deformação imediata e a segunda parcela descreve as deformações oriundas do histórico de tensões.

2.5.4.2 Módulo de Relaxação

Segundo Mangiafico (2014), o inverso do *creep* é o módulo de relaxação, que é definido como a função horária da tensão obtida para uma dada deformação (Figura 23).

Figura 23 - Gráficos da a) tensão e b) deformação para a função do módulo de relaxação



Fonte: Mangiafico (2014)

Deste modo, a tensão pode ser obtida em um instante t qualquer pela Equação 38:

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 E(t, t_0) \quad (38)$$

Sendo

$E(t, t_0)$ = função horária de relaxação dada a partir do instante t_0

De forma análoga à função *creep*, o módulo de relaxação pode ser obtido para situações de tensão variável no tempo segundo a Equação 39.

$$\sigma(t) = \varepsilon(t)E(0) + \int_{t_0}^t \varepsilon(\tau) \frac{\partial E}{\partial \tau} (t - \tau) d\tau \quad (39)$$

Kim (2009) declara que, se o concreto asfáltico fosse um material puramente elástico, ambas as funções *creep* e módulo de relaxação seriam exatas recíprocas uma da outra. Contudo, isso não é percebido devido à natureza tempo-dependente apresentada pelos materiais LVE.

Segundo Schuster (2018), as funções *creep* e módulo de relaxação são de difícil obtenção em laboratório. Todavia, através da teoria viscoelástica linear (séries de Prony), podem ser obtidas através do ensaio de módulo complexo.

2.5.4.3 Módulo Complexo

Segundo Bernucci et al. (2010), a partir da década de 1960, começaram as pesquisas relacionadas a um substituto do MR, o módulo de elasticidade complexo.

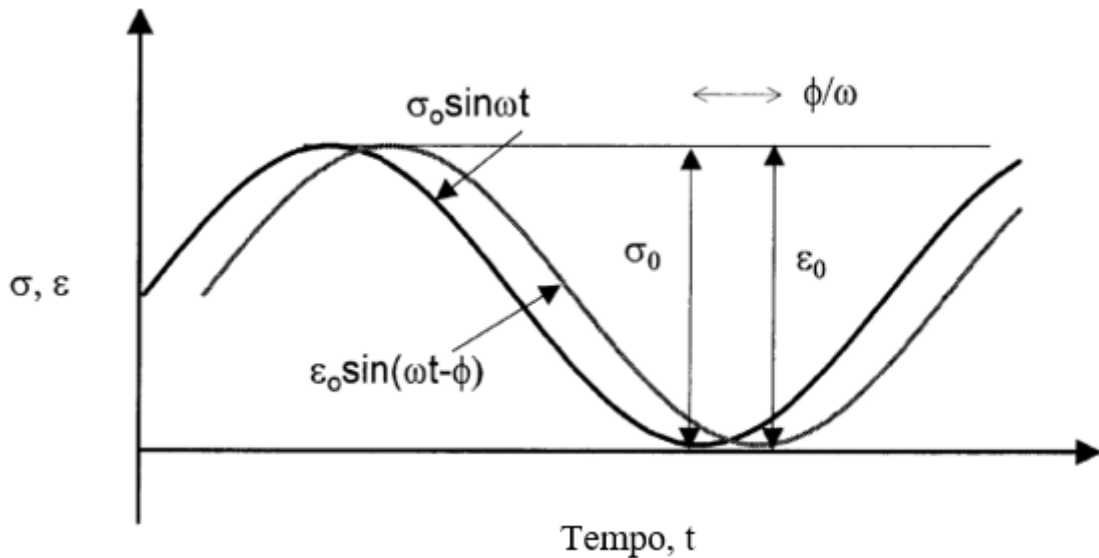
Conforme expõe Mangiafico (2014), se considerarmos um material LVE exposto a um carregamento senoidal (Equação 40) de frequência angular $\omega = 2\pi f$, sendo f sua frequência, ele apresentará uma deformação também de natureza senoidal (Equação 41) com uma defasagem φ em relação ao gráfico da tensão.

$$\sigma(t) = \sigma_0 \text{sen}(\omega t) \quad (40)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (41)$$

Tal defasagem é, na verdade, um ângulo compreendido no intervalo entre 0° e 90° , que expressa o atraso entre a pulsação da carga e a pulsação da deformação no material (Figura 24). Dessarte, materiais puramente elásticos apresentam $\varphi = 0^\circ$, ou seja, a resposta apresentada é imediata. No caso de materiais puramente viscosos, $\varphi = 90^\circ$, isto é, trata-se da situação de atraso máximo entre *input* e resposta do material.

Figura 24 - Defasagem entre tensão e carga



Fonte: Adaptado de Witczac et al. (2002)

Definindo $\sigma^*(t)$ e $\varepsilon^*(t)$ como

$$\sigma^*(t) = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad (42)$$

$$\varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t - \varphi} \quad (43)$$

Pode-se dizer, ao decompor $\sigma^*(t)$ e $\varepsilon^*(t)$ em suas partes real e imaginária, que

$$\sigma(t) = \text{Im}[\sigma^*(t)] \quad (44)$$

$$\varepsilon(t) = \text{Im}[\varepsilon^*(t)] \quad (45)$$

Ou seja, $\sigma(t)$ e $\varepsilon(t)$ constituem a parte imaginária de $\sigma^*(t)$ e $\varepsilon^*(t)$, respectivamente.

O módulo complexo pode ser definido como a relação entre as funções de variável complexa $\sigma^*(t)$ e $\varepsilon^*(t)$, como mostrado na Equação 46.

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma^*(t)}{\varepsilon^*(t)} \quad (46)$$

Essa expressão pode, ainda, ser escrita de outra maneira:

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i\omega t - \varphi}} = |E^*| e^{i\varphi} \quad (47)$$

Onde $|E^*|$ é chamado de valor absoluto, norma ou, ainda, módulo dinâmico, cujo valor é dado pela Equação 48:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (48)$$

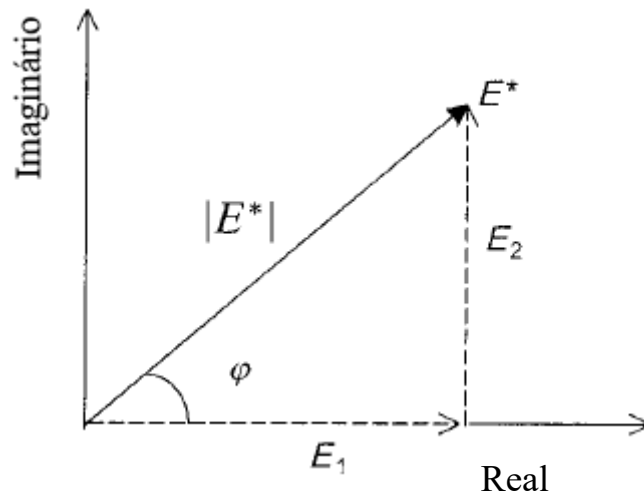
Segundo Bernucci et al. (2010), o módulo dinâmico é o parâmetro ideal para descrever o comportamento elástico das misturas asfálticas diante de um carregamento cíclico. Escrevendo E^* em sua forma algébrica e sua forma polar, temos:

$$E^* = E_1 + iE_2 = |E^*| \cos\varphi + i|E^*| \sin\varphi \quad (49)$$

Onde E_1 é a parte real e E_2 é a parte imaginária do módulo complexo (Figura 25). A parte real representa o comportamento elástico do material, ou seja, corresponde à energia recuperada pelo material após a solicitação. A parte imaginária retrata a parcela viscosa da

resposta da amostra. Ela traduz a energia que é perdida devido a forças dissipativas, como o atrito.

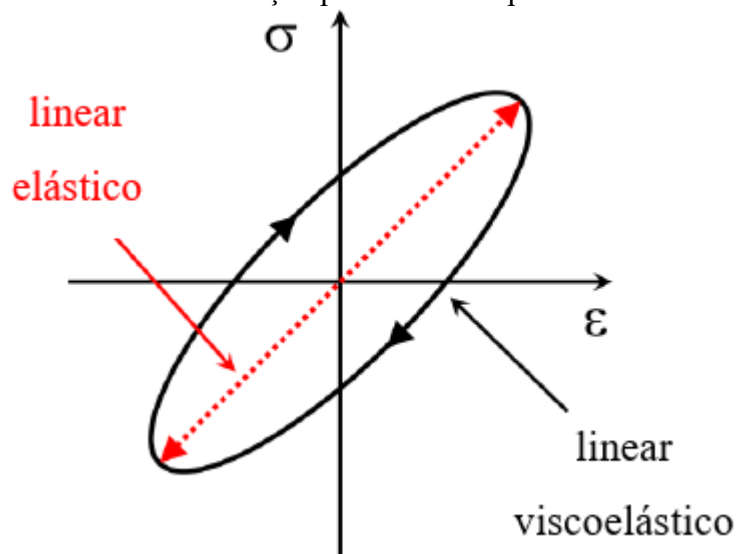
Figura 25 - Representação do módulo complexo no plano complexo



Fonte: Adaptado de Kim (2009)

Analisando o gráfico tensão-deformações para um material totalmente elástico (Figura 26), pode-se perceber que os pontos formam uma reta de inclinação correspondente ao valor constante de rigidez e que não há dissipação de energia. Por outro lado, o gráfico de um material LVE forma uma figura elíptica, cuja área é igual à energia perdida por ciclo, conforme mostrado na Equação 50.

Figura 26 – Gráfico de tensão-deformação para materiais puramente elásticos e LVE



Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014)

$$W_{ciclo} = \pi \varepsilon_0 \sigma_0 \text{sen}(\varphi) \quad (50)$$

A partir dessa equação, percebe-se que a energia dissipada é nula para materiais que apresentam $\varphi = 0$, ou seja, sem comportamento viscoso.

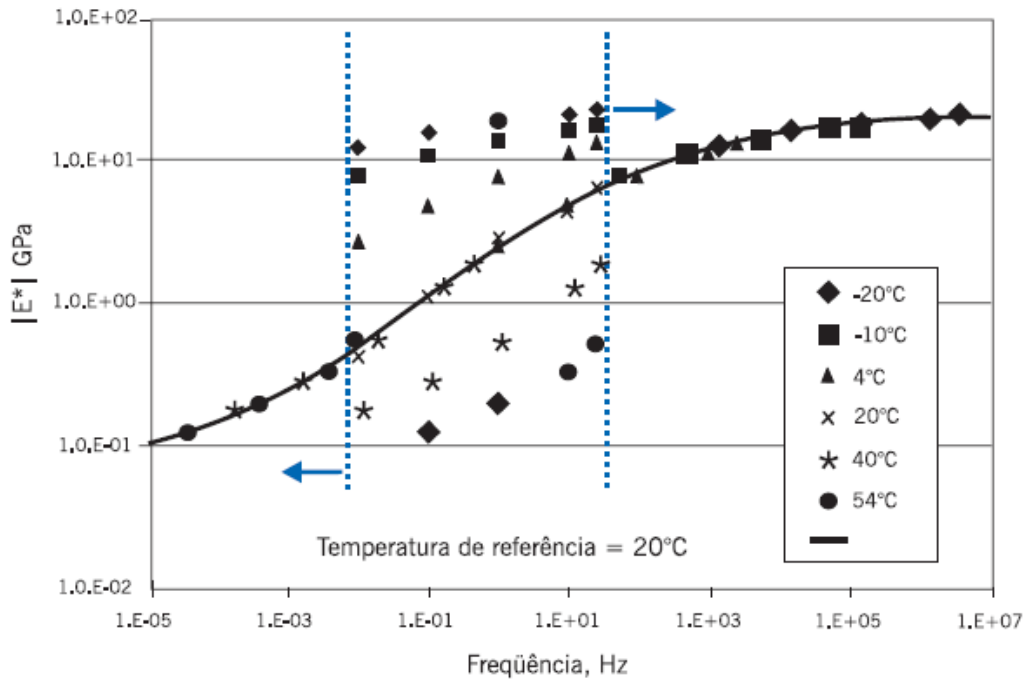
A variação do módulo complexo em função da frequência e temperatura pode ser avaliada por meio de diferentes gráficos:

a) Plano Cole-Cole: é a representação de E_1 e E_2 em um plano complexo com as partes real e imaginária em escala linear. É usado principalmente para avaliar o comportamento do asfalto a baixas temperaturas/alta frequência.

b) Diagrama de Black: é a representação gráfica do módulo dinâmico ($|E^*|$) em escala logarítmica versus o ângulo de fase (φ) em escala linear. Seu uso permite descrever o comportamento de misturas asfálticas para altas temperaturas/baixas frequências

c) Curvas mestras: permitem observar a variação de $|E^*|$ em função da temperatura, para uma dada frequência ou em função da frequência para uma dada temperatura. No primeiro caso, tem-se as isócronas (Exemplo na Figura 27), representadas em escala logarítmica para $|E^*|$ e escala linear para a temperatura. No segundo caso, tem-se as isotermas, onde tanto $|E^*|$ como a frequência são plotados em escala logarítmica. As curvas mestras são construídas com base no princípio da superposição tempo-temperatura, que será abordado mais adiante. Segundo Anderson et al. (1994), uma das principais abordagens de análise mecânica do SHRP consiste em obter as curvas mestras.

Figura 27 - Curva mestra para temperatura de 20 °C

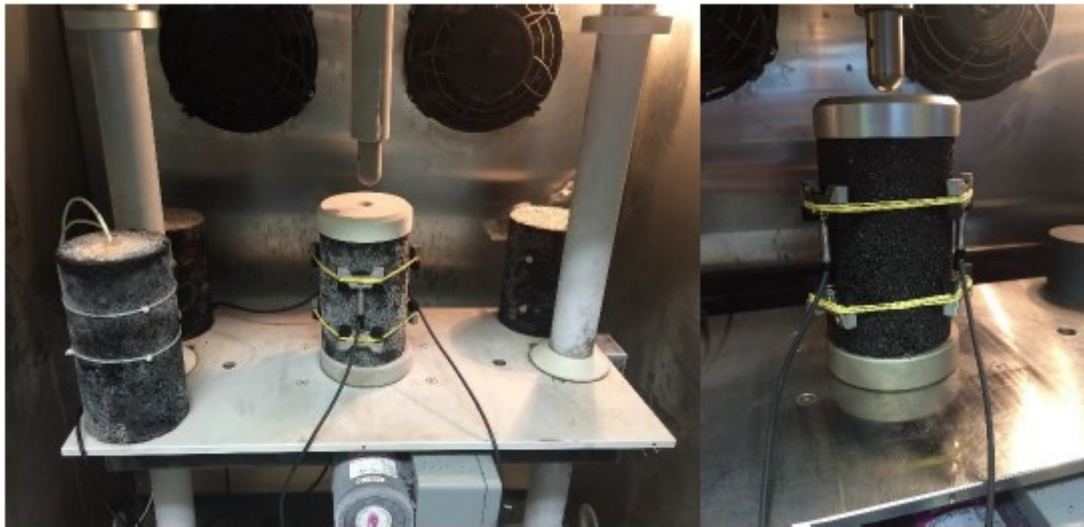


Fonte: Bernucci et al. (2010)

O DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) possui um projeto de norma de 2018 (DNIT, 2018b) de método de ensaio para determinação do módulo dinâmico e ângulo de fase de misturas asfálticas. No protocolo descrito, são aplicadas cargas axiais cíclicas de compressão em um corpo de prova cilíndrico a temperaturas (4, 20 e 40 °C) e frequências (25,0; 10,0; 5,0; 1,0; 0,5 e 0,1 Hz) determinadas para a obtenção das curvas mestras. Na Figura 28, estão representados corpos de prova preparados para a realização do ensaio.

Para modelar os resultados obtidos a partir do ensaio de módulo complexo, podem ser usados os chamados modelos analógicos de espectro contínuo. Esses modelos consistem em uma combinação de molas, amortecedores e elementos que combinam os dois, chamados de amortecedores parabólicos. Conforme Olard e Di Benedetto (2003), é mais vantajosa a utilização desses modelos em vez de modelos empíricos porque as constantes a serem determinadas possuem significado físico. Ou seja, a combinação entre molas puramente elásticas, amortecedores puramente viscosos e amortecedores parabólicos viscoelásticos representa a resposta viscoelástica do material.

Figura 28 - Corpos de prova preparados para a realização do ensaio de módulo complexo no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFSM

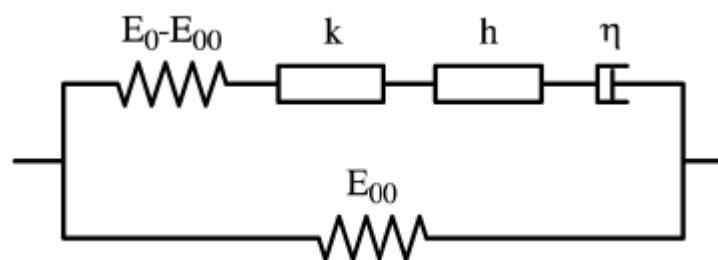


Fonte: Boeira (2016)

A descrição minuciosa de tais modelos foge do desígnio dessa obra e, para maiores informações, pode-se recorrer a obras como as de Roylance (2001), Olard e Di Benedetto (2003) e Mangiafíco (2014).

Dentre tais modelos, se destaca o modelo conhecido como 2S2P1D (*two springs, two parabolic dashpots and one dashpot*), proposto por Olard e Di Benedetto (2003), que consiste na combinação de 2 molas, 2 amortecedores parabólicos e 1 amortecedor (Figura 29), é resultado do aprimoramento dos modelos de espectro contínuo.

Figura 29 - Esquema do modelo 2S2P1D



Fonte: Mangiafíco (2014)

Para a obtenção dos coeficientes das séries de Prony utilizados nesta pesquisa, foi usado o chamado modelo sigmoidal. Tal modelo consiste em ajustar experimentalmente a curva mestra a partir de uma função de formato sigmoidal (KIM, 2009), conforme representado na Equação 51.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta - \gamma \log(\xi)}} \quad (51)$$

Onde:

$|E^*|$ = módulo dinâmico

α = intervalo de valores de módulo

β, γ = parâmetros de forma

δ = valor mínimo de módulo

ξ = frequência reduzida

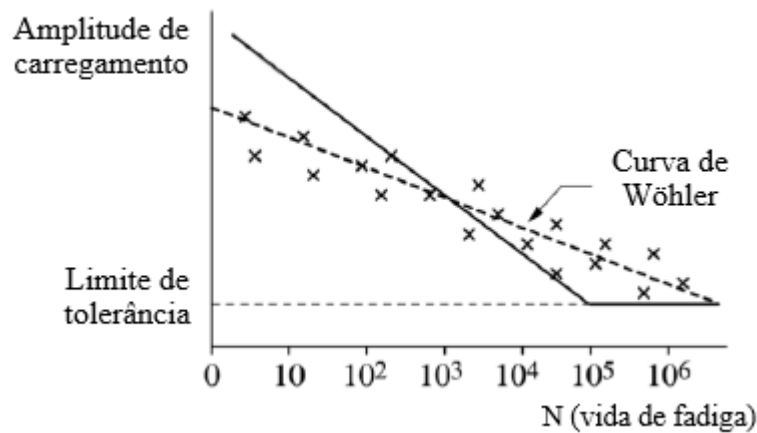
2.5.5 Fadiga em misturas asfálticas

A fadiga é um fenômeno recorrente em diversos materiais que descreve sua danificação a níveis de tensão menores que aqueles necessários para a sua ruptura por cargas monotônicas. Assim sendo, surgem fissurações microscópicas que se interconectam e originam fraturas. Essas, por sua vez, conduzem à ruína do material (BALBO, 2007).

Conforme Schütz (1996), o estudo da fadiga enquanto fenômeno mecânico iniciou com Albert (1838), que estudou como melhorar o desempenho de correntes metálicas utilizadas na mineração na Alemanha.

Mais tarde, ainda no século XIX, Wöhler (1870) estudou a relação entre a vida de fadiga de um material (número de aplicações de carga até sua falha) e a amplitude das cargas. Os resultados de sua pesquisa formaram a chamada “curva de Wöhler” (Figura 30).

Figura 30 - Curva de Wöhler



Fonte: Adaptado de Di Benedetto e Corté (2005)

A lei que rege a curva pode ser expressa pela Equação 52:

$$S = aN^{-b} \quad (52)$$

Onde S corresponde à sollicitação, N ao número de ciclos até a ruptura por fadiga e a e b são parâmetros de regressão.

A partir da figura, pode-se perceber que, quanto maior a amplitude das cargas cíclicas aplicadas sobre um determinado material, menor será a vida de fadiga correspondente. Ou seja, quando submetido a cargas de menor amplitude, o material durará um tempo maior até sua falha e, quando for carregado por cargas maiores, romperá em menos aplicações de carga.

Os estudos de Wöhler constituem uma abordagem clássica para o estudo da fadiga e é citado por diversos pesquisadores na área de pavimentos, como Tapsoba et al. (2012), Nguyen (2009), Woldekidan (2011), dentre outros.

Contudo, sua aplicação a misturas asfálticas é limitada, pois um pavimento está sujeito a diferentes amplitudes e configurações de cargas que tornam a análise de dano por fadiga mais complexa. Para analisar esse efeito, faz-se necessário o uso de teorias de dano cumulativo, como a lei baseada na hipótese de Palmgren-Miner (SCHUSTER, 2018).

Tal hipótese pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (53)$$

Sendo n_i o número de ciclos de carregamento aplicados com certa amplitude de carga S_i e N_i a vida de fadiga para S_i .

Segundo Bernucci et al. (2008), o dano por fadiga se trata de um processo não-linear. Quer dizer, o dano, a rigor, não é o mesmo a cada ciclo de carga aplicado. Além disso, segundo Mangiafico (2014), pesquisas já demonstraram a inexatidão de tal hipótese devido ao fato de que não considera o histórico de carregamento, ou seja, a ordem de aplicação de diferentes amplitudes de cargas. Entretanto, devido à sua simplicidade, tal hipótese continua a ser usada como uma estimativa preliminar de dano.

Em se tratando de fadiga em misturas asfálticas, Hveem (1955) foi pioneiro na associação entre as trincas na superfície do pavimento e o fenômeno de aplicação repetida de cargas, como já foi citado no presente trabalho.

A fadiga é um dos fenômenos principais para a compreensão da mecânica de pavimentos asfálticos. Sua origem está no acúmulo irreversível de dano devido às solicitações do tráfego e clima e se trata do principal mecanismo de ruptura a baixas e médias temperaturas. (BABADOPULOS et al., 2017; DI BENEDETTO et al., 2004; MASOUD et al., 2013, SABOURI e KIM, 2014, SHAN et al., 2010).

Nascimento (2015) declara que, no Brasil, dentre os diversos defeitos verificados em pavimentos asfálticos, a fadiga é o principal deles.

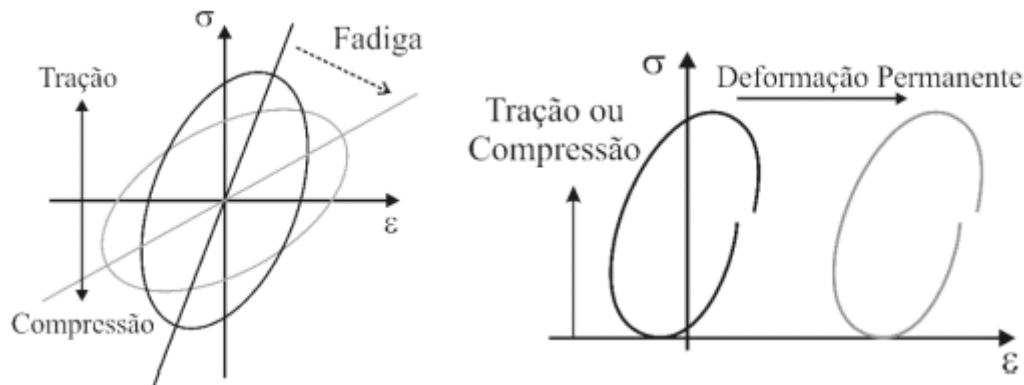
A previsão e a avaliação da fadiga em pavimentos representam um grande desafio devido à natureza complexa do fenômeno e às condições de realização dos ensaios de fadiga, que consomem muito tempo e recursos. O desempenho à fadiga é fortemente influenciado por condições de contorno (interação com as camadas inferiores do pavimento) e com a composição do carregamento, o que gera uma dispersão nos resultados (DI BENEDETTO et al., 2004; KIM et al., 2003).

Segundo Di Benedetto et al. (2004), a passagem de veículos sobre o pavimento ocasiona ciclos de cargas de curta duração. Essas cargas podem danificar o revestimento ao longo do tempo se ultrapassarem certo limite. Sendo assim, a previsão da deterioração por fadiga é de suma importância para que o dimensionamento de pavimentos seja eficaz.

Conforme os mesmos autores, à medida que ocorrem as fissuras resultantes da fadiga, também o comportamento tensão-deformação do composto asfáltico se altera com a diminuição

da sua rigidez. Com isso, maiores deformações ocorrem para uma mesma tensão. Contudo, deve-se distinguir a diferença comportamental do asfalto quando da ocorrência de fadiga e da deformação permanente (Figura 31).

Figura 31 - Comportamento tensão-deformação em caso de fadiga e deformação permanente



Fonte: Adaptado de Di Benedetto et al. (2004)

A propagação de fissuras na fadiga ocorre em 2 fases. Na primeira fase, chamada de fase de iniciação, microfissuras se espalham uniformemente pelo pavimento e o efeito disso é a diminuição da rigidez. Em um segundo momento, chamado de fase de propagação, as fissuras se interligam e passam a formar microfissuras, que já alteram a estrutura homogênea do asfalto e passam a demandar outras abordagens para seu estudo (DI BENEDETTO et al., 2004).

Conforme exposto no manual do NCHRP (2011), as fissuras por fadiga podem ser classificadas quanto ao seu modo de propagação. Quando elas surgem na base do revestimento, são chamadas de *bottom-up* e, quando surgem na superfície ou próximo dela, são denominadas *top-down*. Para revestimentos finos, é comum o surgimento de fissuras *bottom-up*.

Contudo, como observa Kim (2009), pavimentos com revestimentos asfálticos mais espessos podem apresentar surgimento simultâneo de fissuras no topo e na base da camada e, em algum momento, essas fissuras se propagam até se unirem. Desse modo, conforme o mesmo autor, percebe-se que a simples associação da resistência à fadiga com a resistência à tração na parte inferior do revestimento é uma abordagem precipitada.

As fissuras do tipo *top-down* ocorrem por mecanismos diferentes daqueles usados para modelar as fissuras *bottom-up*, que consideravam apenas a distribuição de tensões advinda do esforço de tração na flexão que o tráfego impõe sobre a camada de revestimento. No caso de

pavimentos com camada de revestimento mais delgada, pode-se atribuir a fissuração na parte superior a esforços de tração induzidos em regiões fora da passagem do pneu. Já para camadas asfálticas mais espessas, esse fenômeno é associado aos esforços de cisalhamento resultantes da passagem dos veículos (NCHRP, 2010).

Para prever o surgimento de fissuras do tipo *top-down*, é necessário usar abordagens que não assumam, *a priori*, o local de início de fissuração nem o caminho de propagação das fissuras. Nesse caso, *softwares* de elementos finitos que utilizam a abordagem viscoelástica se mostram eficazes para tais análises (PARK e KIM, 2013).

2.5.5.1 Fatores que influenciam a ocorrência de fadiga

Conforme já citado e revisado na presente obra, a temperatura tem um efeito significativo no comportamento mecânico de misturas asfálticas. Além das influências do clima, outros fatores exercem grande influência, como o teor de asfalto e a granulometria dos agregados do concreto asfáltico. Na Tabela 1, está um resumo da relação entre diferentes variáveis e a resposta à fadiga de misturas asfálticas.

Tabela 1 - Efeito da variação de diversos fatores sobre a vida de fadiga

Fator	Variação do Fator	Efeito de Variação do Fator		
		Na Rigidez	Na vida de fadiga em Tensão Controlada (TC)	Na vida de fadiga em Deformação Controlada (DC)
Penetração do Asfalto	Decresce	Aumenta	Aumenta	Decresce
Teor de Asfalto	Aumenta	Aumenta ¹	Aumenta ¹	Aumenta ²
Tipo de Agregado	Aumenta a rugosidade e angularidade	Aumenta	Aumenta	Decresce
Granulometria do Agregado	Aberta a densa	Aumenta	Aumenta	Decresce ²
Índice de Vazios	Decresce	Aumenta	Aumenta	Decresce ²
Temperatura	Decresce	Aumenta ³	Aumenta	Decresce

¹ Existe um teor ótimo para vida de fadiga máxima

² Poucos estudos existentes

³ Aproximações limitam a temperaturas abaixo de congelamento

Fonte: Adaptado de NCHRP (1990) por Santos (2005)

Conforme o relatório do NCHRP (1990), os principais fatores que modificam o desempenho à fadiga são o teor de asfalto e o índice de vazios. Segundo os autores, os agregados exercem menor influência.

Kim et al. (1991) relatam que, a partir de ensaios de fadiga realizados na *North Carolina State University* (NCSU), a tendência de aumento da resistência de fadiga com o aumento do teor de asfalto e a diminuição do índice de vazios se confirma.

Em seu estudo, Baaj et al., (2005) concluíram que o tipo de ligante exerce grande efeito na resistência de misturas asfálticas, mormente para maiores deformações. Além disso, concluiu-se que misturas que têm ligantes mais rígidos exibem uma menor taxa de dano que aquelas de menor rigidez e que a adição de polímeros como o EVA (etileno acetato de vinila) e SBS (estireno-butadieno-estireno) levam a uma melhoria no desempenho à fadiga.

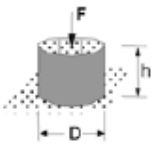
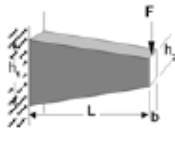
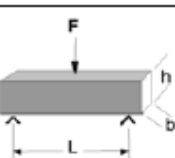
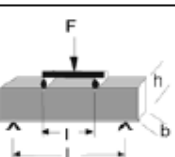
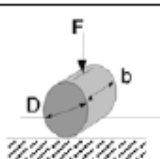
Specht (2004) concluiu em sua pesquisa que, adicionando borracha de pneus em forma pó como modificador do ligante, os concretos asfálticos resultantes apresentaram uma melhoria de suas propriedades mecânicas referentes à fadiga, principalmente a teores entre 12 e 18% de borracha.

2.5.6 Ensaio de fadiga

Os ensaios laboratoriais são a melhor maneira de avaliação da vida de fadiga de compostos asfálticos. Através desses, pode-se modelar o comportamento dos materiais e criar bancos de dados que fornecerão base para futuras pesquisas (SCHUSTER 2018).

Os ensaios de fadiga podem ser realizados via aplicação de esforços de tração/compressão ou através de flexão. As diferentes tipologias de ensaio estão representadas na Figura 32 e, como consta no relatório do NCHRP (1990), variam quanto à configuração de carga, distribuição de tensões, forma e frequência de carregamento, ocorrência de deformação permanente e estado de tensões.

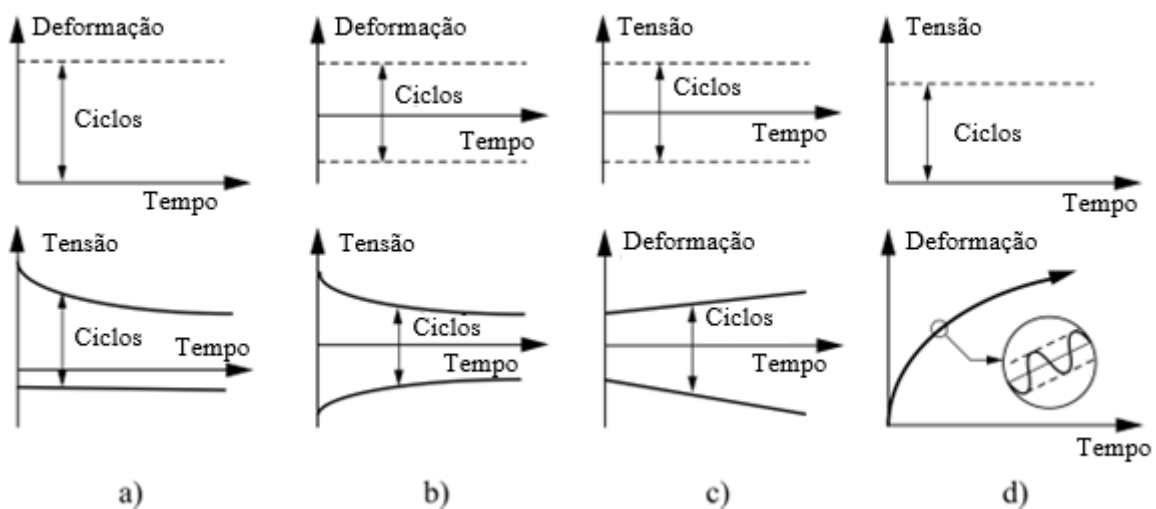
Figura 32 - Tipologias usadas para ensaio de fadiga

Geometria de ensaio	Tipo de carregamento
	Tração- Compressão "Homogêneo" F_1, S_1
	Flexão em dois pontos "Não homogêneo" F_2, B_1, B_2
	Flexão em três pontos "Não homogêneo" N_1
	Flexão em quatro pontos "Não homogêneo" N_2, P, PL, UK
	Tração indireta "Não homogêneo" S_2

Conforme percebe-se na Figura 32, os ensaios podem ser divididos em homogêneos e não-homogêneos. Mangiafico (2014) faz essa distinção: quando as amostras apresentam o mesmo estado de tensões e deformações ao longo de todos os pontos da amostra, o ensaio é dito homogêneo. Caso haja variações de tensão ou deformação em pontos diferentes, diz-se que se trata de um ensaio não-homogêneo. Sendo assim, a única geometria de ensaios que oferece a condição de homogeneidade é o ensaio de tração-compressão uniaxial pois, nesse caso, todos os pontos da amostra reagem da mesma maneira aos ciclos de carga. No caso dos ensaios de flexão e de tração indireta, são necessárias soluções estruturais para se obter o estado de tensão/deformação da amostra, visto que ele varia de ponto a ponto.

Os ensaios podem ser realizados em um estado de controle de tensão ou de controle de deformação. No primeiro caso, aplica-se uma onda de tensões sobre a amostra e a deformação resultante é medida. Na segunda situação, aplica-se uma deformação e mede-se a consequente tensão. A visualização gráfica disso pode-se resumir na Figura 33.

Figura 33 - Comportamento da tensão e deformação para ensaios de fadiga com tensão controlada e deformação controlada



Fonte: Adaptado de Di Benedetto e Corté (2005)

Sendo que, na Figura 33 a) e b), trata-se de um ensaio com deformação controlada e, na Figura 33 c) e d), tem-se a situação de controle de tensão.

De forma análoga aos ensaios de *creep* e módulo de relaxação, respectivamente, percebe-se que, em ensaios com tensão controlada, a deformação aumenta com o passar do

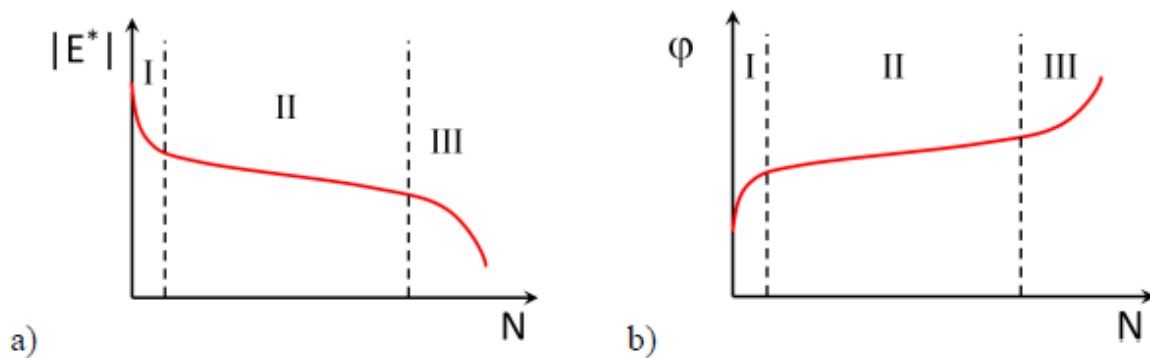
tempo e a propagação de fissuras ocorre de forma rápida e, em ensaios de deformação controlada, a tensão diminui ao longo do tempo e a fissuração se dá de forma mais lenta (MANGIAFICO, 2014).

Conforme ressalta ainda Mangiaficio (2014), os termos “controle de tensão” e “controle de deformação” só são aplicáveis em ensaios homogêneos. Caso o estado de tensões seja não homogêneo, deve-se usar os termos “controle de força” e “controle de deslocamento”.

Além dessas modalidades, há, além disso, o ensaio com controle de deslocamento do atuador (*controlled crosshead test*), que consiste em programar o pico de deformações do atuador para atingir um valor constante. Sendo assim, não é um ensaio puramente de tensão nem de deformação controlada, visto que a deformação do corpo de prova tende a perder sua conformidade com a deformação do atuador ao longo do ensaio (ZHANG, 2012).

Em relação às propriedades mecânicas do asfalto, pode-se verificar que o módulo dinâmico e o ângulo de fase exibem 3 fases ao longo de um ensaio de fadiga, segundo representado na Figura 34.

Figura 34 - Gráficos do módulo dinâmico e ângulo de fase durante o ensaio de fadiga



Fonte: Mangiaficio (2014)

Percebe-se que, no decorrer da fase I, o módulo complexo sofre grandes variações não-lineares. O módulo dinâmico sofre um grande decréscimo e o ângulo de fase, um grande acréscimo. Nesse primeiro momento do ensaio, a fadiga não tem efeito preponderante devido à ocorrência, sobretudo, da não-linearidade, do aquecimento e da tixotropia.

Na fase II, tanto o valor de $|E^*|$ como de φ apresentam comportamento dito como quase linear. Nessa etapa, os fenômenos observados na fase I ainda atuam mas já se pode perceber o dano por fadiga de forma mais evidente.

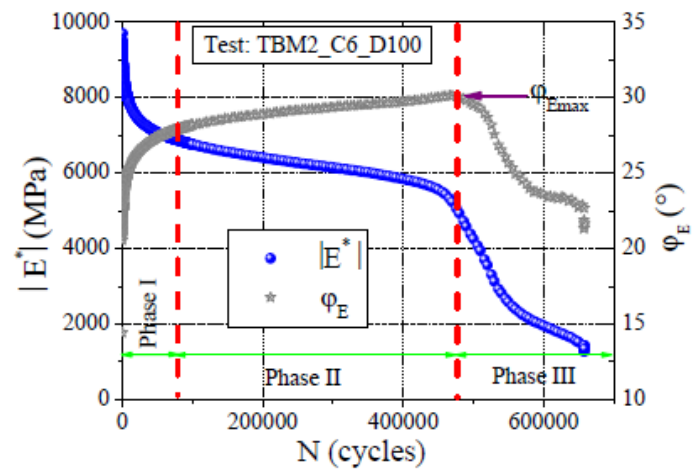
Por fim, na fase III, a amostra apresenta sua estrutura está fragmentada. A partir desse ponto, outras teorias mecânicas são necessárias para explicar seu comportamento. Segundo Babadopulos et al. (2017), é na transição entre a fase II e a fase III que se encontra a falha da amostra. Tal falha, contudo, conforme Mangiafico (2014), não coincide com a fissuração macroscópica do material

2.5.6.1 *Protocolo de ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão*

Para o emprego do modelo S-VECD (que será abordado na próxima subseção) e a subsequente alimentação de dados no programa LVECD, é usado o protocolo de ensaio uniaxial cíclico de fadiga à tração-compressão, cuja especificação é encontrada na norma AASHTO TP 107-18 – *Standard Method of Test for Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Mixtures from Direct Tension Cyclic Fatigue Test*. Tal ensaio, como já foi abordado, é homogêneo, ou seja, não necessita de transformações matemáticas para se obter as variáveis fundamentais à análise mecanística (tensões e deformações).

Conforme a norma, uma amostra cilíndrica de concreto asfáltico é submetida a um carregamento cíclico controlado até que o momento de falha. É possível identificar a falha analisando o momento em que a evolução do ângulo de fase apresenta uma mudança em sua tendência e o ângulo chega ao seu valor máximo (Figura 35). Conforme Reese (1997), que propôs esse critério de falha, isso se dá na transição entre as fases II e III do ensaio.

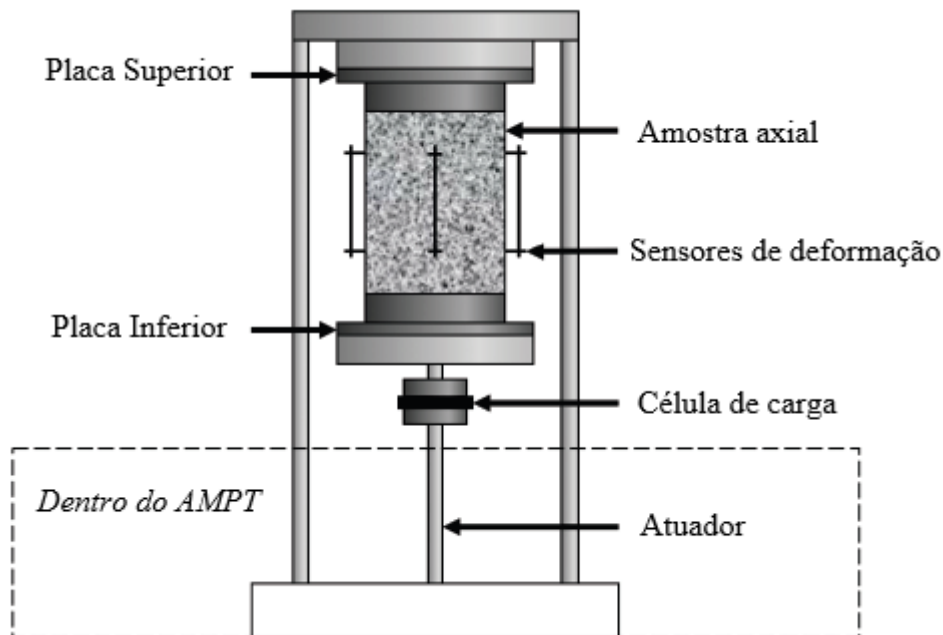
Figura 35 - Pico do ângulo de fase durante ensaio cíclico



Fonte: Tapsoba et al., (2012)

O esquema da aparelhagem do ensaio é apresentado na Figura 36. Ao fim do procedimento, o objetivo é obter a chamada curva característica de dano. Essa curva correlaciona a pseudo-rigidez (C) do material com o dano (S) e é considerada como uma propriedade fundamental do material, pois independe da temperatura, frequência ou modo de carregamento.

Figura 36 - Esquema dos equipamentos usados no ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão



Fonte: Adaptado de AASHTO (2018)

Antes do ensaio em si, faz-se necessário submeter as amostras necessárias (pelo menos 3 são exigidas pela norma) à etapa chamada de *fingerprint*. Nesse momento, é realizado um ensaio de módulo dinâmico na amostra para determinar a carga necessária para atingir um determinado nível de deformação. Assim, é feita uma calibração do ensaio para se obter as características específicas de amostra para amostra. No S-VECD, que será adiante apresentado, essa etapa corrige a variação de rigidez entre amostras ensaiadas para obter o módulo complexo e amostras obtidas da mesma mistura que são ensaiadas à fadiga. A partir desses dados, obtém-se o DMR (*dynamic modulus ratio*).

Após isso, na fase do ensaio em si, são medidas as tensões e deformações da amostra e, a partir disso, são calculados a pseudo-deformação, a pseudo-rigidez e o dano. Cada um desses conceitos será explicado na seção seguinte.

2.5.6.2 Protocolo de ensaio de fadiga por compressão diametral

Tendo em vista que o *software* MeDiNa será abordado na metodologia do presente trabalho, será revisado, de forma sumária, o ensaio de fadiga por compressão diametral. O procedimento deste está na norma DNIT 183/2018 - ME e é a partir dele que são obtidos os parâmetros experimentais da vida de fadiga que alimentam o programa.

O procedimento de ensaio, realizado a tensão controlada, leva em consideração a ruptura completa do corpo de prova como critério para definir a vida de fadiga da amostra. Ao contrário do ensaio uniaxial de tração-compressão, trata-se de um ensaio não homogêneo. Ou seja, as tensões e deformações variam no espaço ao longo da amostra e requerem ajustes em função da geometria para serem obtidas.

Para o ensaio, são necessários pelo menos 15 corpos de prova, cujos parâmetros volumétricos são determinados antes da aplicação das cargas. Após isso, é determinada a resistência à tração de 3 corpos de prova aleatoriamente selecionados e o ensaio de fadiga em si é conduzido. O esquema de carregamento é o mesmo já apresentado para o ensaio de determinação do módulo de resiliência e os parâmetros definidores da vida de fadiga são obtidos por uma das seguintes equações:

$$N = k_1 \left(\frac{1}{\sigma_t} \right)^{n_1} \quad (54)$$

$$N = k_2 \left(\frac{1}{\varepsilon_i} \right)^{n_2} \quad (55)$$

$$N = k_3 \left(\frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_3} \quad (56)$$

$$N = k_4 \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_r} \right)^{n_4} \quad (57)$$

Onde N é a vida de fadiga, k_i e n_i são parâmetros experimentais, σ_t é a tensão de tração, ε_i é a deformação de tração inicial, $\Delta\sigma$ é a diferença entre a tensão horizontal e a vertical e σ_r é a resistência à ruptura estática.

A Equação 55 é a utilizada no MeDiNa para descrever o modelo de fadiga do revestimento do pavimento a ser analisado.

2.5.7 Modelo viscoelástico de dano contínuo (VECD)

Um breve histórico do modelo viscoelástico de dano contínuo (VECD) é apresentado por Hou (2009).

O início do desenvolvimento do modelo se deu com a aplicação do trabalho desenvolvido por Schapery (1981), que estudou o comportamento viscoelástico de compósitos com base na análise de dano distribuído.

Kim e Little (1990) aplicaram esse modelo para misturas de asfalto areia. Após isso, Lee e Kim (1998) demonstraram que o modelo VECD pode ser aplicado em ensaios de tensão controlada e de deformação controlada em concretos asfálticos.

Subsequentemente, Daniel e Kim (2002) apresentaram a análise de dano como sendo uma propriedade intrínseca do material e que pode ser obtida via protocolos simplificados de ensaio.

Depois, Chebab et al. (2002) evidenciaram que o princípio de superposição tempo-temperatura é aplicável a materiais danificados, o que trouxe um significativo avanço na otimização das análises em laboratório.

Contudo, conforme Nascimento (2015) cita, os modelos desenvolvidos com base no VECD até então eram todos aplicáveis somente a ensaios monotônicos. Devido a isso, as cargas alcançavam praticamente a capacidade máxima dos equipamentos disponíveis. Além disso, não era possível prever um critério de falha por fadiga, pois era necessário um modelo que fosse aplicável a ensaios de cargas cíclicas.

A partir dessa necessidade, foi desenvolvido o S-VECD, a versão simplificada do modelo VECD que é válida para ensaios a cargas cíclicas, com uma formulação matemática para o dano transitório (no primeiro ciclo de carga) e outra para os demais ciclos. Dentre os trabalhos que foram dedicados ao desenvolvimento do S-VECD, tem-se Underwood et al. (2010) e Underwood et al. (2012).

Diversas pesquisas foram realizadas até culminar no critério de falha baseado na taxa de liberação de energia de pseudo-deformação (G^R), desenvolvido por Sabouri e Kim (2014). Tal critério é independente da temperatura, frequência e modo de aplicação de cargas e requer um protocolo simplificado de ensaios, economizando tempo e custos na caracterização dos materiais.

Nascimento (2015), em sua tese, aplicou o S-VECD para misturas asfálticas do Brasil e utilizou o critério de falha proposto por Sabouri e Kim (2014) e concluiu que tais modelagens são válidas para misturas asfálticas brasileiras.

2.5.7.1 Bases teóricas do modelo viscoelástico de dano contínuo (VECD)

O modelo VECD combina a análise viscoelástica com o conceito de dano contínuo que, segundo Underwood (2011), consiste em considerar a danificação de um corpo através da redução de sua rigidez. Assim, o parâmetro que mede o efeito macroscópico da danificação do material é o módulo secante (C).

Por outro lado, conforme dissertam os mesmos autores, a mensuração do dano, relacionado aos fenômenos em microescala, é mais desafiadora. Para tal, usa-se uma variável de estado interno (S) baseada na teoria do trabalho potencial proposta por Schapery (1990).

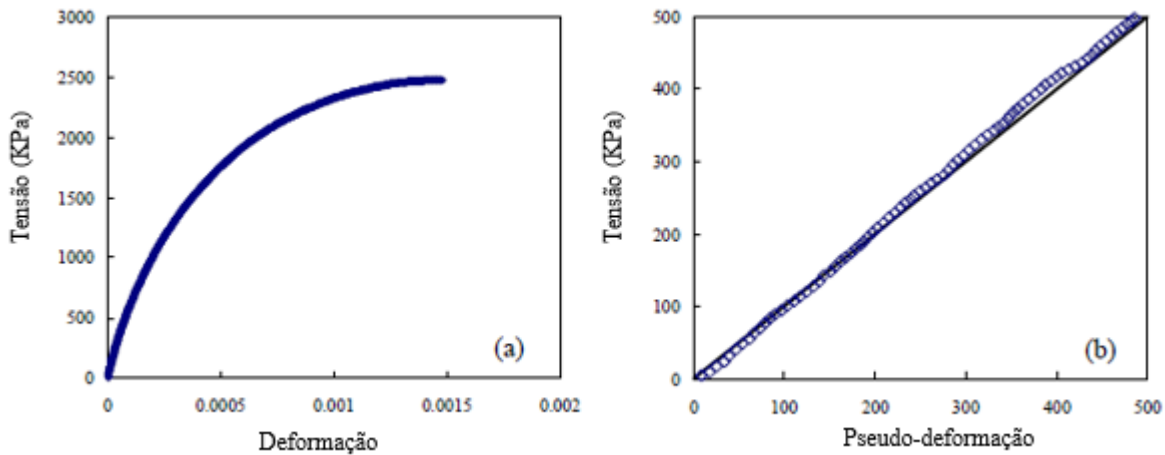
Desse modo, a relação entre C e S consiste na base para aplicação do VECD e, como já comentado, são propriedades intrínsecas do material, ou seja, independem da forma de condução do ensaio (SCHUSTER, 2018).

Os três princípios que sustentam o VECD são:

2.5.7.1.1 Princípio de correspondência elástico-viscoelástico

São utilizadas formulações baseadas em pseudo-variáveis para descrever o comportamento dos materiais. A partir das equações desenvolvidas por Schapery (1984) para meios elásticos, que utilizam variáveis reais, são usadas relações entre variáveis que não têm necessariamente algum sentido físico para os meios viscoelásticos. Desse modo, a relação entre tensão e pseudo-deformação é linear para materiais LVE, assim como ocorre com materiais elásticos (Figura 37).

Figura 37 - Linearização do gráfico de tensão-deformação através de pseudo-variáveis



Fonte: Adaptado de Hou (2009)

A pseudo-deformação é determinada através da Equação 58:

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^t E(t - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (58)$$

Onde

ε^R = pseudo-deformação uniaxial

E_R = módulo de referência

$E(t)$ = módulo de relaxação

ε = deformação real

Assim, substituindo a Equação 58 na Equação 33, pode-se obter um análogo à Lei de Hooke para materiais viscoelásticos:

$$\sigma = E_R \varepsilon^R \quad (59)$$

Ou, em termos de pseudo-rigidez:

$$\sigma = C \varepsilon^R \quad (60)$$

Desse modo, C assume valor unitário quando o material não apresenta dano e valores entre 0 e 1 para o estado danificado.

2.5.7.1.2 Teoria do trabalho potencial

Para descrever como o dano afeta a pseudo-rigidez do material, usa-se a abordagem da termodinâmica de processos irreversíveis. De acordo com essa abordagem, o trabalho exercido sobre o material não é completamente transformado em energia de deformação pois uma parte é responsável pela manifestação do dano.

Assim, a evolução do dano e a relação tensão-deformação são dadas pelas Equações 61 e 62:

$$S_m = \left(-\frac{\partial W^R}{\partial S_m} \right)^{\alpha_m} \quad (61)$$

$$\sigma = C(S)\varepsilon^R \quad (62)$$

Onde S_m é a variável de estado interno representando do dano, W^R é a função de energia de pseudo-deformação e α_m é uma constante característica do material.

Sabendo-se que a área do gráfico de tensão-deformação fornece o trabalho exercido pela carga sobre a amostra, pode-se obter:

$$W^R = \frac{1}{2} C(S)(\varepsilon^R)^2 \quad (63)$$

Substituindo a Equação 61 na Equação 63:

$$S = \int_0^t \left[\frac{1}{2} \frac{dC}{dt} (\varepsilon^R)^2 \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} dt \quad (64)$$

A expressão acima pode ser aproximada, conforme Lee e Kim (1998), pela série:

$$S = \sum_{t=1}^N \left[\frac{1}{2} (\varepsilon^R)^2 (C_{i-1} - C_i) \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (t_{i-1} - t_i)^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (65)$$

2.5.7.1.3 Princípio de superposição tempo-temperatura:

Conforme expõe Mangiafico (2014), o princípio de superposição tempo-temperatura é a propriedade de certos materiais que permite aglomerar a influência da temperatura e da frequência de pulsação de cargas em um único parâmetro. Em misturas asfálticas, isso é evidente pelo fato de que uma aplicação lenta de cargas a baixas temperaturas produz a mesma resposta que a aplicação de cargas a altas frequências e altas temperaturas.

Desse modo, as curvas mestras podem utilizar um único parâmetro no eixo das abscissas que combine os efeitos da temperatura e da frequência. O caso mais comum é associar ambas em uma variável chamada de frequência reduzida. Assim sendo, os resultados de ensaios de módulo complexo realizados em diferentes temperaturas são deslocados horizontalmente no gráfico através da multiplicação de suas frequências de ensaio pelo chamado *shift factor*, que é calculado para uma dada temperatura arbitrariamente escolhida. Desse modo, todas as diferentes curvas formam um só gráfico para essa temperatura de referência e variam em função da frequência reduzida. Na Figura 38, pode-se ver os resultados do ensaio de módulo complexo a diferentes temperaturas e, na Figura 39, todos eles se juntam em uma só curva através da multiplicação de suas frequências pelo *shift factor*.

Figura 38 - Curva mestra sem aplicação do *shift factor*

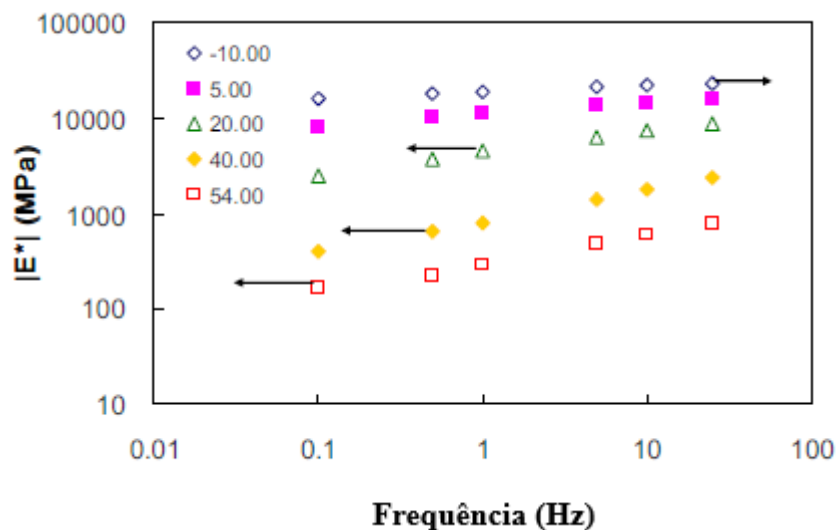
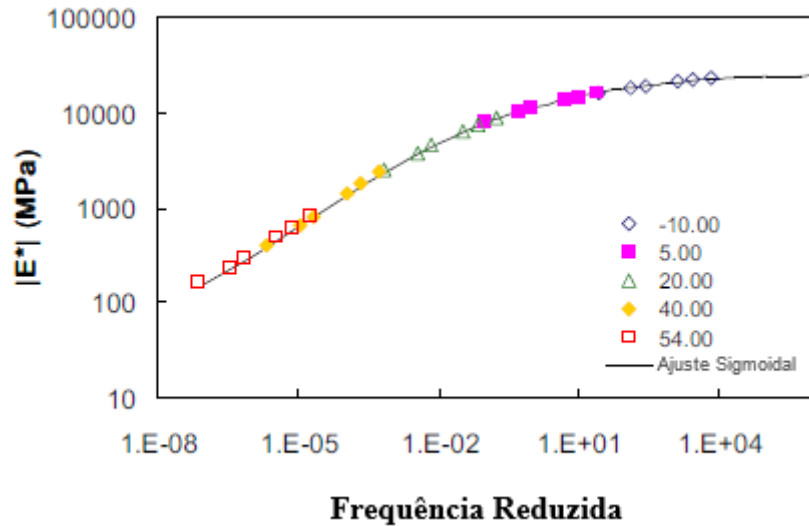


Figura 39 - Curva mestra com aplicação do *shift factor*



Fonte: Adaptado de Hou (2009)

A formulação do *shift factor* (a_T) proposta por Williams et al. (1955) é dada pela Equação 66:

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (66)$$

Sendo C_1 e C_2 constantes de regressão, T a temperatura da curva a ser deslocada e T_{ref} a temperatura de referência.

2.5.7.2 Modelo viscoelástico de dano contínuo simplificado (S-VECD)

Conforme já exposto, o S-VECD surge como uma resposta à necessidade de aplicar os conceitos do VECD para ensaios cíclicos e, por conseguinte, prever a vida de fadiga de misturas asfálticas. Desse modo, a formulação do modelo, conforme Underwood et al. (2012) é dada pelas Equações 67 a 72.

Equações para a pseudo-deformação:

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^{\xi} E(\xi - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad \xi \leq \xi_p \quad (67)$$

$$(\varepsilon_{0,ta}^R)_{ciclo\ i} = \frac{1}{E_R} \frac{\beta + 1}{2} [(\varepsilon_{0,pp})_i \times |E^*|_{LVE}] \quad \xi > \xi_p \quad (68)$$

Equações para a pseudo-rigidez:

$$C = \frac{\sigma}{\varepsilon^R \times DMR} \quad \xi \leq \xi_p \quad (69)$$

$$C^* = \frac{(\beta + 1)\sigma_{0,pp}}{2\varepsilon_{0,ta}^R \times DMR} \quad \xi > \xi_p \quad (70)$$

Equações para a evolução do dano:

$$(dS_{transitório})_j = \left(-\frac{DMR}{2} (\varepsilon^R)_j^2 \Delta C_j \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} (\Delta \xi)_j^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad \xi \leq \xi_p \quad (71)$$

$$(dS_{cíclico})_{ciclo\ i} = \left(-\frac{DMR}{2} (\varepsilon_{0,ta}^R)^2 \Delta C_i \right)^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \times [\Delta N_i \times \xi_p \times K_1]^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad \xi > \xi_p \quad (72)$$

Sendo:

ε^R = pseudo-deformação;

E_R = módulo de referência;

$E(t)$ = módulo de relaxação;

ξ = tempo reduzido;

ξ_p = tempo de pulso reduzido;

τ = variável de integração;

$(\varepsilon_{0,ta}^R)$ = pseudo-deformação de amplitude de tração;

β = fator de forma do carregamento;

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

$|E^*|_{LVE}$ = norma do módulo complexo ensaiado;

DMR = razão do módulo dinâmico;

$\sigma_{0,pp}$ = tensão de pico a pico;

ΔC_j = incremento de C entre j e $j - 1$;

ΔC_i = incremento de C entre os ciclos i e $i - \Delta N$;

α = taxa de evolução do dano;

$\Delta \xi$ = incremento do tempo reduzido entre j e $j - 1$;

ΔN_i = variação do número de ciclos

K_1 = fator de ajuste de carga

dS = evolução do dano

Uma descrição mais detalhada das equações acima foge do escopo do presente trabalho. Contudo, pode-se perceber que o S-VECD apresenta um par de equações para a pseudo-deformação, pseudo-rigidez e para a evolução do dano. Uma delas corresponde ao que o modelo VECD já previa em ensaios monotônicos e passa a ser aplicado para o primeiro ciclo de carga, ao passo que a segunda equação de cada par se aplica aos demais ciclos de carregamento. Tal diferenciação é, segundo Underwood et al. (2010), necessária devido à grande quantidade de dano gerada no primeiro ciclo de carga (fase transitória) e que demanda uma formulação mais rigorosa. Para os demais ciclos (fase cíclica), contudo, adota-se a modelagem simplificada.

O tempo reduzido pode ser definido a razão entre o tempo e o *shift factor* (Equação 73) e o tempo de pulso reduzido, considerado como o limiar entre as fases transitória e cíclica, é dado pelo tempo de pulso dividido pelo *shift factor* (Equação 74).

$$\xi = \frac{t}{a_T} \quad (73)$$

$$\xi_p = \frac{t_p}{a_T} \quad (74)$$

O fator de forma discrimina quanto do carregamento aplicado ao longo do tempo foi de tração. Desse modo, ele assume valor unitário quando só houve tração e é igual a 0 quando todo o histórico é de compressão (Equação 75).

$$\beta = \frac{\sigma_{pico} + \sigma_{vale}}{|\sigma_{pico}| + |\sigma_{vale}|} \quad (75)$$

O fator razão do módulo dinâmico (*DMR*) é dado a partir da relação entre a norma do módulo complexo obtida na fase de *fingerprint* e a norma obtida no ensaio de módulo complexo em si (Equação 76). Assim, são corrigidas as variabilidades advindas da heterogeneidade de amostra para amostra.

$$DMR = \frac{|E^*|_{fingerprint}}{|E^*|_{LVE}} \quad (76)$$

O fator de ajuste da carga é dado pela Equação 77:

$$K_1 = \frac{1}{\xi_f - \xi_i} \left[\frac{1}{\beta + 1} \int_{\xi_i}^{\xi_f} [\beta - \cos(2\pi ft)]^{2\alpha} d\xi \right] \quad (77)$$

Além das equações apresentadas acima, era fundamental que fosse determinado um critério de falha por fadiga que fosse independente da temperatura, frequência das cargas e do tipo de ensaio e, conseqüentemente, reduzisse o tempo e custo associados aos procedimentos de laboratório.

Tal critério foi apresentado por Sabouri e Kim (2014) e consiste em correlacionar a taxa de liberação da energia de pseudo-deformação (G^R) com o número de ciclos que levam à fadiga (N_f) obtido através do critério da queda do ângulo de fase via realização de ensaio em uma única temperatura e modo de carregamento. A partir dessa relação, que foi identificada pelos autores como sendo uma propriedade fundamental da mistura, é possível prever a fadiga a quaisquer outras condições de ensaio.

O parâmetro G^R é obtido através da Equação 78:

$$G^R = \frac{\int_0^{N_f} W_C^R}{N_f^2} \quad (78)$$

Onde a integral no numerador indica que é levada em conta a influência que toda a história de carregamento tem sobre a liberação de pseudo-energia (W_C^R). Esta, por sua vez, é obtida através da Equação 79.

$$(W_C^R)_i = \frac{1}{2} (\varepsilon_{ta}^R)_i^2 (1 - F_i) \quad (79)$$

Sendo $(\varepsilon_{ta}^R)_i$ a amplitude de pseudo-deformação no ciclo i e F_i a pseudo-rigidez.

Para maiores informações acerca do modelo S-VECD e de sua formulação, consultar obras como Schuster (2018), Nascimento (2015), Underwood et al. (2010) e Underwood et al. (2012).

2.6 LVECD

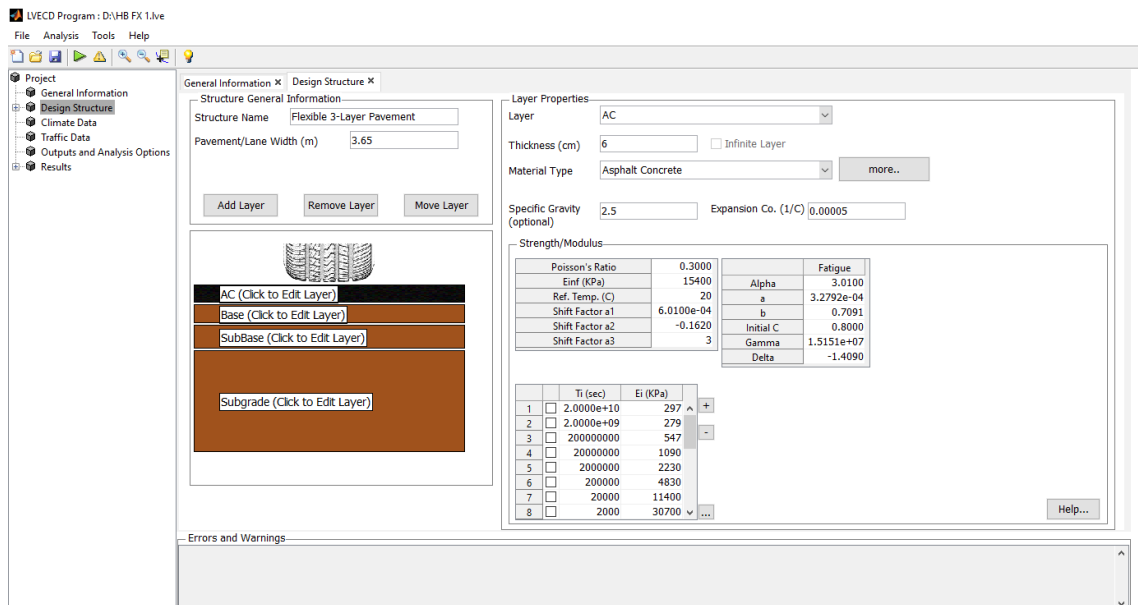
A combinação da análise de sistema de camadas, método de elementos finitos e o modelo S-VECD foi objeto da pesquisa de Eslaminia et al. (2012) e teve, como resultado, o LVECD (*Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses*).

O *software* analisa o pavimento a partir das propriedades viscoelásticas do revestimento e das propriedades elásticas das demais camadas. Desse modo, é possível, a partir dos modelos de dano, obter uma resposta totalmente mecanística para prever o trincamento do pavimento por fadiga (NASCIMENTO, 2015).

A análise realizada pelo programa tem, como *inputs*:

- Dados dos materiais: espessura de cada camada e dados reológicos. No caso do revestimento asfáltico, são inseridos os resultados do ensaio de módulo complexo e do ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão, além da espessura da camada (Figura 40). Para as demais camadas, devem ser informados o seu módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e a respectiva espessura;

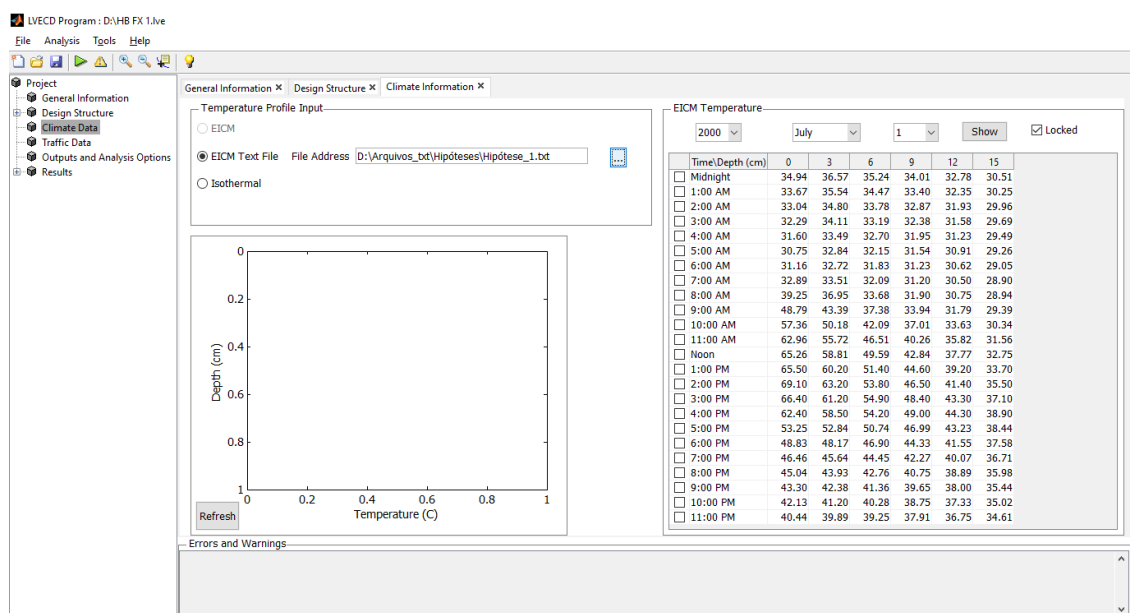
Figura 40 - Parâmetros da camada de revestimento na aba *Design Structure*



Fonte: Autor

- Dados climáticos: devem ser informadas as temperaturas medidas no revestimento em diferentes profundidades para cada hora do dia ao longo do período de projeto (Figura 41);

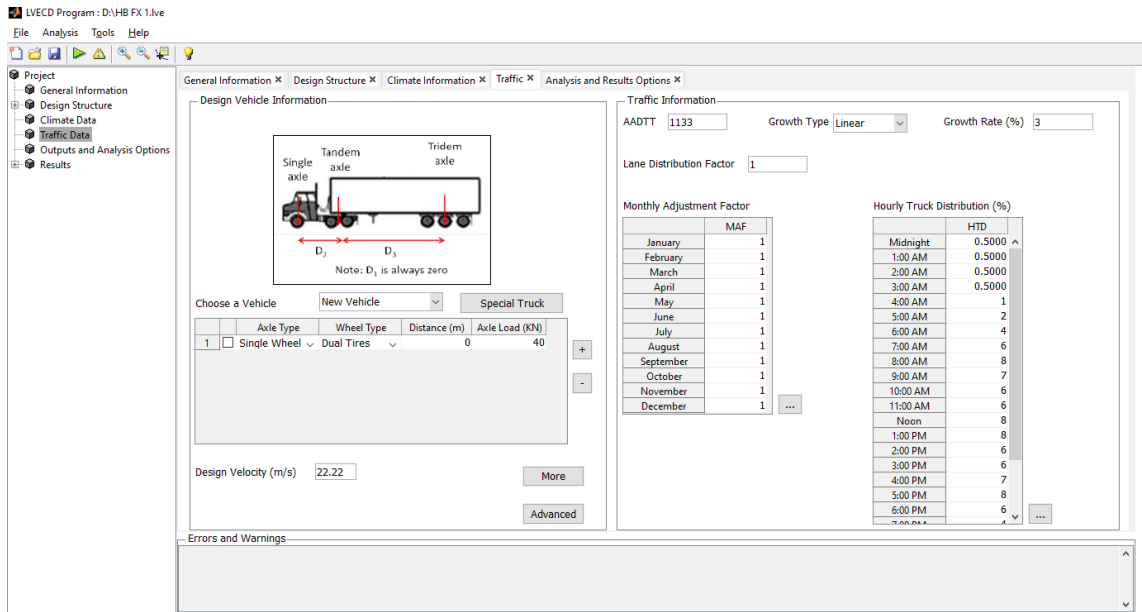
Figura 41 - Aba *Climate Data*



Fonte: Autor

- Dados de Tráfego: para descrever a aplicação das cargas no pavimento, são informadas a sua configuração e sua magnitude. Ademais, há entrada para o número de passagens diárias do eixo-padrão, taxa de crescimento do tráfego e distribuição do tráfego ao longo dos meses do ano e das horas do dia (Figura 42);

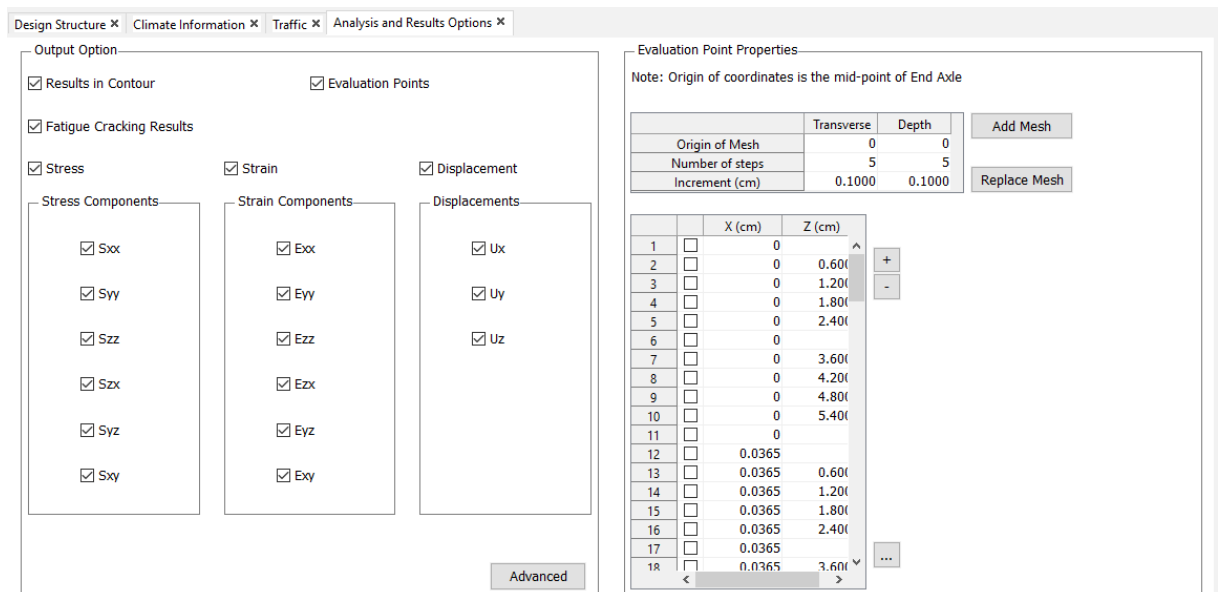
Figura 42 - Aba *Traffic Data*



Fonte: Autor

- Dados de análise: deve-se informar quais parâmetros serão calculados e definir a malha de pontos para a realização dos cálculos (Figura 43).

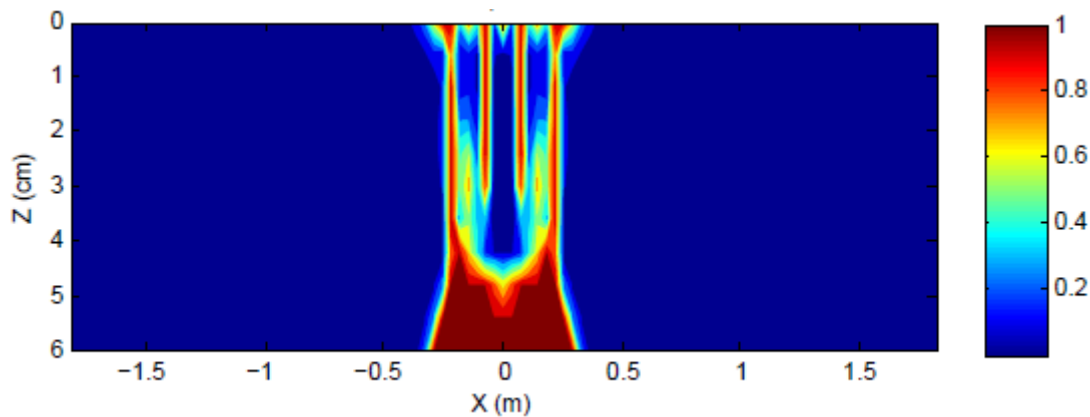
Figura 43 - Aba *Analysis and Results Options*



Fonte: Autor

Após cada simulação, o LVECD fornece, como *outputs*, planilhas eletrônicas com o dano calculado em cada um dos pontos da malha especificada pelo usuário na aba *Analysis and Results Options* e gráficos de dano (Figura 44) exibindo o dano no interior do revestimento, em escala de 0 (azul) a 1 (vermelho).

Figura 44 – Exemplo de gráfico de dano gerado pelo LVECD



Fonte: Autor

Na abordagem do presente trabalho, o LVECD será utilizado para simular o comportamento LVE dos pavimentos frente a diferentes condições de temperatura.

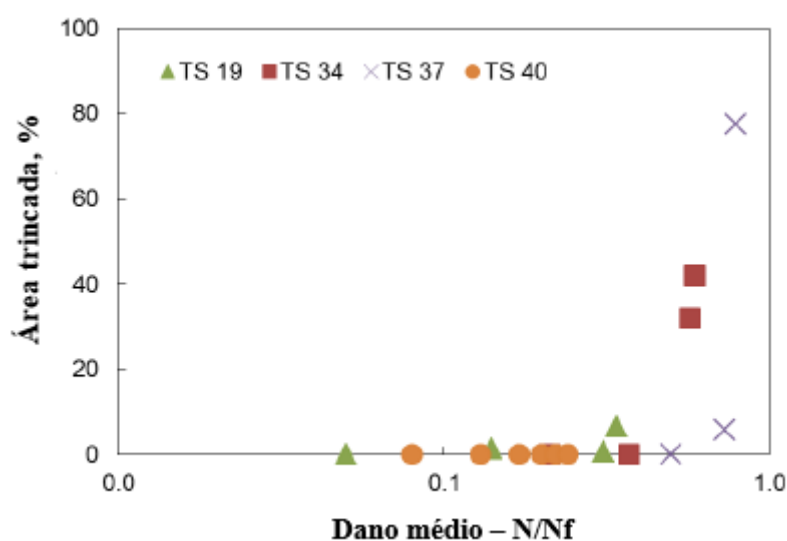
2.7 CALIBRAÇÃO DO DANO PARA ÁREA TRINCADA

Nascimento (2015) expõe, em sua tese de doutorado, uma abordagem que correlaciona o dano médio obtido através do LVECD como a área trincada do pavimento, que pode ser medida em campo. Isso tem por objetivo, conforme o autor, possibilitar a validação das simulações feitas em laboratório através de características de fácil observação em campo.

Além disso, conforme o autor, o percentual de área trincada do pavimento (AT) carrega informações referentes a todos os dados de entrada do LVECD, como as características mecânicas do revestimento asfáltico, a dinâmica das camadas, a variação da temperatura e o tráfego.

A partir de observações feitas em pavimentos experimentais do projeto Fundão, percebeu-se que o dano médio no revestimento no momento em que se inicia a fissuração por fadiga tem uma relação direta com a taxa média de crescimento do dano, conforme pode-se observar na Figura 45. O autor ressalta que isso pode se dever ao fato de que a estrutura danificada do asfalto redistribui as tensões, o que não é considerado nas simulações do LVECD.

Figura 45 - Relação entre dano médio e área trincada em trechos experimentais do projeto Fundão



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

Assim sendo, foi utilizada uma abordagem análoga à construção de curvas mestras de módulo complexo para a determinação de uma única curva que descreva a porcentagem de AT em função do dano médio no revestimento. Tal abordagem consiste em duas etapas. Na primeira, aplica-se um fator de *shift* no dano para obter-se um dano reduzido. Desse modo, transforma-se o dano de uma mistura para um valor de referência. Na segunda etapa, são determinados os coeficientes de regressão entre o dano reduzido e a porcentagem de AT.

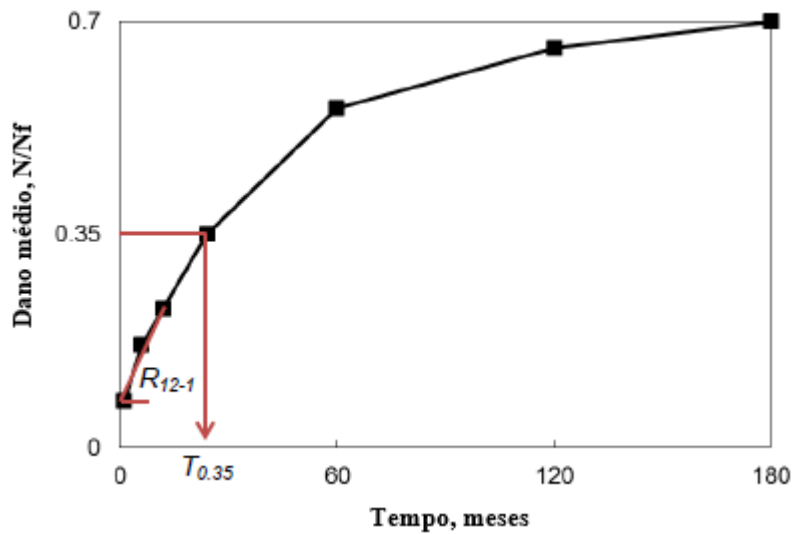
Para a determinação do *shift factor*, foi adotado um fator multiplicativo, conforme a Equação 80:

$$\frac{N}{N_f} red = \frac{N}{N_f} \times S \quad (80)$$

Onde S é o fator multiplicativo.

As abordagens adotadas para o cálculo do fator de *shift* foram baseadas em dois parâmetros (Figura 46). O primeiro deles é o tempo em que o dano médio atinja o valor de 0,35 ($T_{0,35}$) e o segundo é a taxa secante (em dano por mês) entre 12 meses e 1 mês. Na presente obra, foram adotados tanto o primeiro como o segundo parâmetro.

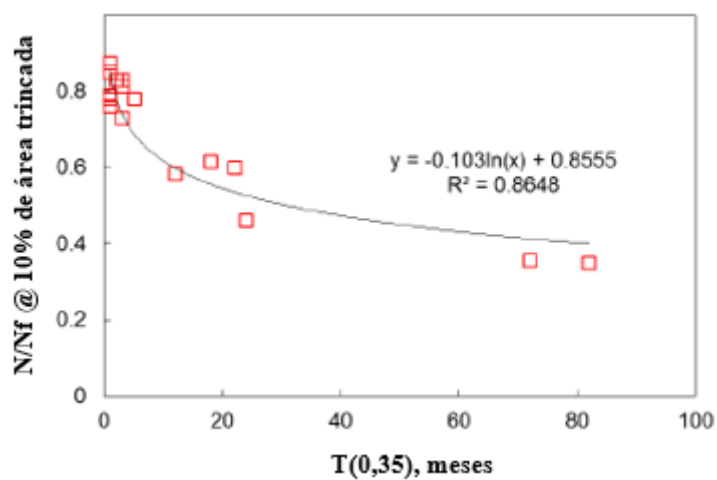
Figura 46 - Determinação dos parâmetros usados para o cálculo do *shift factor*



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

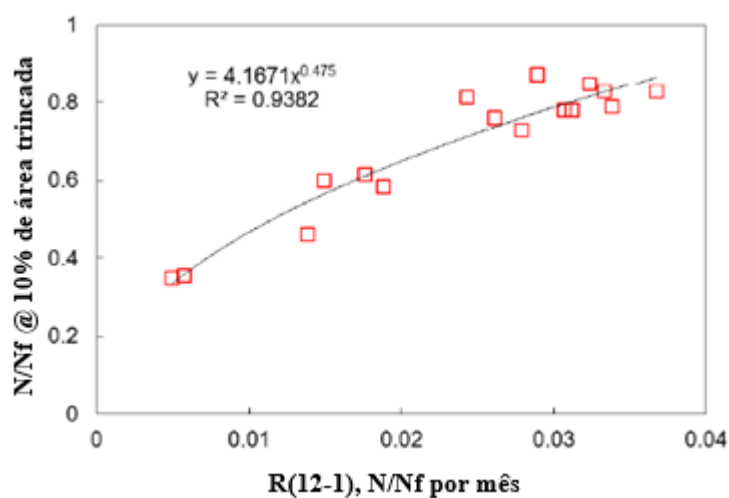
Conforme observado, o dano médio correspondente a uma AT de 10% apresenta uma boa correlação com o tempo em que o dano médio atinja o valor de 0,35 (Figura 47) e com a taxa secante de dano por mês entre o 1º e 12º mês (Figura 48).

Figura 47 - Gráfico de $T(0,35)$ versus dano médio para A.T. de 10%



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

Figura 48 - Gráfico de $R(12-1)$ versus dano médio para A.T. de 10%

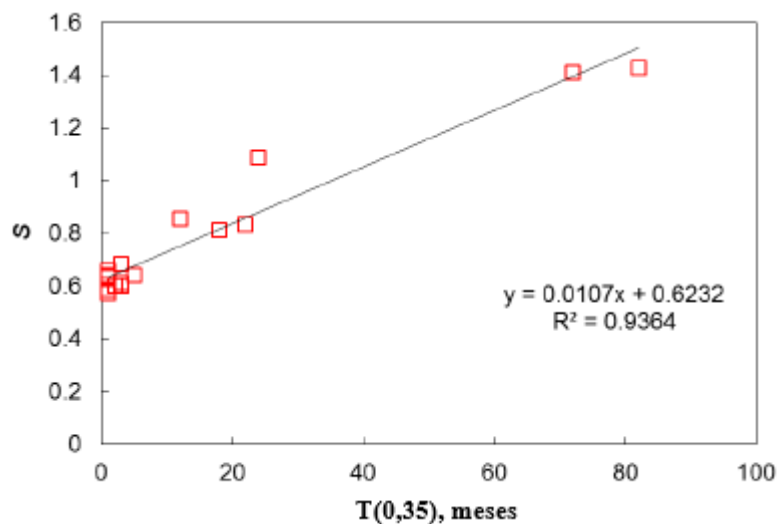


Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

Pode-se perceber na Figura 47 que o dano médio para AT de 10% tende a se estabilizar a partir de 80 meses. Desse modo, adota-se o valor de 80 meses para $T_{0,35}$ quando este passar daquele valor.

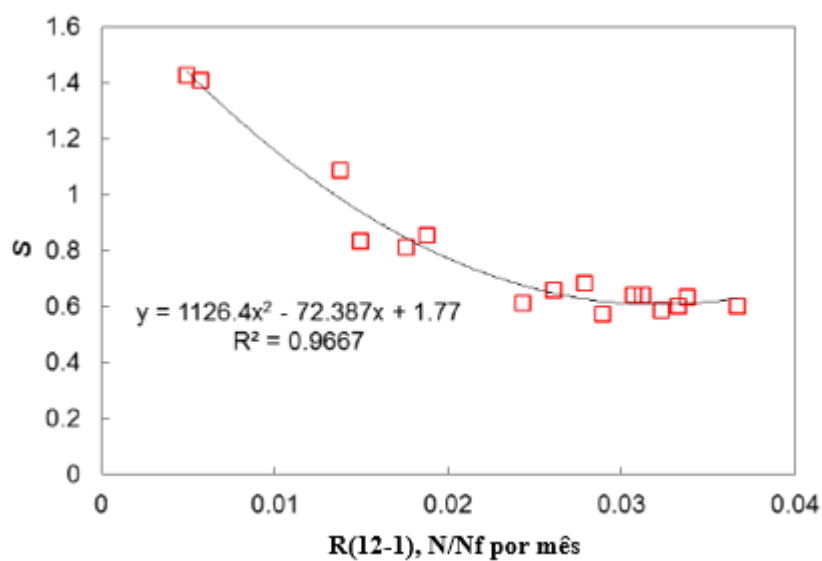
O gráfico do *shift factor* S em função de $T_{0,35}$ e de R_{12-1} pode ser visto na Figura 49 e na Figura 50, respectivamente. As correlações entre o fator de correção e os parâmetros estão descritas nas Equações 81 e 82.

Figura 49 - Fator de *shift* em função de $T(0,35)$



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

Figura 50 - Fator de *shift* em função de $R(12-1)$



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

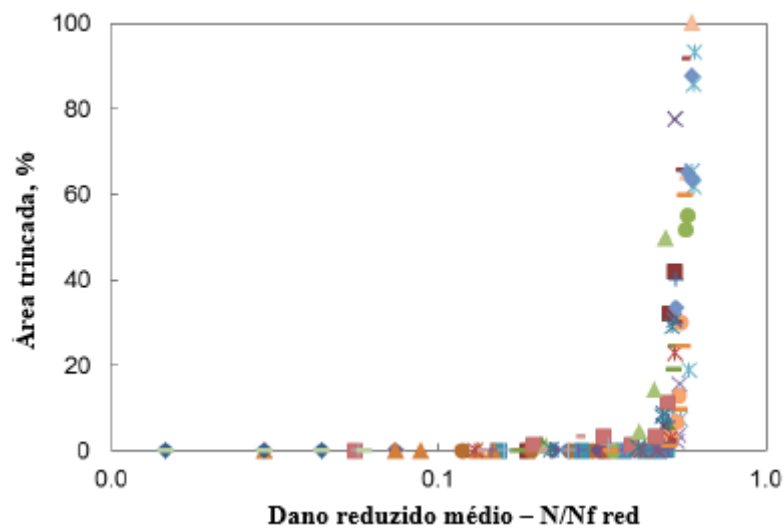
$$S_{T_{0,35}} = A \times T_{0,35} + B \quad (81)$$

$$S_{R_{12-1}} = \beta_1 \times (R_{12-1})^2 + \beta_2 \times (R_{12-1}) + \beta_3 \quad (82)$$

Sendo A e B coeficientes de ajuste linear e β_1 , β_2 e β_3 os coeficientes de ajuste segundo função polinomial de segundo grau.

Aplicando o fator de *shift* ao dano, obtém-se o dano reduzido, que engloba todas as curvas de dano em um único gráfico (Figura 51).

Figura 51 - Área trincada versus dano reduzido para T(0,35)



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

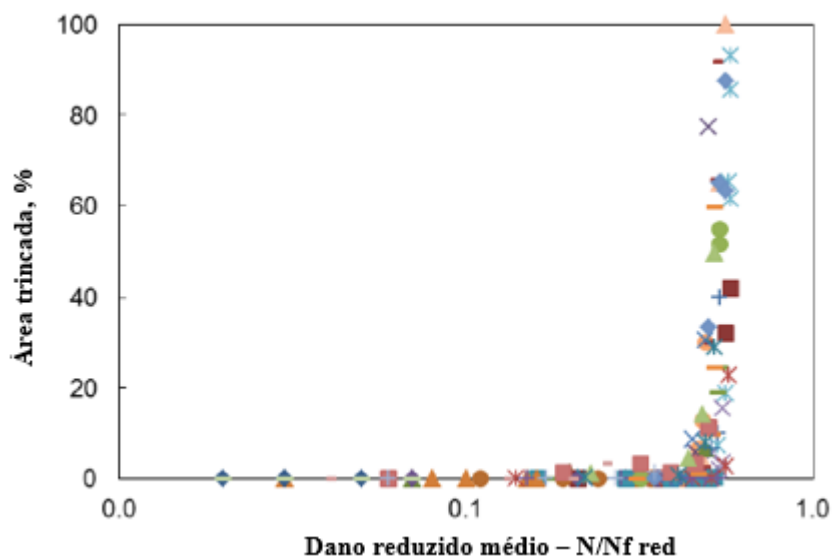
Desse modo, pode-se partir para a próxima etapa, que consiste em correlacionar o dano reduzido com a AT. Para isso, foi usada a Equação 83.

$$AT = C_1 \times \left(\frac{N}{N_f} red \right)^{C_2} \quad (83)$$

Sendo AT a área trincada, em porcentagem e C_1 e C_2 os coeficientes de regressão.

O resumo dos parâmetros para obtenção dos *shift factors* e da AT segundo cada um está expresso no Quadro 2 e no Quadro 3.

Figura 52 - Área trincada versus dano reduzido para R(12-1)



Fonte: Nascimento (2015)

Quadro 2 - Parâmetros obtidos para a função de transferência segundo T(0,35)

Parâmetro	Valor obtido por Nascimento (2015)
A	0,008274
B	0,635237
C_1	7272,68
C_2	8,6629

Fonte: Nascimento (2015)

Quadro 3 - Parâmetros obtidos para a função de transferência segundo R(12-1) (continua)

Parâmetro	Valor obtido por Nascimento (2015)
β_1	836,913

(conclusão)

Parâmetro	Valor obtido por Nascimento (2015)
β_2	-50,496
β_3	1,399
C_1	3700,98
C_2	7,4006

Fonte: Nascimento (2015)

As funções de transferência apresentadas exibem uma acurácia superior àquela apresentada pelo MEPDG (NCHRP, 2004a) para prever a AT. Conforme apresentado por Nascimento (2015), as duas funções de transferência propostas apresentam um coeficiente R^2 de 0,72 versus um R^2 de 0,27 apresentado pela função utilizada no MEPDG. Contudo, apesar da maior precisão, deve-se considerar que, devido ao empirismo presente em tais funções, os resultados podem divergir bastante para situações diferentes daquelas que foram analisadas em sua elaboração.

2.8 MEDINA

O MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos) consiste em um método de dimensionamento contido em um programa computacional que dimensiona e verifica o desempenho de pavimentos a partir da Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC). O programa é uma iniciativa do IPR (Instituto de Pesquisas Rodoviárias), COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia), do CENPES (Centro de Pesquisas da Petrobrás) e de diversas universidades do Brasil.

As hipóteses adotadas pelo MeDiNa, conforme tal qual está exposto nas descrições do próprio *software*, são:

- a) Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- b) A Lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- c) As camadas não têm peso, para efeito do cálculo do estado de tensões e deformações;

- d) As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- e) Todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- f) A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- g) Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- h) A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda a área circular de contato;
- i) A grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- j) As condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

O programa traz, como *inputs*, dados referentes ao tráfego (Figura 53), e às propriedades mecânicas dos materiais de cada camada do pavimento (Figura 54 e Figura 55).

Figura 53 - *Inputs* de tráfego do MeDiNa

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1370
FV:	1,000
N anual total:	5,00e+05
% Veículos na faixa de projeto:	100
N Anual da faixa:	5,00e+05
Taxa de crescimento (%):	0,0
Período de projeto (anos):	10
N Eq:	5,00e+06

Fonte: Autor

Figura 54 - *Inputs* de dados do MeDiNa para o concreto asfáltico

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	Nível 4
Parâmetros	
Espessura (cm)	10,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	6000
Características	
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Massa específica (g/cm ³)	2,4
Curva de Fadiga	
Modelo:	$k1 \cdot (et \wedge k2)$
Coefficiente de Regressão (k1):	5,0E-13
Coefficiente de Regressão (k2):	-3,75

Fonte: Autor

Figura 55 - *Inputs* de dados do MeDiNa para materiais granulares

MATERIAL GRANULAR	
Material	Brita Graduada - Gnaisse C5
Parâmetros	
Espessura (cm)	20,0
Coefficiente de Poisson	0,35
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	381
Características	
Energia Compactação	Modificada
Descrição do Material	Brita Graduada
Abrasão Los Angeles (%)	43,0
Norma ou Especificação	DNIT ES 141
Massa específica (g/cm ³)	2,223
Umidade Ótima (%)	5,0
Deformação Permanente	
Modelo:	$ep = psi1 \cdot (s3 \wedge psi2) \cdot (sd \wedge psi3) \cdot (N \wedge psi4)$
Coefficiente de Regressão (k1 ou psi1):	0,0868
Coefficiente de Regressão (k2 ou psi2):	-0,2801
Coefficiente de Regressão (k3 ou psi3):	0,8929
Coefficiente de Regressão (k4 ou psi4):	0,0961

Fonte: Autor

Percebe-se que os dados de entrada do programa abrangem modelos de comportamento elástico, tanto para a camada de revestimento como para as demais camadas. Além disso, também há a entrada de parâmetros de fadiga para o revestimento obtidos a partir do ensaio de compressão diametral, segundo a Equação 84 e dados referentes à deformação permanente, para as demais camadas, segundo a Equação 85.

$$N_f = k_1 \times \varepsilon_t^{k_2} \quad (84)$$

$$\varepsilon_p = \psi_1 \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\rho_0}\right)^{\psi_2} \cdot \left(\frac{\sigma_d}{\rho_0}\right)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (85)$$

Onde:

N_f = vida de fadiga

$k_1, k_2, \psi_1, \psi_2, \psi_3$ e ψ_4 = coeficientes de regressão

ε_t = deformação de tração

ε_p = deformação permanente

σ_3 = tensão confinante

σ_d = tensão de desvio

N = número de ciclos de carga

O programa fornece, como um dos seus *outputs*, a área trincada por fadiga. Tal parâmetro é obtido a partir da calibração proposta por Fritzen (2016), que utilizou dados obtidos em campo e em laboratório, totalizando 45 trechos. A partir das observações, obteve um fator S que ajustou os dados ajustados do tráfego *versus* a área trincada em uma curva do tipo sigmoideal.

É a área trincada obtida via a calibração proposta por Fritzen (2016) que será comparada com a área trincada obtida pela função de transferência apresentada por Nascimento (2015) e que é feita a partir das simulações do LVECD.

2.9 SICRO

Tendo em vista a análise econômica feita a partir dos resultados da aplicação da função de transferência, será feita uma resumida apresentação do SICRO.

Conforme consta no Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes – Volume 1 (DNIT, 2017), a base de dados usada no SICRO (Sistema de Custos Referenciais de Obras) é o resumo de todo o arcabouço técnico do DNIT (e extinto DNER) quanto à composição dos preços de materiais, equipamentos, mão de obra, e a respeito dos fatores que influenciam o andamento de obras na área de engenharia de transportes.

O Manual, na edição de 2017, está dividido nos seguintes volumes:

- 1) Metodologia e conceitos
- 2) Pesquisa de preços
- 3) Equipamentos
- 4) Mão de obra
- 5) Materiais
- 6) Fator de influência das chuvas
- 7) Canteiros de obras
- 8) Administração local
- 9) Mobilização e desmobilização
- 10) Manuais técnicos
- 11) Composições de custos
- 12) Produções de equipes mecânicas

Para a realização do orçamento e da subsequente análise econômica a ser feita, foram utilizadas as composições de custo presentes no Volume 11 do Manual.

As composições de custos são planilhas que apresentam todos os insumos e processos necessários para a execução de alguma atividade, seja a produção de algum material de pavimentação ou sua execução.

Para obter os preços em si de cada serviço, insumo, equipamento ou mão de obra, são disponibilizados pelo DNIT relatórios de composição de custos para cada estado do país. Desse modo, os preços usados para orçar os pavimentos foram baseados no relatório de Outubro de 2018 para o estado do Rio Grande do Sul. Na Figura 56, está representado um exemplo de composição de custo com valores atualizados no fim do ano de 2018 para o RS.

Figura 56 - Exemplo de composição do SICRO para o Rio Grande do Sul

SISTEMA DE CUSTOS REFERENCIAIS DE OBRAS - SICRO		Rio Grande do Sul		FIC 0,03164		
Custo Unitário de Referência		Outubro/2018		Produção da equipe 168,20000 m ²		
4011211 Reforço do subleito com material de jazida		Valores em reais (R\$)				
A - EQUIPAMENTOS		Quantidade	Utilização		Custo Horário	Custo Horário Total
			Operativa	Improdutiva	Produtivo	Improdutivo
E9571	Caminhão tanque com capacidade de 10.000 l - 188 kW	1,00000	0,93	0,07	169,9920	49,4741
E9518	Grade de 24 discos rebocável de 24"	1,00000	0,52	0,48	2,2450	1,5605
E9524	Motoniveladora - 93 kW	1,00000	0,78	0,22	177,9442	80,5077
E9762	Rolo compactador de pneus autopropelido de 27 t - 85 kW	1,00000	0,72	0,28	144,3583	88,8580
E9685	Rolo compactador pé de carneiro vibratório autopropelido de 11,6 t - 82 kW	1,00000	1,00	0,00	118,9739	55,5487
E9577	Trator agrícola - 77 kW	1,00000	0,52	0,48	79,4623	32,3651
					Custo horário total de equipamentos	619,0280
B - MÃO DE OBRA		Quantidade	Unidade	Custo Horário		Custo Horário Total
P9824	Servente	1,00000	h	17,5188		17,5188
					Custo horário total de mão de obra	17,5188
					Custo horário total de execução	636,5468
					Custo unitário de execução	3,7845
					Custo do FIC	0,1197
					Custo do FIT	-
C - MATERIAL		Quantidade	Unidade	Preço Unitário		Custo Unitário
					Custo unitário total de material	
D - ATIVIDADES AUXILIARES		Quantidade	Unidade	Custo Unitário		Custo Unitário
4018096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica	1,10000	m ²	0,8600		0,9460
					Custo total de atividades auxiliares	0,9460
					Subtotal	4,8502
E - TEMPO FIXO		Código	Quantidade	Unidade	Custo Unitário	Custo Unitário
4018096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m ²	5914354	2,06250	t	1,2800	2,6400
					Custo unitário total de tempo fixo	2,6400
F - MOMENTO DE TRANSPORTE		Quantidade	Unidade	DMT		Custo Unitário
				LN	RP	P
4018096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica - Caminhão basculante 10 m ²	2,06250	tkm	5914359	5914374	5914389
					Custo unitário total de transporte	
					Custo unitário direto total	7,49

Fonte: DNIT (2018c)

Pode-se observar que, para cada composição, há um FIC (fator de influência de chuvas), que é resultado do tratamento de séries de medições em diversas estações meteorológicas espalhadas pelo país (DNIT, 2017). Assim sendo, serviços que têm forte dependência com as condições climáticas como, por exemplo, terraplanagem, exibem um alto valor de FIC e serviços que ocorrem em ambientes fechados como usinagem de materiais, por exemplo, têm um baixo valor de FIC.

Em caso de serviços realizados em vias já em funcionamento, deve-se levar em consideração a influência do tráfego sobre a obra, o que é feito através do FIT (fator de interferência do tráfego).

Além disso, para o cálculo do custo associado ao momento de transporte, deve-se levar em conta, além da distância média e da carga, qual é a condição de rodagem. Desse modo, existem composições específicas de transporte de materiais em condição de leito natural, revestimento primário ou rodovia pavimentada.

3 METODOLOGIA

Todo o desenvolvimento da presente pesquisa se dá em torno da elaboração dos *inputs* de temperatura que alimentam o LVECD, a realização das simulações de desempenho à fadiga com base no S-VECD e da análise e comparação dos resultados com outros métodos de análise de pavimentos.

Assim, os passos que serão doravante especificados são:

- Obtenção dos *inputs* climáticos
- Obtenção dos *inputs* de tráfego e de materiais
- Emprego do LVECD
- Emprego do MeDiNa
- Emprego do método de dimensionamento do DNER
- Aplicação das funções de transferência de Nascimento (2015)
- Análise comparativa de AT a partir do MeDiNa e do LVECD
- Análise econômica a partir do dimensionamento feito com o LVECD, MeDiNa e método do DNER

3.1 OBTENÇÃO DOS INPUTS CLIMÁTICOS

3.1.1 Seleção dos dados

Conforme já comentado, o LVECD necessita de dados climáticos com informações de temperatura a diferentes espessuras do revestimento e com intervalos horários.

Logo, para que o objetivo geral do trabalho fosse alcançado, era primordial que houvesse dados regionais de temperatura de pavimentos medidos durante um ano completo e ao longo das 24 horas do dia. Com isso, seria possível captar as influências que as variações sazonais e diárias de temperatura têm sobre os parâmetros viscoelásticos da mistura asfáltica em análise e, conseqüentemente, sobre o seu desempenho ao fenômeno da fadiga, visto que a

modelagem da curva mestra do concreto asfáltico leva em consideração a temperatura em cada ponto no espaço e tempo.

Contudo, dada a inexistência de dados coletados de tal forma no estado do Rio Grande do Sul, foram utilizadas temperaturas medidas em estudos realizados por universidades estadunidenses. Juntamente com os arquivos do LVECD, são disponibilizadas informações provenientes do EICM de 5 cidades que satisfaziam as exigências para tal análise: Cheyenne (WY), San Diego (CA), Phoenix (AZ), Raleigh (NC) e Washington D.C. Analisando as temperaturas médias de cada cidade e localização geográfica, foi escolhida a cidade de San Diego, dado que ela apresenta mais similaridade com Santa Maria em relação às temperaturas médias e está localizada a uma latitude de 32,7 ° N, próximo aos 29,7° S de Santa Maria rebatidos no hemisfério norte. O resumo da comparação dos dados entre as diferentes cidades estadunidenses e Santa Maria estão resumidos no Quadro 4.

Quadro 4 - Comparação entre dados de Santa Maria e cidades americanas

Cidades/Diferenças de	Latitude	T. Máx	T. Mín	T. Méd
Santa Maria - Cheyenne (WY)	11,4586	9,95	12,71	11,30
Santa Maria - San Diego (CA)	3,0422	3,75	0,19	1,75
Santa Maria - Phoenix (AZ)	3,7363	5,65	3,39	4,55
Santa Maria - Raleigh (NC)	6,0963	2,75	3,81	3,25
Santa Maria -Washington D.C.	9,1985	6,45	5,91	6,15

Legenda:

	Mais próximo
	Mais distante

Fonte: Autor

Tais medições foram feitas com intervalos de 1 hora entre cada dado. Além disso, tais dados foram coletados em 11 diferentes profundidades (dadas em centímetros) dentro da camada de revestimento asfáltico: 0 (na superfície); 2; 4,1; 6,1; 8,1; 10,2; 12,2; 14,2; 16,3; 18,3 e 20,3 cm. Tais dados foram obtidos em um arquivo no formato .txt e convertidos para planilhas do Excel, para melhor manipulação dos dados (Quadro 5)

Quadro 5 - Submatriz da tabela de dados de temperatura de San Diego

Profundidade (cm)	Temperaturas Nodais						
	0	2	4,1	6,1	8,1	10,2	12,2
Data	Nó 0	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
01/01/2000 00:00	18,3	19,4	20,4	21,4	22,3	23,1	23,8
01/01/2000 01:00	18,9	19,7	20,5	21,3	22,1	22,8	23,5
01/01/2000 02:00	18,9	19,7	20,4	21,2	21,9	22,7	23,4
01/01/2000 03:00	19,5	20,1	20,7	21,3	22	22,7	23,3
01/01/2000 04:00	19,6	20,2	20,8	21,4	22,1	22,7	23,3
01/01/2000 05:00	19,9	20,4	20,9	21,5	22,1	22,7	23,3
01/01/2000 06:00	21,3	21,3	21,6	21,9	22,3	22,8	23,4
01/01/2000 07:00	24,4	23,4	23,1	22,9	23,1	23,3	23,7
01/01/2000 08:00	28,6	26,8	25,6	24,9	24,5	24,3	24,4
01/01/2000 09:00	32,1	30,1	28,4	27,2	26,3	25,8	25,4
01/01/2000 10:00	35,2	32,7	30,8	29,3	28,2	27,3	26,7
01/01/2000 11:00	38,6	35,6	33,3	31,6	30,1	28,8	27,9
01/01/2000 12:00	40,7	38,4	36,1	33,9	32,1	30,5	29,2
01/01/2000 13:00	39,5	38,1	36,4	34,7	33,1	31,6	30,2
01/01/2000 14:00	38,3	36,9	35,7	34,5	33,2	31,9	30,6
01/01/2000 15:00	37,2	36,6	35,6	34,4	33,2	32	30,7
01/01/2000 16:00	34	34,2	33,9	33,3	32,5	31,6	30,6
01/01/2000 17:00	30,3	31,2	31,6	31,6	31,2	30,7	29,9
01/01/2000 18:00	26,9	28,2	29	29,4	29,6	29,4	29
01/01/2000 19:00	23,1	25	26,4	27,3	27,8	27,9	27,9
01/01/2000 20:00	20,2	22,1	23,6	24,8	25,7	26,3	26,6
01/01/2000 21:00	20,8	21,9	22,9	23,8	24,5	25,1	25,6
01/01/2000 22:00	20,3	21,3	22,3	23,1	23,8	24,4	25
01/01/2000 23:00	20,8	21,5	22,2	22,8	23,4	24,1	24,6

Fonte: Autor

A despeito de haver poucos dados na região semelhantes aos obtidos em San Diego, foram também utilizadas medições usadas por Blass (2011) na cidade de Ijuí, RS. Os dados foram obtidos mediante sensores digitais de temperatura durante dez dias de cada mês (de janeiro até dezembro) do ano de 2010. O horário das coletas foi de 13:00 a 16:00 com intervalos de 20 minutos entre cada medição e as profundidades de obtenção dos dados (em centímetros) foram: 0 (na superfície), 3, 6, 9, 12, 15 (todos na camada de revestimento) e a 40 cm (na camada de base). Tais informações foram, também, organizadas em planilhas eletrônicas (Quadro 6).

Quadro 6 - Dados de Ijuí para o mês de janeiro

Temperaturas de janeiro							
Horário (h:m)	Profundidade (cm)						
	0	3	6	9	12	15	Tar
13:00	65,50	60,2	51,4	44,6	39,2	33,7	34,3
13:20	66,2	61,4	52,3	45,4	40,3	34,4	34,8
13:40	67,3	62,5	53	46,1	40,9	35	34,9
14:00	69,1	63,2	53,8	46,5	41,4	35,5	35,6
14:20	68,7	62,9	54,4	47,1	41,80	36	35,6
14:40	67,7	62	55	47,8	42,8	36,5	35,6
15:00	66,4	61,2	54,9	48,4	43,3	37,1	35
15:20	64,8	60	54,5	48,8	43,5	37,4	34,6
15:40	63,7	59,2	54,3	48,9	44	37,9	34
16:00	62,4	58,5	54,2	49	44,3	38,9	33,8

Fonte: Autor

Tendo em mãos os dados advindos dessas duas fontes, era mister obter um arquivo que contivesse dados de temperatura que simulasse a exposição dos pavimentos asfálticos ao clima de Santa Maria durante um ano. Para tanto, foram tomados os dados mensais médios de Ijuí (como não foram realizadas medições em todos os dias de cada mês) medidos às 13:00, 14:00, 15:00 e 16:00 como base, devido à sua proximidade com a região central do RS, e a extrapolação das medições para as demais horas do dia foi realizada através das medições norte-americanas.

3.1.2 Extrapolação dos dados

Para que os dados de ambas as cidades fossem juntados, foi feita uma interpolação linear dos dados de San Diego para obter as temperaturas nas mesmas profundidades das medições de Ijuí, ou seja, a 0, 3, 6, 9 e 15 cm de profundidade.

Além disso, era necessário obter dados para todas as horas do dia que contivessem o padrão de San Diego com a calibração de Ijuí. Para tanto, foram tomadas as temperaturas medidas em San Diego às 13:00 e às 16:00 como padrão para a obtenção dos dados nos demais

horários. A partir da relação entre as temperaturas medidas entre 0:00 a 12:00 e a temperatura a 13:00 foram estimados os valores para o início do dia. Por exemplo, se a temperatura medida em San Diego às 13:00 era de 30 °C e às 10:00 era de 20°C, a proporção de 2/3 seria mantida, agora, para extrapolar os dados de Ijuí. Se a temperatura medida nessa cidade às 13:00 fosse de 21°C, a temperatura às 10:00 seria de $2/3 \times 21^\circ\text{C} = 14^\circ\text{C}$. O mesmo raciocínio foi utilizado para as temperaturas do final do dia. Foi tomado o valor mensurado às 16:00 como base e foram mantidas as relações entre ele e os valores medidos subsequentemente. No Quadro 7, estão representados os dados de Ijuí das 13h a 16h (em verde) e os dados de San Diego ajustados a partir das proporções (em roxo) para o mês de janeiro.

Quadro 7 - Formação da hipótese Var_DAP a partir dos dados de San Diego e Ijuí (mês de Janeiro)

JANEIRO						
Hora/Prof	0 cm	3 cm	6 cm	9 cm	12 cm	15 cm
00:00	35,32	36,36	34,64	33,23	32,06	29,97
01:00	35,35	36,20	34,37	32,95	31,80	29,76
02:00	35,25	36,08	34,21	32,76	31,61	29,62
03:00	35,28	36,00	34,08	32,62	31,47	29,48
04:00	35,28	35,97	34,00	32,53	31,38	29,37
05:00	35,46	36,01	33,99	32,46	31,28	29,28
06:00	38,26	37,34	34,47	32,61	31,27	29,23
07:00	43,13	40,33	36,10	33,45	31,67	29,36
08:00	49,84	44,86	38,83	35,06	32,53	29,76
09:00	56,49	50,14	42,38	37,34	33,94	30,47
10:00	61,14	54,37	45,68	39,75	35,52	31,38
11:00	64,27	57,60	48,44	41,88	37,04	32,28
12:00	65,65	59,59	50,40	43,54	38,32	33,07
13:00	65,50	60,20	51,40	44,60	39,20	33,70
14:00	69,10	63,20	53,80	46,50	41,40	35,50
15:00	66,40	61,20	54,90	48,40	43,30	37,10
16:00	62,40	58,50	54,20	49,00	44,30	38,90
17:00	57,13	55,02	52,06	47,76	43,65	38,66
18:00	50,62	50,52	49,11	45,92	42,57	38,14
19:00	43,17	45,23	45,41	43,48	41,06	37,35
20:00	39,88	41,43	42,00	40,89	39,31	36,35
21:00	38,76	39,62	39,96	39,05	37,88	35,44
22:00	37,89	38,44	38,63	37,83	36,88	34,80
23:00	37,67	37,83	37,84	37,03	36,20	34,32

Esse processo foi repetido para cada mês do ano e foi gerado um arquivo híbrido, passível de ser lido pelo LVECD, chamado de Var_DAP (o nome indica que a temperatura varia segundo as horas do dia, segundo os meses do ano e ao longo da profundidade da camada asfáltica). Esse arquivo foi composto, desse modo, de uma mistura entre dados coletados na região e dados norte-americanos. As temperaturas medidas em Ijuí das 13:00 até 16:00 foram mantidas e, para os demais horários, foram utilizadas as medições de San Diego para fazer as extrapolações.

A partir da Var_DAP, foram geradas outras hipóteses de temperatura partindo da situação mais próxima à realidade, com variações diárias e sazonais de temperatura até uma hipótese com temperatura constante durante todo o ano para todas as horas do dia, meses do ano e profundidades do pavimento. Foram adotadas tais hipóteses para se ter uma sensibilidade de quanto influi a variação sazonal e a variação diária da temperatura no pavimento. Tendo isso em vista, foram geradas as seguintes hipóteses:

Var_AP: foi considerada a variação de temperaturas ao longo do ano (variando de um mês para o outro) e ao longo da profundidade do revestimento. Não foram consideradas as variações de temperatura ao longo do dia.

Var_A: levou-se em conta, apenas, a variação da temperatura ao longo dos meses do ano. Desse modo, foram criados arquivos diferentes para cada espessura de revestimento usada nas simulações. Por exemplo, para simulações com 10 cm de revestimento, foi usada a média dos primeiros 10 cm de profundidade e a hipótese é denominada “Var_a_10cm”.

Var_P: a temperatura varia apenas ao longo da profundidade, sendo constante para todas as horas do dia e para todos os meses do ano.

Cte: foi considerado uma mesma temperatura média para todas as profundidades e para todo o ano. Assim como no caso da Hipótese 3, foram criados arquivos para diferentes espessuras de revestimento que consideram as médias de temperatura até a profundidade correspondente à interface entre revestimento e base. Seguindo o exemplo do revestimento com 10 cm de espessura, a hipótese a ele correspondente é denominada “Cte_10cm”

O resumo dos valores obtidos em cada uma das hipóteses, juntamente com os dados originais de San Diego, está expresso no Quadro 8. Os dados ali expressos levam em conta as médias para os primeiros 6 cm do revestimento, que são os valores utilizados nas simulações da 1ª Bateria de análises, como será explicado adiante.

No Apêndice A desta obra, estão todos os dados de temperatura utilizados em cada uma das hipóteses.

Vale, ainda, comentar que as 5 hipóteses geradas têm a mesma média de temperatura, que é 37,29 °C. Quanto aos dados de San Diego, a média de todos os valores é de 21,10 °C.

Devido à entrada de dados de temperatura no LVECD considerar todos os meses como tendo 30 dias, foram excluídos os dados do 31º dia nos meses de 31 dias e, para o mês de fevereiro, o dia 29 (por ser ano bissexto) foi duplicado.

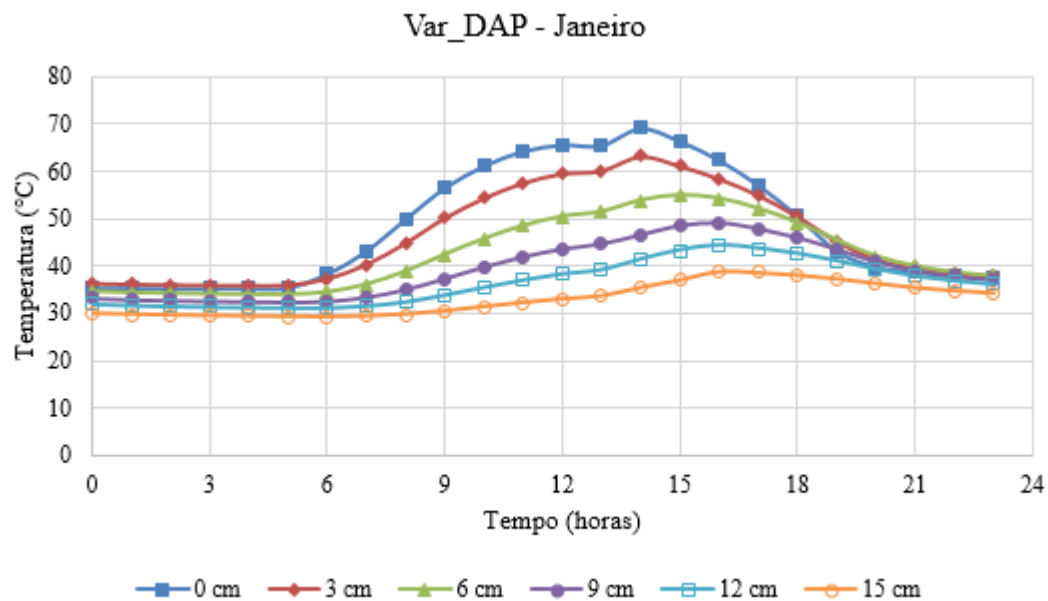
Como pode-se notar da Figura 57 à Figura 60, os dados ajustados apresentam uma defasagem entre as temperaturas medidas em cada profundidade. Tal fato é razoável devido ao tempo decorrido para se estabelecer o equilíbrio térmico entre as subcamadas do pavimento. Desse modo, o pico de temperaturas ocorre mais tardiamente à medida que a profundidade aumenta.

Quadro 8 - Resumo das hipóteses de temperatura

Var_DAP					Var_AP				
	Verão	Outono	Inverno	Primavera		Verão	Outono	Inverno	Primavera
Topo	48,77	32,47	32,03	46,77	Topo	48,77	32,47	32,03	46,77
Meio	46,42	30,26	29,49	44,14	Meio	46,42	30,26	29,49	44,14
Base	42,83	27,60	26,40	40,26	Base	42,83	27,60	26,40	40,27
Var_A 6cm					Var_P				
	Verão	Outono	Inverno	Primavera		Verão	Outono	Inverno	Primavera
Topo	46,01	30,11	29,31	43,73	Topo	40,01	40,01	40,01	40,01
Meio	46,01	30,11	29,31	43,73	Meio	37,58	37,58	37,58	37,58
Base	46,01	30,11	29,31	43,73	Base	34,27	34,27	34,27	34,27
Cte 6cm					San Diego				
	Verão	Outono	Inverno	Primavera		Verão	Outono	Inverno	Primavera
Topo	37,29	37,29	37,29	37,29	Topo	26,14	18,28	17,07	23,00
Meio	37,29	37,29	37,29	37,29	Meio	26,09	18,35	17,07	22,90
Base	37,29	37,29	37,29	37,29	Base	26,03	18,41	17,05	22,80

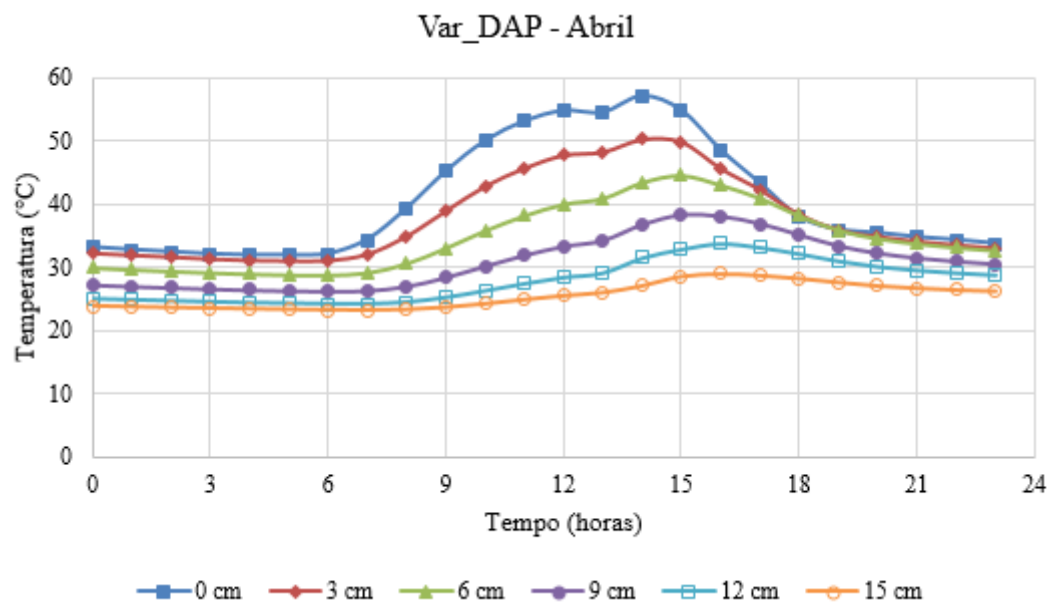
Fonte: Autor

Figura 57 - Perfil de temperaturas obtidas para o mês de janeiro



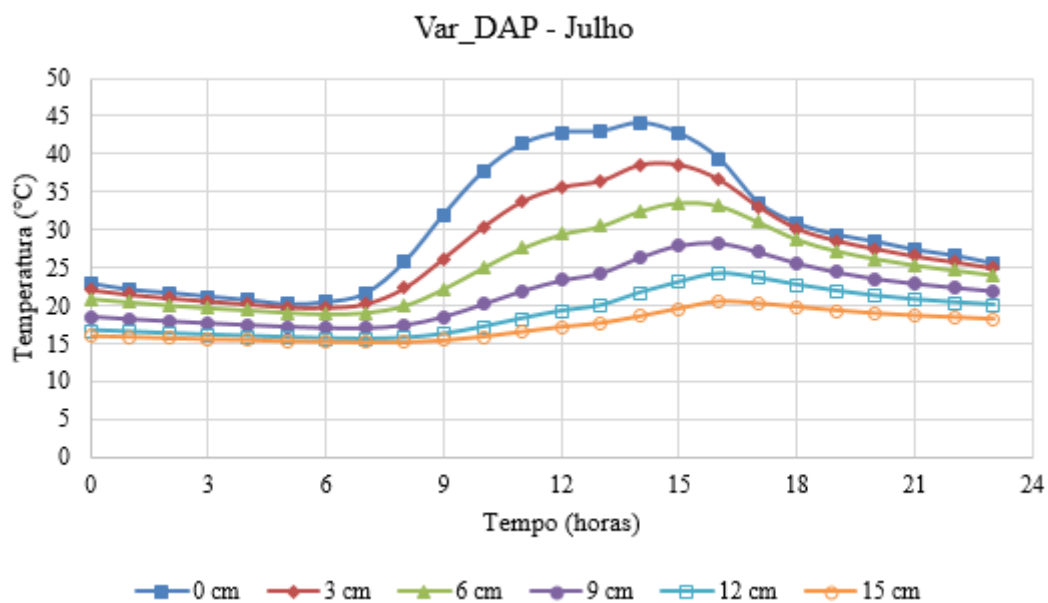
Fonte: Autor

Figura 58 - Perfil de temperaturas obtidas para o mês de abril



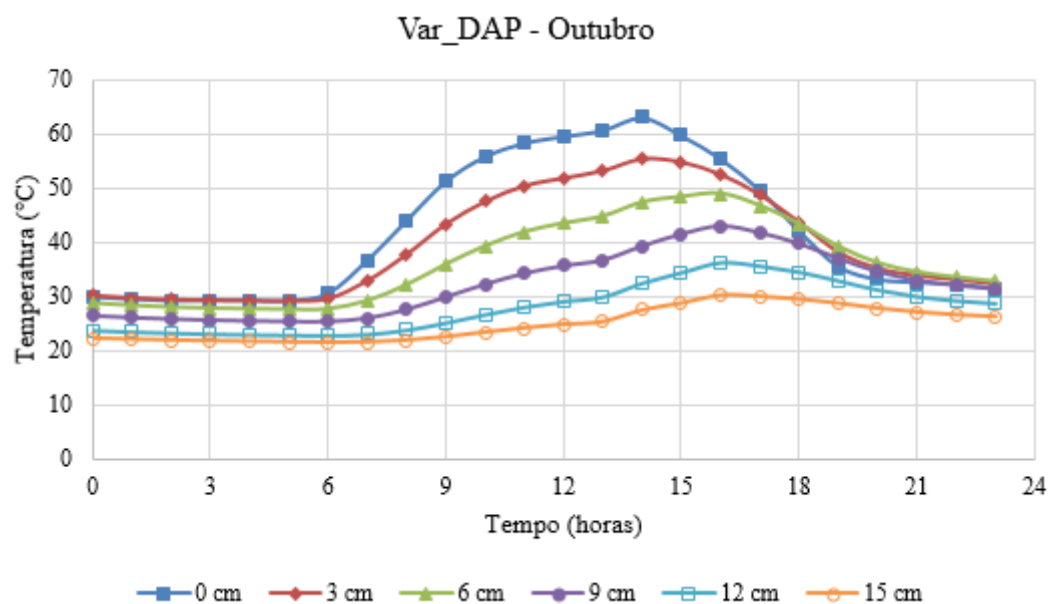
Fonte: Autor

Figura 59 - Perfil de temperaturas obtidas para o mês de julho



Fonte: Autor

Figura 60 - Perfil de temperaturas obtidas para o mês de outubro



Fonte: Autor

Além disso, pode-se perceber que há uma descontinuidade dos valores no horário das 13 h. Isso se deve ao ajuste feito a partir das temperaturas antes desse horário, que tem origem nos dados ajustados de San Diego, ao passo que as temperaturas das 13 h às 16 h são os dados advindos de Ijuí. Desse modo, as tendências distintas de ambas as fontes são evidenciadas nesse ponto.

3.2 OBTENÇÃO DOS INPUTS DE TRÁFEGO E DE ESTRUTURA DE PAVIMENTO

3.2.1 Tráfego

Foram usados, no *software*, dados de tráfego oriundos de medições feitas nas duas faixas da avenida Hélvio Basso, localizada em Santa Maria, RS, que é um trecho de 300 metros de extensão monitorado pelo grupo GEPPASV. Os resultados das medições de tráfego apresentaram um AADTT (*Average annual daily truck traffic*) de 1133 para a faixa menos carregada e 1966 para a faixa mais carregada.

Quanto ao período de projeto, foi considerado um tempo de 15 anos com crescimento linear de 3% ao ano.

Além disso, foram utilizados dados de tráfego da BR-158, no trecho que é conhecido como “Trevo dos Quartéis”. As medições no trecho apresentaram 3471 solicitações diárias para a faixa mais carregada, que é aquela considerada nesse estudo.

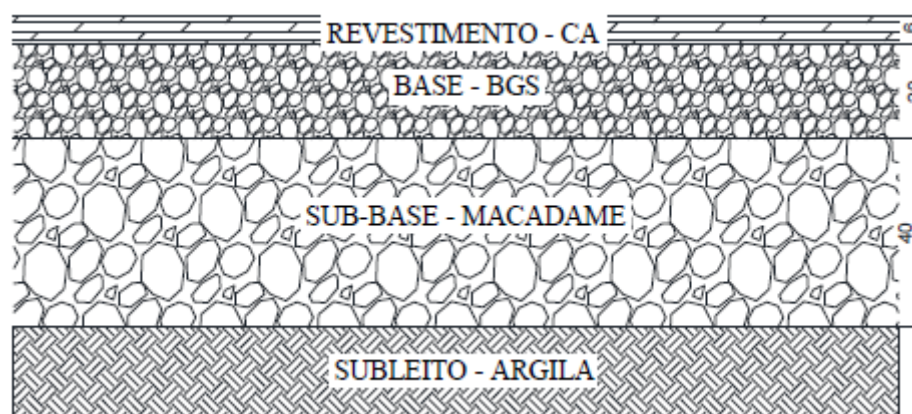
3.2.2 Estrutura

3.2.2.1 Hélvio Basso

A estrutura do pavimento na Avenida Hélvio Basso foi inserida, do mesmo modo, no LVECD. Os dados referentes às espessuras de cada camada e às propriedades dos materiais podem ser encontrados com detalhes na obra de Santos (2015).

A representação esquemática do perfil do pavimento da avenida Hélvio Basso pode ser conferida na Figura 61:

Figura 61 - Perfil do pavimento da avenida Hélvio Basso



Fonte: Santos (2015)

O material do subleito foi classificado por Santos (2015) como areia argilosa (SC) segundo a Classificação Unificada e como A6 segundo o Sistema Rodoviário de Classificações.

A sub-base  constituída por uma camada de 40 cm de MS (macadame seco) com material graúdo entre 2 e 5 polegadas com enchimento de p de pedra.

A base fio executada com BGS (brita graduada simples) em uma camada de 20 cm classificada na faixa A do DNIT.

O revestimento consiste em uma camada de 6 cm de CBUQ (concreto betuminoso usinado a quente). Os agregados utilizados se encaixam na faixa C do DNIT e o CAP utilizado  o 50/70.

Quanto aos *inputs* reológicos de cada camada (fora o revestimento) para o LVECD, foram obtidos via retroanálise através dos ensaios de viga Benkelman e FWD (*falling weight deflectometer*), conforme demonstrou Santos (2015). Os resultados obtidos estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados da retroanálise da avenida Hέλvio Basso

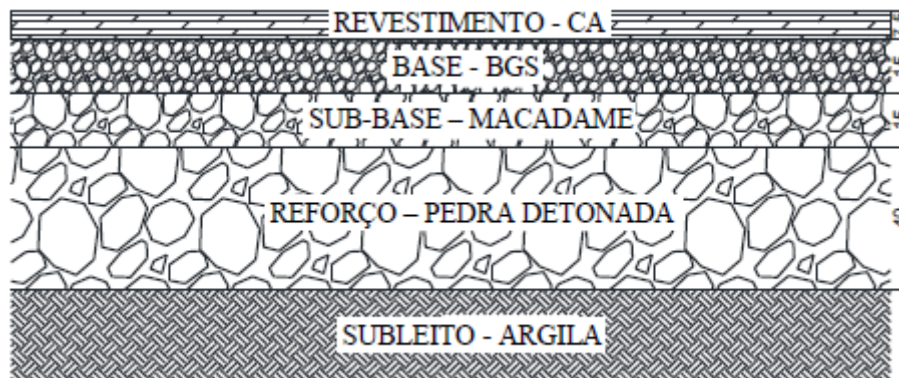
Trecho Monitorado	Período Ensaio (meses)	N _{AAASHTO}	N _{USACE}	MR Revestimento	MR Base (MPa)	MR Sub base (MPa)	MR Subleito (MPa)
Viga Benkelman	0	0,00E+00	0,00E+00	4276	255	501	195
	1	4,35E+04	7,36E+04	4084	245	365	120
	7	2,99E+05	5,05E+05	4203	413	621	142
	14	7,36E+05	1,24E+06	4094	301	614	69
	17	8,35E+05	1,40E+06	4026	304	398	144
	21	1,03E+06	1,73E+06	4249	549	463	212
FWD	9	3,91E+05	6,61E+05	6477	617	603	163
	17	8,35E+05	1,40E+06	6706	634	399	167
	21	1,03E+06	1,73E+06	6983	671	587	206

Fonte: Santos (2015)

3.2.2.2 BR-158

Quanto à BR-158, os dados também foram obtidos a partir da obra de Santos (2015). Segundo o autor, a estrutura do pavimento é aquela representada na Figura 62.

Figura 62 - Perfil do pavimento da BR-158



Fonte: Santos (2015)

O subleito, segundo o Sistema de Classificação Unificada, é uma argila de baixa compressividade (CL) e, segundo o Sistema Rodoviário de Classificação, se enquadra no tipo A6.

Sobre ele, repousa uma camada de reforço constituído de pedra detonada. Quanto às suas propriedades, não há registro obtido a partir de ensaios.

A sub-base consiste em uma camada de 15 cm de macadame seco, com diâmetro entre 2 e 5 polegadas e enchimento em pó de pedra.

A base foi executada em BGS, classificada na faixa A do DNIT, com 15 cm de espessura.

O revestimento é constituído por 2 subcamadas, cujos materiais são advindos de usinas distintas. A camada inferior tem 4 cm e a superior tem 3,5 cm de espessura. Ambas as subcamadas foram executadas com CAP 50/70.

Assim como no caso da avenida Hólvio Basso, os MR's das camadas do pavimento da BR-158 foram obtidos via retroanálise feita a partir dos ensaios de Viga Benkelman e FWD (Tabela 3).

Tabela 3 - Resultados da retroanálise da BR-158

Trecho Monitorado	Período Ensaio (meses)	N_{AASHTO}	N_{USACE}	MR Revestimento	MR Base (MPa)	MR Sub base (MPa)	MR Subleito (MPa)
Viga Benkelman	1	4,64E+04	1,01E+05	3064	193	337	285
	3	1,36E+05	2,95E+05	2786	134	176	252
	7	3,19E+05	6,91E+05	3304	425	170	195
FWD	3	1,36E+05	2,95E+05	3093	382	184	221
	7	3,19E+05	6,91E+05	3200	556	445	285

Fonte: Santos (2015)

3.3 EMPREGO DO LVECD

3.3.1 Inputs de tráfego e de materiais

Na aba *Design Structure*, foram introduzidos os parâmetros mecânicos dos materiais componentes de cada camada.

Para a camada de revestimento, usou-se os coeficientes da série de Prony obtidos a partir do ajuste feito mediante modelo sigmoideal. Além disso, entram o coeficiente de Poisson, as

informações descritivas do módulo complexo, incluindo os parâmetros do *shift factor* e os parâmetros da curva de dano obtida pelo ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão. Os dados de entrada para o revestimento estão resumidos no Quadro 9 e no Quadro 10.

Quadro 9 - Dados referentes ao módulo complexo e à curva de fadiga para o revestimento da avenida Hélivio Basso

Einf (kPa)	1,54E+04	Alpha	3,01
Ref. Temp (°C)	20	a	0,000327921
Shift Factor a1	6,01E-04	b	0,70913766
Shift Factor a2	-1,62E-01	Initial C	0,8
Shift Factor a3	3,00E+00	Gamma	1,52E+07
		Delta	-1,409

Quadro 10 - Coeficientes da série de Prony para o revestimento da avenida Hélivio Basso

Ti (sec)	Ei (kPa)
20000000000	297
2000000000	279
200000000	547
20000000	1090
2000000	2230
200000	4830
20000	11400
2000	30700
200	97700
20	351000
2	1180000
0,2	2800000
0,02	4090000
0,002	4590000
0,0002	4010000
0,00002	3010000
0,000002	2040000
0,0000002	1310000
0,00000002	806000
0,000000002	487000
2E-10	662000

No caso da BR-158, foram usados os dados exibidos do Quadro 11 ao Quadro 13, que mostram os parâmetros tanto da subcamada superior como da subcamada inferior do revestimento.

Quadro 11 - Dados referentes ao módulo complexo e à curva de fadiga para o revestimento da BR-158

BR 158 - Mistura Superior		BR 158 - Mistura Inferior	
Einf (kPa)	73310	Einf (kPa)	66090
Ref. Temp (°C)	20	Ref. Temp (°C)	20
Shift Factor a1	0,000819	Shift Factor a1	0,00104
Shift Factor a2	-0,163	Shift Factor a2	-0,179
Shift Factor a3	2,93	Shift Factor a3	3,16
Alpha	3,32	Alpha	3,12
a	0,000836524	a	3,03672E-05
b	0,620319832	b	0,911895868
Initial C	0,8	Initial C	0,8
Gamma	315504343,6	Gamma	13872772,3
Delta	-1,681	Delta	-1,422

Quadro 12 - Coeficientes da série de Prony para o revestimento da BR-158

(continua)

BR 158 - Mistura Superior		BR 158 - Mistura Inferior	
Ti (sec)	Ei (kPa)	Ti (sec)	Ei (kPa)
20000000000	4,36E+02	20000000000	2,75E+02
2000000000	4,67E+02	2000000000	3,17E+02
200000000	9,70E+02	200000000	6,86E+02
20000000	2,03E+03	20000000	1,49E+03
2000000	4,30E+03	2000000	3,27E+03
200000	9,31E+03	200000	7,35E+03
20000	2,11E+04	20000	1,73E+04
2000	5,20E+04	2000	4,41E+04
200	1,45E+05	200	1,29E+05
20	4,46E+05	20	4,30E+05
2	1,55E+06	2	1,74E+06
0,2	3,08E+06	0,2	3,57E+06

(conclusão)

BR 158 - Mistura Superior		BR 158 - Mistura Inferior	
0,02	4,62E+06	0,02	5,43E+06
0,002	4,86E+06	0,002	5,70E+06
0,0002	3,98E+06	0,0002	4,62E+06
0,00002	2,76E+06	0,00002	3,17E+06
0,000002	1,74E+06	0,000002	1,98E+06
0,0000002	1,04E+06	0,0000002	1,17E+06
0,00000002	5,99E+05	0,00000002	6,69E+05
0,000000002	3,40E+05	0,000000002	3,76E+05
2E-10	4,09E+05	2E-10	4,48E+05

Para as camadas da base e sub-base e subleito, os módulos de resiliência e coeficientes de Poisson utilizados estão resumidos no Quadro 13 e no Quadro 14. Quanto à espessura do subleito, foi adotado o valor de 380 cm para ambas as estruturas, que simula o comportamento de uma camada semi-infinita.

Quadro 13 - *Inputs* da base, sub-base e subleito da avenida Hélivio Basso no LVECD

Camada	Material	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson
Base	BGS	477	0,35
Sub-base	MS	196	0,4
Subleito	Solo	181	0,45

Quadro 14 - *Inputs* da base, sub-base e subleito da BR-158 no LVECD

Camada	Material	Módulo de Resiliência (MPa)	Coefficiente de Poisson
Reforço	Pedra Detonada	131	0,35
Base	BGS	100	0,4
Subleito	Solo	241	0,45

Na aba *Traffic Data*, foram inseridas as mesmas informações de configuração de eixos e cargas para ambas as estruturas. Quanto às solicitações, foi adotado um semi-eixo simples de rodas duplas com pressão de 0,8 MPa, largura de pneu de 30,47 cm e área de contato com o

pavimento na forma retangular. Quanto ao volume de tráfego, foram inseridos os valores obtidos pelas contagens de tráfego feitas *in loco*.

A variação do tráfego ao longo dos meses foi considerada constante. Contudo, foram dados pesos diferentes para a passagem dos eixos-padrão ao longo do dia. A distribuição, em porcentagem, da passagem dos veículos a cada hora foi a mesma tanto para a avenida Hélivio Basso como para a BR-158 e está representada no Quadro 15.

Quadro 15 - Distribuição horária de passagem de veículos

Hora	(%)	Hora	(%)	Hora	(%)	Hora	(%)
0:00	0,5	6:00	4	12:00	8	18:00	6
1:00	0,5	7:00	6	13:00	8	19:00	4
2:00	0,5	8:00	8	14:00	6	20:00	2
3:00	0,5	9:00	7	15:00	6	21:00	1
4:00	1	10:00	6	16:00	7	22:00	1
5:00	2	11:00	6	17:00	8	23:00	1

Fonte: Autor

3.3.2 Inputs de temperatura

Na aba *Climate Data*, são informadas as temperaturas do pavimento em cada profundidade para cada hora durante o período de projeto. Para isso, as planilhas eletrônicas foram convertidas em documento de texto passível de ser reconhecido pelo programa (Figura 63).

Esse processo foi feito para cada arquivo contendo as temperaturas para cada hora durante um ano e para cada profundidade do revestimento. Contudo, foram utilizados somente os dados que abrangiam a camada de revestimento. Desse modo, as simulações com 6 cm de revestimento, por exemplo, só levaram em conta as 3 primeiras colunas dos arquivos de texto pois as profundidades de 9, 12 e 15 cm estão já fora da camada do revestimento.

Para as simulações a temperaturas constantes ao longo do ano, foram gerados arquivos com a mesma temperatura repetida para cada hora e cada profundidade.

Figura 63 - Exemplo de trecho de arquivo de texto lido pelo LVECD

```

Curitiba San Diego - Nodal Temperatures
Date   Node->           Node 0   Node 1   Node 2   Node 3   Node 4   Node 5
      Depth->         0.0     3.0     6.0     9.0     12.0    15.0
01/01/2000 00:00      35.32   36.36   34.64   33.23   32.06   29.97
01/01/2000 01:00      35.35   36.20   34.37   32.95   31.80   29.76
01/01/2000 02:00      35.25   36.08   34.21   32.76   31.61   29.62
01/01/2000 03:00      35.28   36.00   34.08   32.62   31.47   29.48
01/01/2000 04:00      35.28   35.97   34.00   32.53   31.38   29.37
01/01/2000 05:00      35.46   36.01   33.99   32.46   31.28   29.28
01/01/2000 06:00      38.26   37.34   34.47   32.61   31.27   29.23
01/01/2000 07:00      43.13   40.33   36.10   33.45   31.67   29.36
01/01/2000 08:00      49.84   44.86   38.83   35.06   32.53   29.76
01/01/2000 09:00      56.49   50.14   42.38   37.34   33.94   30.47

```

Fonte: Autor

3.3.3 Simulações

Foram feitas 3 baterias de simulações no LVECD baseadas nos objetivos do trabalho:

Bateria 1: foram feitas simulações com os dados da Av. Hélyvio Basso (faixa 1 e faixa 2) e BR-158 (faixa 2) com as seguintes características:

- Estrutura original dos pavimentos;
- Número N de solicitações original;
- *Inputs* de temperatura das 5 hipóteses mais o arquivo de San Diego e considerando 25 °C constantes ao longo de todo o ano e em todas as profundidades. No caso das hipóteses Var_A e Cte, que não possuem gradiente de temperatura, foram consideradas as médias ao longo de 6cm para a Av. Hélyvio Basso e de 7,5 cm para a BR-158.

Bateria 2: os mesmos pavimentos da Bateria 1 foram simulados com os seguintes *inputs*:

- Estrutura original dos pavimentos;
- Número N de solicitações original;

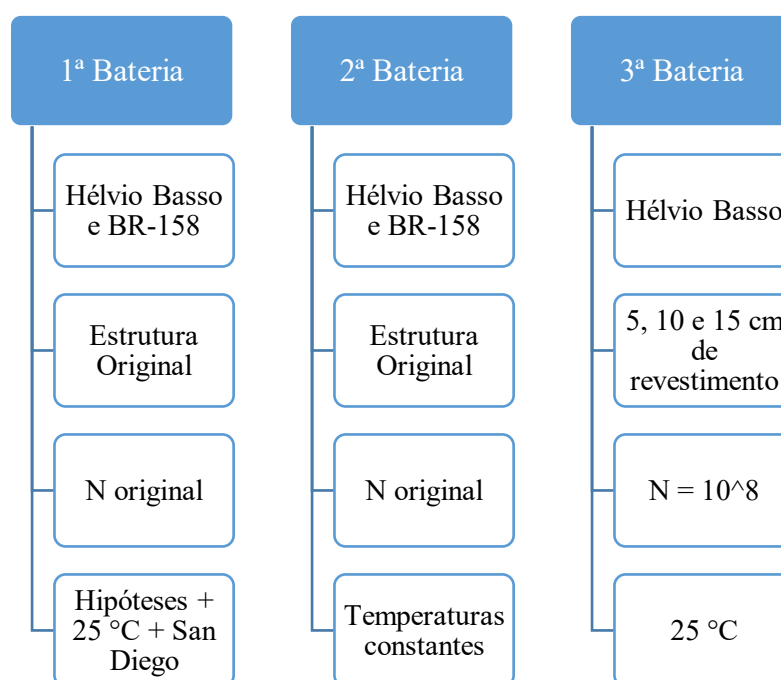
- Temperatura constante de 0 a 60 °C com intervalos de 5 °C entre cada simulação.

Bateria 3: foi adotada a Av. Hólvio Basso com:

- Revestimento com 5, 10 e 15 centímetros de espessura;
- Número N igual a 10^8 solicitações ao longo de 10 anos, com taxa linear de crescimento anual de 3%. Assim, foi usado, como tráfego diário, o valor de 23824 solicitações do eixo-padrão;
- Temperatura constante de 25 °C para todas as profundidades do revestimento e durante todo o ano.

O resumo dessas informações está na Figura 64.

Figura 64 - Resumo das informações das baterias de simulações



Fonte: Autor

A Bateria 1 tem, como objetivo, avaliar qual dos *inputs* climáticos gerará resultados de área trincada que mais se aproximem dos valores observados em campo. Será feita a comparação entre os resultados simulados, a partir das duas funções de transferência propostas

por Nascimento (2015), da função de Fritzen (2016), pelo uso do MeDiNa, e aqueles medidos no trecho experimental.

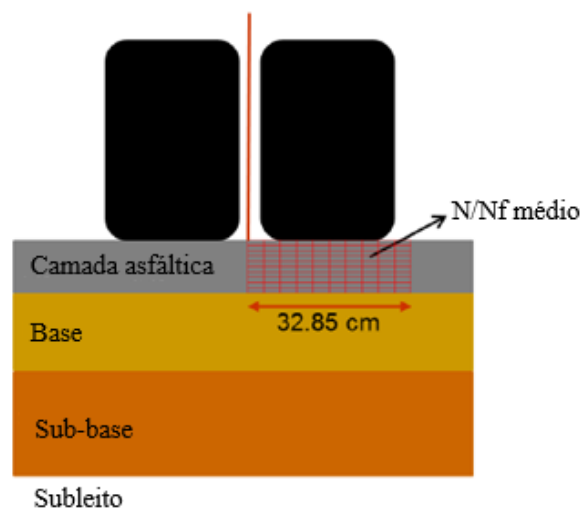
A Bateria 2 traz uma análise de sensibilidade para captar a influência da temperatura sobre o dano e sobre a área trincada.

A Bateria 3 resulta em uma análise econômica comparativa entre o LVECD, MeDiNa e método de dimensionamento do DNER com base no CBR. A partir de cada simulação, para cada espessura de revestimento, serão aplicadas as funções de transferência propostas por Nascimento (2015) e, considerando o critério de 30 % de área trincada, será achado o número N de solicitações para cada hipótese de temperatura. Com o número de solicitações e o orçamento de cada estrutura de pavimento, será obtido o custo por N por quilômetro de rodovia.

3.3.4 Análise e resultados

No caso presente, sempre foi escolhida uma malha de 110 pontos (Figura 65), sendo eles dispostos em 10 colunas a 3,65 cm um do outro (tendo em vista a largura da área de contato do eixo de rodas duplas) e em 11 linhas a uma distância correspondente a 1/10 da espessura do revestimento. A origem da malha está sob o rodado de dois pneus de 40 kN de carga, conforme especificado nos *inputs* do tráfego.

Figura 65 - Malha de pontos analisada através das simulações do LVECD



3.4 EMPREGO DO MEDINA

Para a escolha dos materiais de cada camada no MeDiNa, foram criados novos materiais de modo a simular os parâmetros observados em cada camada da avenida Hélivio Basso.

Para o revestimento, foi adotada uma curva de fadiga segundo proposto por Rossato (2015) (Equação 86), que utilizou os materiais da avenida Hélivio Basso para obtê-la.

$$N_f = 2,319 \times 10^{-10} \cdot \varepsilon_t^{-1,514} \cdot MR^{2,075} \quad (86)$$

Para transformar a Equação 86 no formato pré-definido do MeDiNa, adotou-se o valor de 4.084 MPa para o MR, segundo obtido por Santos (2015) via retroanálise. À vista disso, obteve-se o modelo descrito pela Equação 87.

$$N_f = 0,0072 \cdot \varepsilon_t^{-1,514} \quad (87)$$

Dada a inexistência de parâmetros de deformação permanente para as camadas de base, sub-base e subleito, foram adotados os parâmetros de materiais presentes no banco de dados do programa cujos MR's mais se assemelhavam aos materiais da avenida Hélivio Basso. Assim, adotou-se os coeficientes de regressão do material “Brita Graduada – Gnaisse C1” para a camada de base e de sub-base e do material “Solo Siltoso NS” para o subleito. Seguem, no Quadro 16, os valores dos coeficientes ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 e ψ_4 para cada camada.

Quadro 16 - Parâmetros de deformação permanente utilizados no MeDiNa

	ψ_1	ψ_2	ψ_3	ψ_4
Base	0,16	-0,10	0,53	0,08
Sub-base	0,16	-0,10	0,53	0,08
Subleito	0,24	0,42	1,31	0,07

Outrossim, foi adotada a possibilidade de haver camada de reforço com solo de CBR superior ao do subleito (nesse caso, maior ou igual a 8%). Para isso, foi adotado o solo do banco de dados do MeDiNa identificado como “solo fino NA”.

3.5 EMPREGO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DO DNER

Foi empregado o método de dimensionamento do extinto DNER de modo inverso. Em um dimensionamento, é calculado o número de solicitações do eixo-padrão a partir dos fatores de equivalência de carga adotados pela USACE (*United States Army Corps of Engineers*) e, a partir desse valor e do CBR do subleito, é obtida uma espessura equivalente (Equação 88) que representa uma camada de brita graduada simples que impede o rompimento do subleito por cisalhamento. Após isso, essa espessura equivalente é desmembrada em camadas de diferentes materiais a partir dos coeficientes de equivalência estrutural.

$$H_t = 77,67 \cdot N^{0,0482} \cdot CBR^{-0,598} \quad (88)$$

No caso das análises realizadas neste trabalho, partiu-se de estruturas pré-definidas de pavimentos, que são aquelas utilizadas nos trechos em estudo da Av. Hélio Basso, com o revestimento de 5, 10 ou 15 cm, o que fornece já o valor de H_t e do CBR do subleito. Desse modo, isolando-se o N , pode-se achar quantas solicitações do eixo-padrão cada pavimento suporta segundo o critério usado pelo DNER.

3.6 APLICAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA PARA CONVERTER DANO EM ÁREA TRINCADA

Tendo em mãos os resultados obtidos no LVECD no que diz respeito a dano, era necessário convertê-los em um parâmetro mais tangível de modo a avaliar o desempenho do pavimento.

Para tal, foram utilizadas as funções de transferência obtidas por Nascimento (2015) através de uma planilha eletrônica alimentada com os valores de dano médio fornecidos pelo LVECD.

A partir da entrada dos dados, as fórmulas na planilha calculam o dano reduzido a partir dos coeficientes A e B (no caso da função baseada no parâmetro $T_{0,35}$) ou β_1 , β_2 e β_3 (no caso

da função baseada no parâmetro R_{12-1}) e convertem este em área trincada usando os valores de C_1 e C_2 .

3.7 ANÁLISE COMPARATIVA DE ÁREA TRINCADA ENTRE O MEDINA E O LVECD

Além das simulações de dimensionamento no LVECD, o mesmo pavimento foi dimensionado usando o *software* MeDiNa. Em ambos os programas, foram feitos os dimensionamentos para um N de 10^8 ao longo de 10 anos, já considerando a taxa de 3% de crescimento linear anual.

Para comparar a AT simulada com dados de campo, foram utilizados valores de porcentagem de área trincada obtidos pelo grupo GEPPASV para a Av. Hélvio Basso, conforme mostrado no Quadro 17.

Quadro 17 - Área trincada medida em campo na Av. Hélvio Basso

Meses	AT (%) Campo - Faixa 1	AT (%) Campo - Faixa 2
1	0,0	0,0
7	0,0	0,0
14	0,0	0,0
20	0,1	0,5
27	0,1	0,9
32	0,8	2,6
51	1,0	3,0
57	1,0	3,2
61	1,0	3,5
68	1,2	3,6

3.8 ANÁLISE ECONÔMICA ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO

Foi realizada uma análise econômica para os resultados de área trincada obtidos a partir da aplicação da função de transferência proposta por Nascimento (2015) e dos resultados de dimensionamento fornecidos através do MeDiNa.

Como resultado final, foram obtidas relações de custo-benefício expressas em unidade monetária por número de solicitações do eixo padrão por quilômetro de rodovia ($R\$/N \cdot km$). A partir dessa análise, pode-se visualizar qual opção de projeto resultará em um melhor aproveitamento dos recursos ao longo do período de utilização.

Para realizar o orçamento, foi utilizada a planilha desenvolvida por Silva (2019) e utilizada no seu trabalho de conclusão de curso.

Na planilha, são informados os dados referentes aos materiais usados em cada camada e suas respectivas espessuras, distâncias médias de transporte para as diferentes etapas construtivas, sinalização, dimensões da via e composições de custo extraídas do SICRO para cada etapa.

Os valores de custo das composições foram obtidos no relatório analítico de composições de custos do SICRO de outubro de 2018 para o estado do Rio Grande do Sul e os valores de asfalto diluído, emulsão asfáltica e usinagem de concreto asfáltico foram fornecidos pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) para fevereiro de 2019.

Para orçar a sinalização, foi utilizado o projeto da BR-392/RS, entre as entradas da BR-290 e da BR-158, em Santa Maria (DNIT, 2014). Com os quantitativos da obra, foi feita uma proporção simples a partir das extensões dos trechos para obter o quantitativo da Av. Hélio Basso.

Para as DMTs (distâncias médias de transporte) adotadas, o resumo está no Quadro 18.

Quadro 18 - Distâncias de transporte adotadas para o orçamento da Av. Hélio Basso

(continua)

PAVIMENTAÇÃO		SINALIZAÇÃO	
Materiais em transporte	DMT (km)	Materiais em transporte	DMT (km)
Jazida de solo - Trecho de disposição do solo	20	Microesferas de vidro refletiva tipo I-B	300
Jazida de brita - Trecho de disposição da brita/MS	60	Microesferas de vidro refletiva tipo II-A	300
Jazida de areia - Usinagem CA	20	Solvente para tinta à base de resina acrílica pint de faixa	300
Usinagem do CA - Trecho de disposição do CA	60	Tinta para pré-marcação de pintura de faixa	300
Brita produzida em central de 80 m ³ /h	0,5	Tinta refletiva acrílica para pintura de faixa	300

(conclusão)

PAVIMENTAÇÃO		SINALIZAÇÃO	
Cal hidratada para usinagem CA	90	Confecção de placa para fornecimento e implantação	60
Tubo PE para areia extraída com draga de sucção tipo bomba	300	Chapa de aço galvanizado para confecção de placa	300
		Película retrorrefletiva tipo I + SI para confecção de placa	300
		Tinta poliéster em pó para pintura da placa	300
		Tacha refletiva bidirecional	300

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Serão discutidos, na presente seção, os resultados das 3 baterias de simulações feitas no LVECD, da aplicação da função de transferência de Nascimento (2015) para obtenção da porcentagem de área trincada e da análise econômica comparando o LVECD com outras abordagens para dimensionar o pavimento.

4.1 1ª BATERIA DE ANÁLISES

Nessa seção, serão apresentados os resultados da 1ª Bateria que, como já comentado, objetivam averiguar para qual das situações climáticas (representadas pelas hipóteses de temperatura) o pavimento apresentará maior dano e maior porcentagem de área trincada.

4.1.1 Comparação de dano entre as hipóteses de temperatura

A seguir, será exposta a comparação de resultados para as simulações com as diferentes hipóteses de temperatura geradas.

4.1.1.1 *Hélvio Basso*

Ao todo, foram realizadas 14 simulações para avaliar o comportamento do pavimento da avenida Hélvio Basso (em ambas as faixas) frente às 5 hipóteses de temperatura geradas mais as simulações com os dados advindos de San Diego e à temperatura constante de 25 °C.

Em cada simulação, o dano é dado pela relação N/N_f , que é calculada usando o critério de falha G^R e a Hipótese de Miner.

Para gerar os gráficos de evolução do dano ao longo do tempo, foram utilizadas as planilhas eletrônicas (Quadro 19) geradas pelo programa para 1, 6, 12, 24, 60, 120 e 180 meses e os dados foram juntados em outra planilha eletrônica que calcula o dano médio total, superior e inferior. O dano total consiste na média do dano em todos os pontos contidos na malha entre

$X = 0$ e $X = 0,3285$ cm (com origem no meio dos pneus da roda dupla) e entre $Z = 0$ (superfície) até $Z = 6$ cm (interface entre revestimento e base). O dano superior é calculado com a metade superior destes pontos, de $Z = 0$ até $Z = 3$ cm e o dano inferior com os pontos entre $Z = 3$ cm e $Z = 6$ cm.

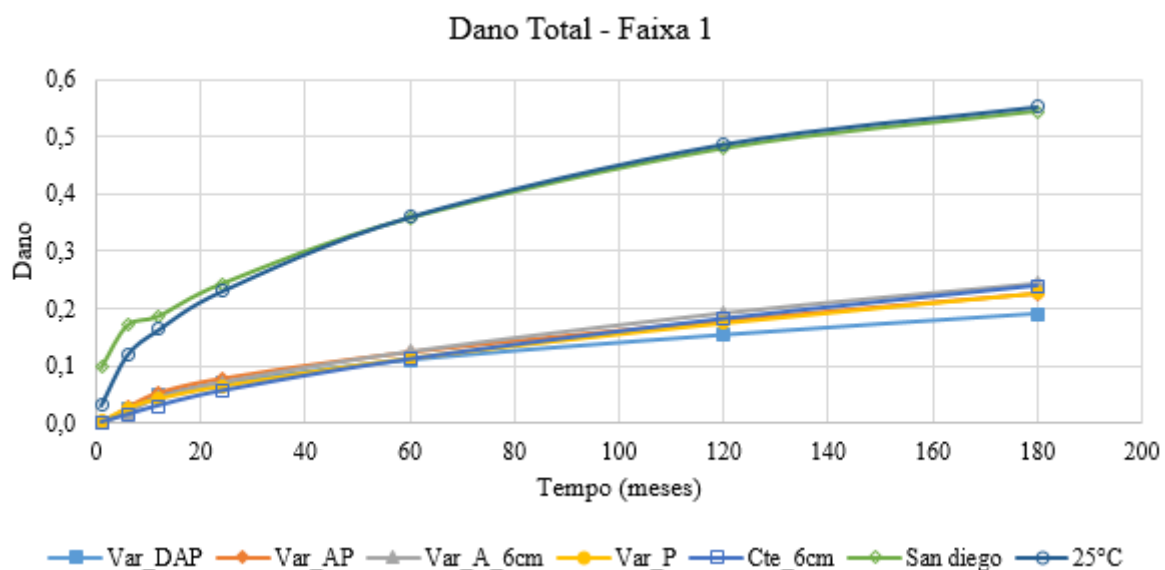
Quadro 19 - Submatriz de tabela de dano gerada pelo LVECD

X (m)	Z (cm)	Data
-1,825	0	4,43E-11
-1,825	0,6	2,45E-11
-1,825	1,2	1,03E-11
-1,825	1,8	5,54E-12
-1,825	2,4	2,11E-12
-1,825	3	7,19E-13
-1,825	3,6	3,13E-13
-1,825	4,2	1,35E-13
-1,825	4,8	5,35E-14
-1,825	5,4	1,8E-14
-1,825	6	8,6E-15

Fonte: Autor

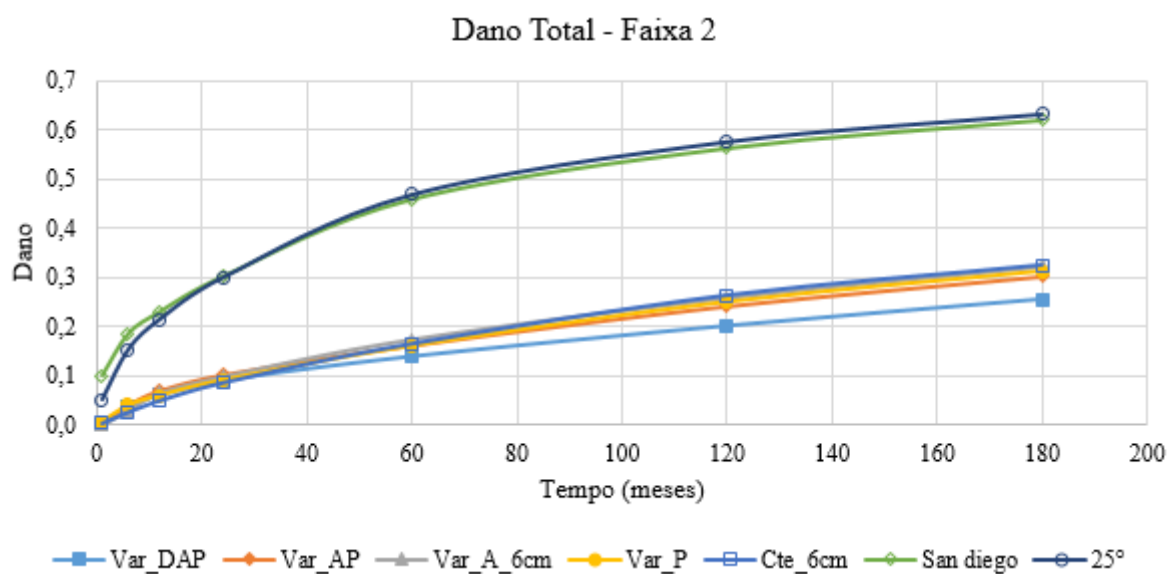
A partir desses dados, foi feita a comparação do dano gerado por cada uma das hipóteses de temperatura ao longo dos 180 meses de simulação. Na Figura 66 e na Figura 67, são apresentados os gráficos comparando o dano ao longo do período de projeto para os tráfegos da faixa 1 e da faixa 2 da avenida Hélyvio, respectivamente. Além das 5 hipóteses de temperatura, foi plotado também o resultado da simulação à temperatura constante de 25 °C e a simulação com os dados climáticos de San Diego.

Figura 66 - Dano total para a faixa 1 da Av. Hélvio Basso



Fonte: Autor

Figura 67 - Dano total para a faixa 2 da Av. Hélvio Basso



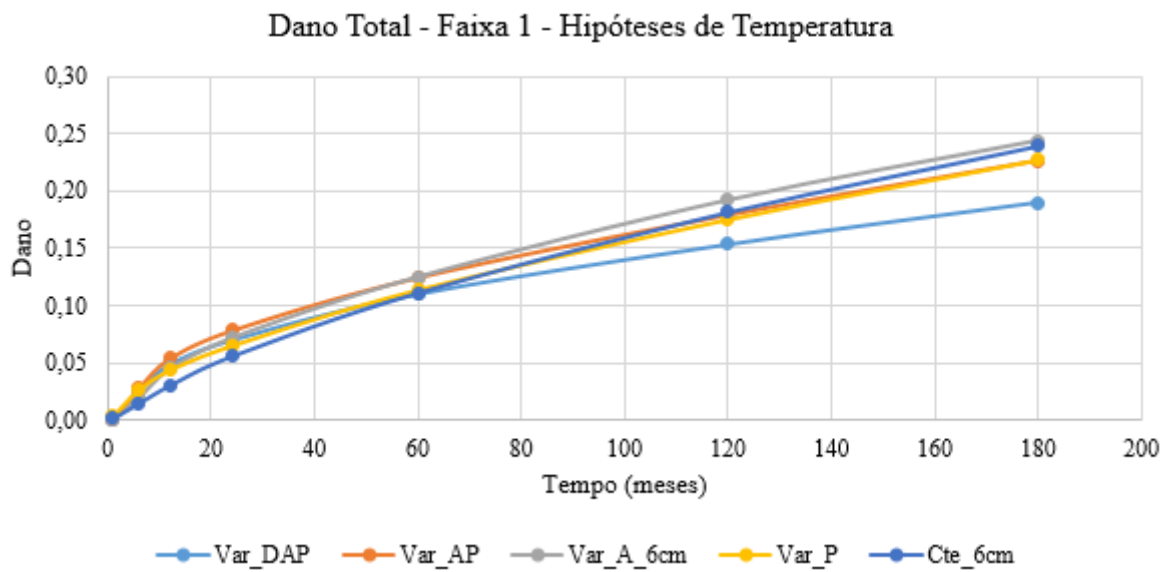
Fonte: Autor

A partir dos gráficos acima, percebe-se que os dados de San Diego e a temperatura constante de 25 °C geraram danos em níveis muito superiores àqueles gerados pelas hipóteses de temperatura aqui apresentadas.

Isso pode ser atribuído à grande diferença das médias das temperaturas entre as 5 hipóteses propostas (37,29 °C) e a média de San Diego (21,10 °C) e da hipótese de 25°C.

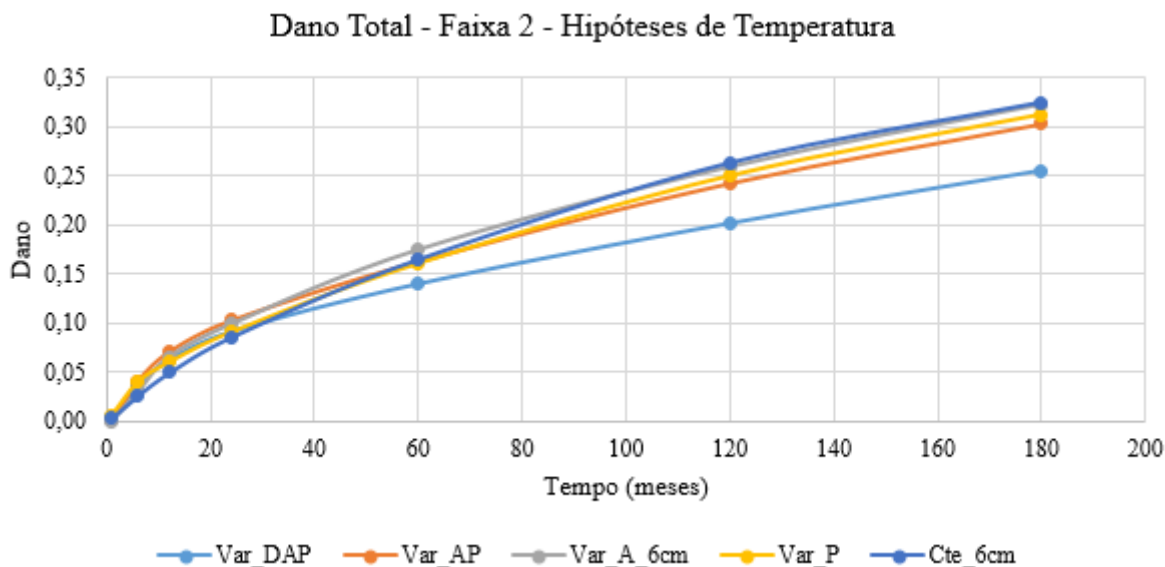
Plotando somente as 5 hipóteses, obtém-se os gráficos da Figura 68 e da Figura 69.

Figura 68 - Dano total para a faixa 1 da Av. Hélyvio Basso a partir das hipóteses de temperatura



Fonte: Autor

Figura 69 - Dano total para a faixa 2 da Av. Hélvio Basso a partir das hipóteses de temperatura



Fonte: Autor

Analisando os resultados, pode-se perceber que a hipótese de temperatura que menos gerou dano por fadiga no pavimento ao final do período de projeto foi a hipótese Var_DAP, que leva em consideração as variações térmicas ao longo das horas do dia e segundo a profundidade. Por outro lado, as hipóteses Var_A_6cm e Cte_6cm foram as que mais geraram danos dentre as 5 hipóteses propostas, onde foram adotadas temperaturas constantes ao longo da profundidade da camada de revestimento.

Já era de se esperar que a Cte_6cm gerasse menos dano que a hipótese com temperatura constante de 25°C, pois o concreto asfáltico exibe comportamento mais frágil quando em menores temperaturas e é mais suscetível ao trincamento por fadiga. Contudo, é digno de nota perceber que, quando foram desconsiderados os gradientes térmicos e as variações diárias e sazonais de temperatura, foi gerado mais dano do que o caso em que todos esses fatores foram considerados. A partir disso, pode-se dizer que, para o caso em estudo, há indícios de que é a favor da segurança considerar uma temperatura média constante ao longo de todo o ano, nas 24 horas do dia e a todas as profundidades em vez de inserir dados medidos em diversas profundidades e coletados a cada hora. Além disso, os resultados sinalizam que considerar uma temperatura constante padrão de 25 °C ao longo de todo o ano, para o pavimento em questão e as condições de tráfego e de temperatura analisados, é mais a favor da segurança, para a análise de fadiga, do que considerar temperaturas médias superiores a essa.

Uma possível explicação para essa diferença de comportamento pode ser a distribuição do tráfego ao longo do dia. Como já comentado, foi considerado um peso maior para a passagem de veículos nos horários de início e final da jornada de trabalho, além da hora de transição entre os turnos da manhã e da tarde. Comparando a quantidade de passagens do eixo-padrão a cada hora (para a faixa 2 da avenida Hélvio Basso) com a respectiva temperatura média de cada hora, conforme o Quadro 20, pode-se perceber que os horários de maior temperatura no revestimento ocorrem em momentos em que o tráfego é mais intenso. Por consequência, a mistura asfáltica apresenta uma rigidez menor (analisando a temperatura isoladamente) em momentos em que a frequência de aplicação de cargas é maior. Observando o princípio da superposição tempo-temperatura, pode-se concluir que a variação de temperatura e da frequência de aplicação de cargas levam a efeitos inversos, o que pode ter uniformizado a rigidez resultante.

Quadro 20 - Comparação entre temperaturas e tráfego para cada hora do dia

(continua)

HORA	TEMP. MÉDIAS ANUAIS POR HORA (°C)	TRÁFEGO (N PARA AADTT = 1966)
00:00	29,25	10
01:00	28,91	10
02:00	28,60	10
03:00	28,31	10
04:00	28,13	20
05:00	28,02	39
06:00	28,61	79
07:00	30,85	118
08:00	34,75	157
09:00	39,32	138
10:00	43,44	118
11:00	46,37	118
12:00	48,07	157
13:00	48,81	157
14:00	51,44	118
15:00	50,76	118
16:00	48,13	138
17:00	44,37	157
18:00	40,13	118
19:00	36,59	79
20:00	34,50	39
21:00	33,28	20

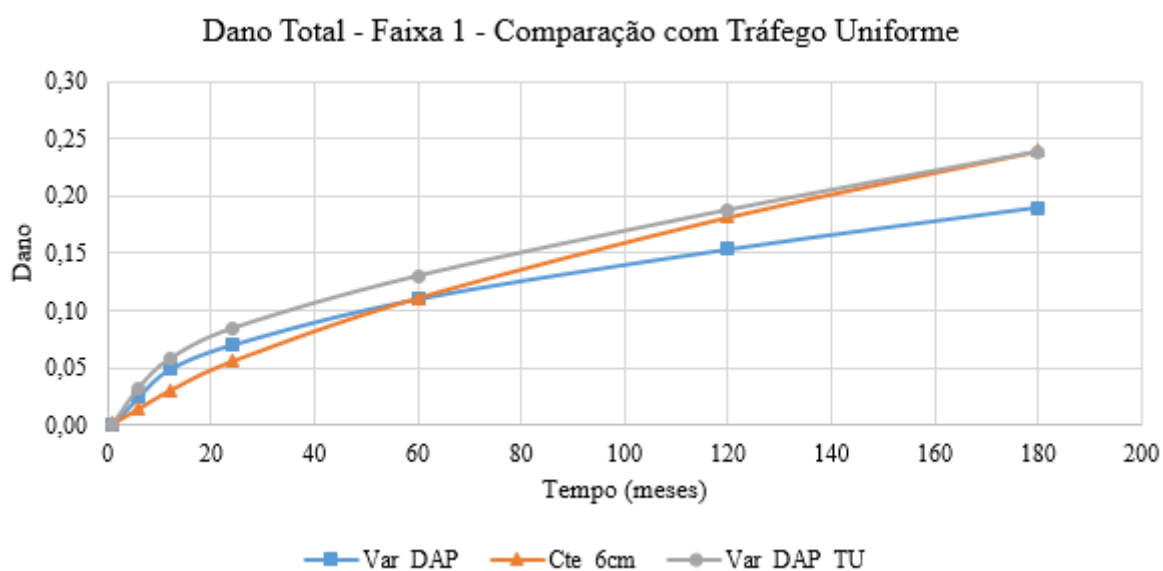
(conclusão)

HORA	TEMP. MÉDIAS ANUAIS POR HORA (°C)	TRÁFEGO (N PARA AADTT = 1966)
22:00	32,46	20
23:00	31,83	20
LEGENDA		
	Maior	
	Menor	

Fonte: Autor

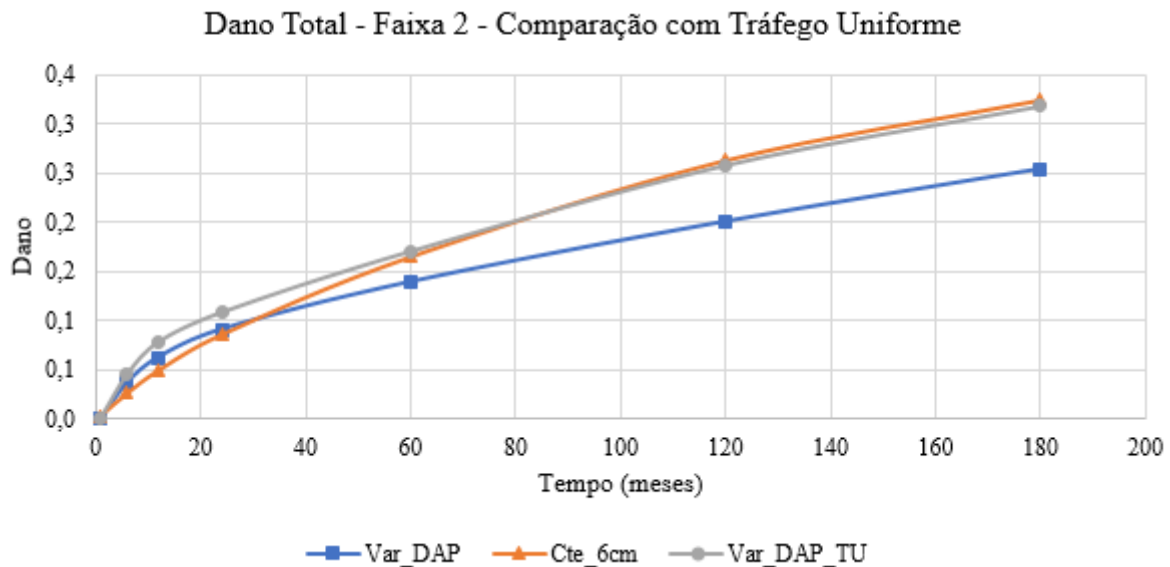
Para investigar essa sobreposição de efeitos entre volume de tráfego e temperatura, foram realizadas mais 2 simulações. Foi simulado um tráfego constante ao longo do dia para a faixa 1 e para a faixa 2 com os dados de temperatura advindos da hipótese Var_DAP. A comparação dos resultados entre essas simulações e as simulações com tráfego variável pode ser vista na Figura 70 e na Figura 71.

Figura 70 - Comparação entre simulações com tráfego variável e tráfego uniforme na faixa 1 da Av. Hélio Basso



Fonte: Autor

Figura 71 - Comparação entre simulações com tráfego variável e tráfego uniforme na faixa 2 da Av. Hέλvio Basso



Fonte: Autor

É perceptível que houve um aumento de dano quando foi considerado o tráfego como sendo uniforme ao longo do dia, o que realmente indica que havia uma compensação entre temperatura e frequência de tráfego que diminuía o dano. Entretanto, ainda assim, se for considerado que não há variação de temperatura e há variação de tráfego ao longo do dia, que é o caso da hipótese Cte_6cm, é gerado um dano ligeiramente maior do que aquele gerado pela hipótese Var_DAP com tráfego uniforme.

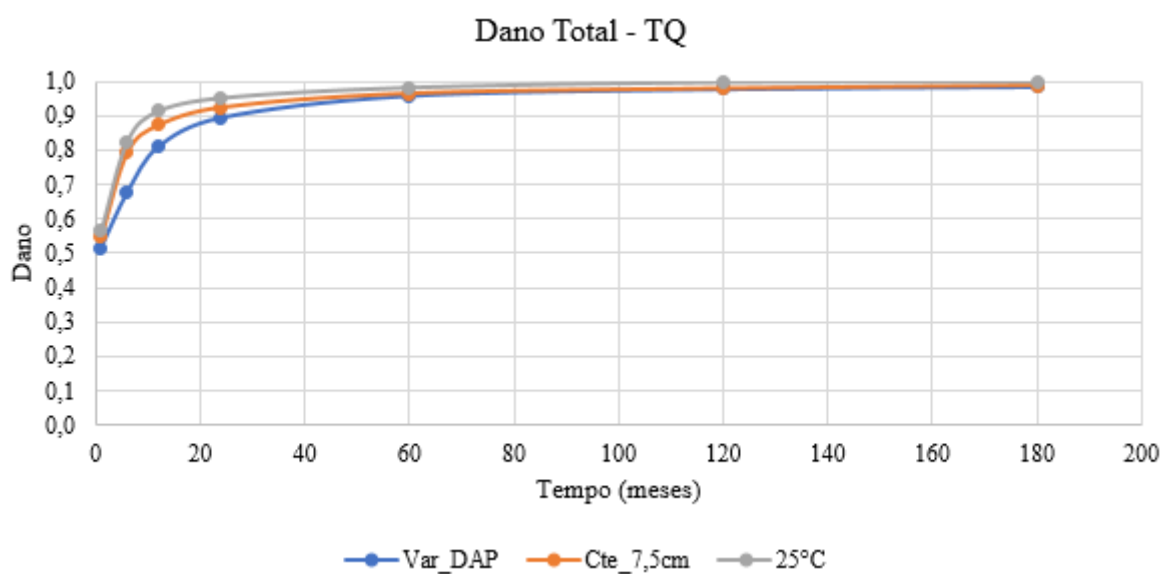
Para as simulações realizadas, há o indício de que a consideração de tráfego uniforme ao longo do dia produz um efeito semelhante àquele da consideração de temperatura constante ao longo de todos os dias. Se for esse o caso, a melhor opção para modelar o pavimento seria aquela que considerasse o tempo e custo empreendidos para a contagem do tráfego e para o monitoramento da temperatura do pavimento ao longo do tempo. Com essas informações, seria possível optar pela metodologia que oferecesse a melhor relação entre custo e benefício.

4.1.1.2 BR-158

Assim como no caso da avenida Hélvio Basso, foram feitas simulaoes a partir da estrutura da BR-158 no trecho monitorado pelo GEPPASV conhecido como “trevo dos quartéis”.

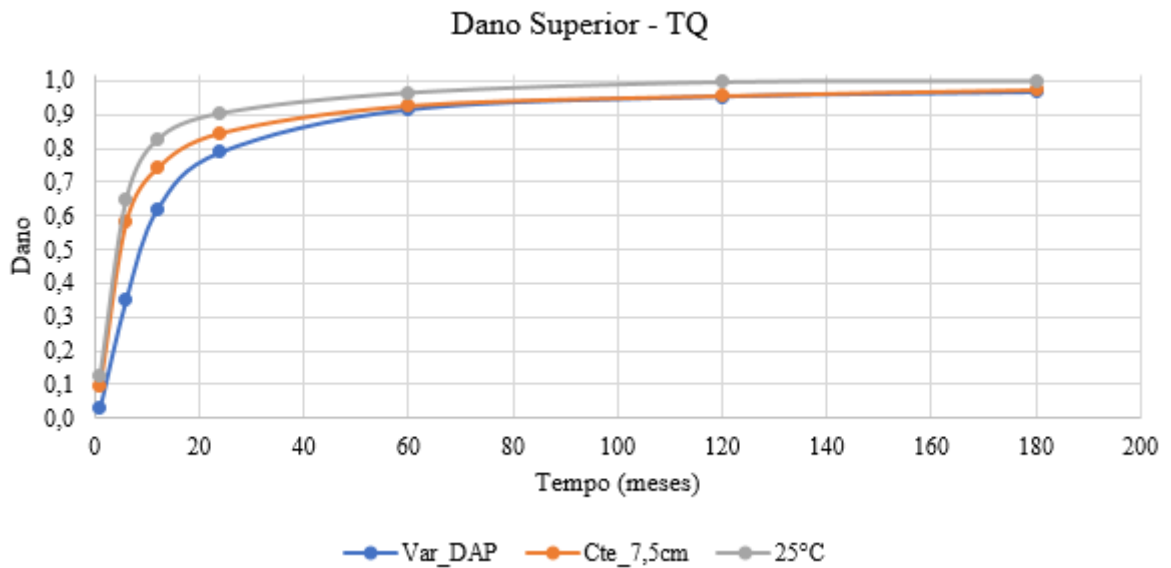
Os resultados das simulaoes de dano total, considerando a camada inferior e a camada superior de revestimento, e do dano na camada superior de pavimentos são exibidos a seguir. O dano na camada inferior atinge o valor unitário desde o 1o mês simulado para todos os casos.

Figura 72 - Dano total para a BR-158



Fonte: Autor

Figura 73 - Dano na camada superior de revestimento para a BR-158



Fonte: Autor

Por questões de visualização, foram representados apenas os resultados para as simulações feitas com a hipóteses Var_DAP, Cte_7,5cm e com temperatura constante de 25 °C.

Comparando com os resultados obtidos para a avenida Hélyvio Basso, percebe-se que o revestimento da BR-158 foi danificado muito mais intensamente. Isso pode ser atribuído, principalmente, à menor resistência à fadiga da camada asfáltica e, também, ao tráfego significativamente mais intenso.

Além disso, percebe-se que, mesmo para um pavimento muito mais danificado, considerar 25 °C ocasiona mais dano que a hipótese Cte_7,5cm e essa gerou mais dano que a hipótese Var_DAP. Sendo assim, há evidências de que, para pavimentos com essas características, ainda vale mais a pena, em termos de segurança, considerar a temperatura constante de 25 °C em vez de considerar a variação de temperaturas ao longo do tempo e espaço.

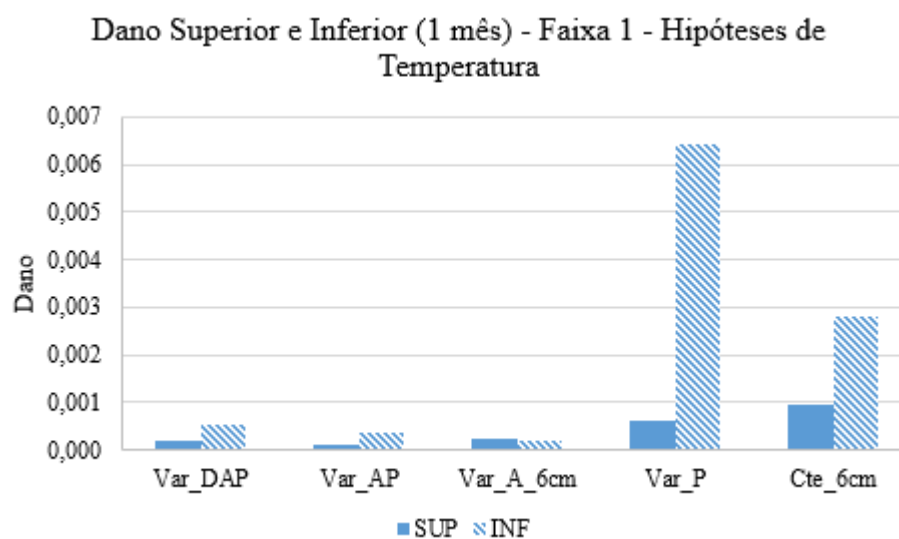
4.1.2 Tipo de fissuração

Analisando o dano na parte superior e inferior da camada betuminosa da Av. Hélyvio Basso e da BR-158, foram obtidos os resultados exibidos em sequência.

4.1.2.1 Hélvio Basso

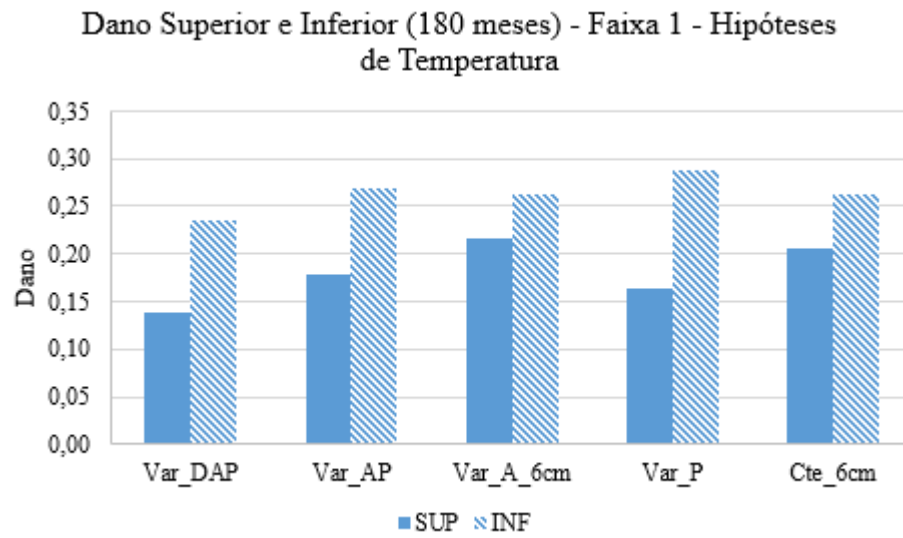
Da Figura 74 à Figura 77, são exibidos os resultados de dano na metade superior e na metade inferior da camada de revestimento, sendo deixados de lado os resultados para as simulações à temperatura de 25 °C e com os dados de San Diego para melhor comparar as hipóteses de temperatura entre si.

Figura 74 - Dano superior e inferior no 1º mês para a faixa 1 da Av. Hélvio Basso



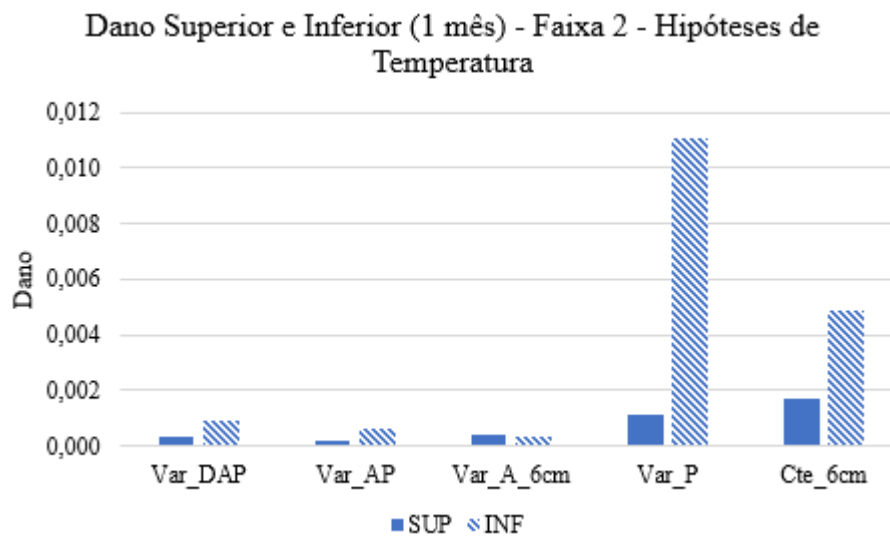
Fonte: Autor

Figura 75 - Dano superior e inferior no 180º mês para a faixa 1 da Av. Hólvio Basso



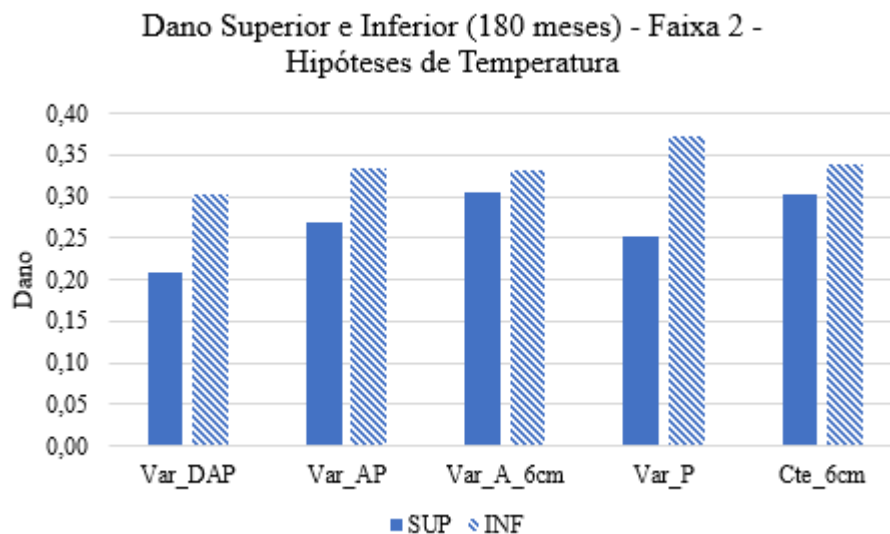
Fonte: Autor

Figura 76 - Dano superior e inferior no 1º mês para a faixa 2 da Av. Hólvio Basso



Fonte: Autor

Figura 77 - Dano superior e inferior no 180º mês para a faixa 2 da Av. Hélvio Basso

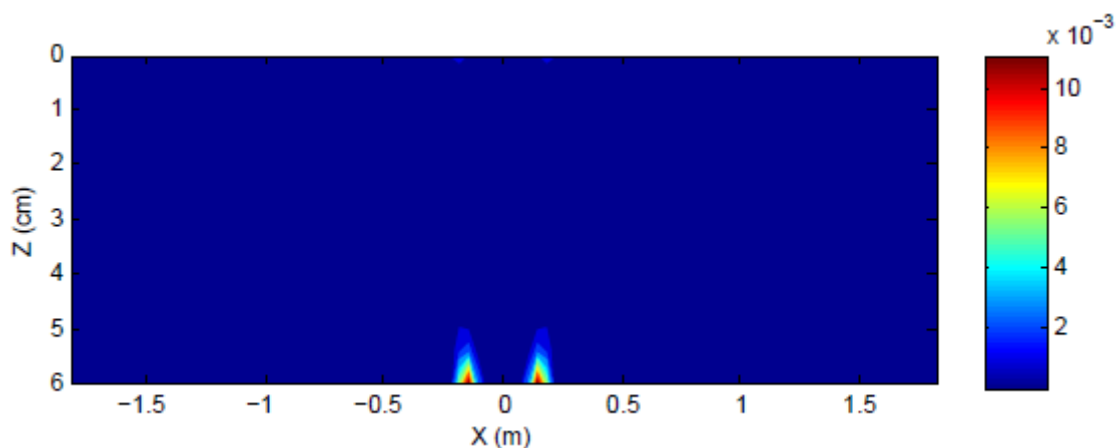


Fonte: Autor

Analisando os resultados obtidos no 1º mês, percebe-se que todas as simulaoes, com exceao da hipótese Var_A_6cm para ambas as faixas, indicam uma fissuraao do tipo *bottom-up*, pois os resultados para o dano inferior são maiores que os resultados para o dano superior.

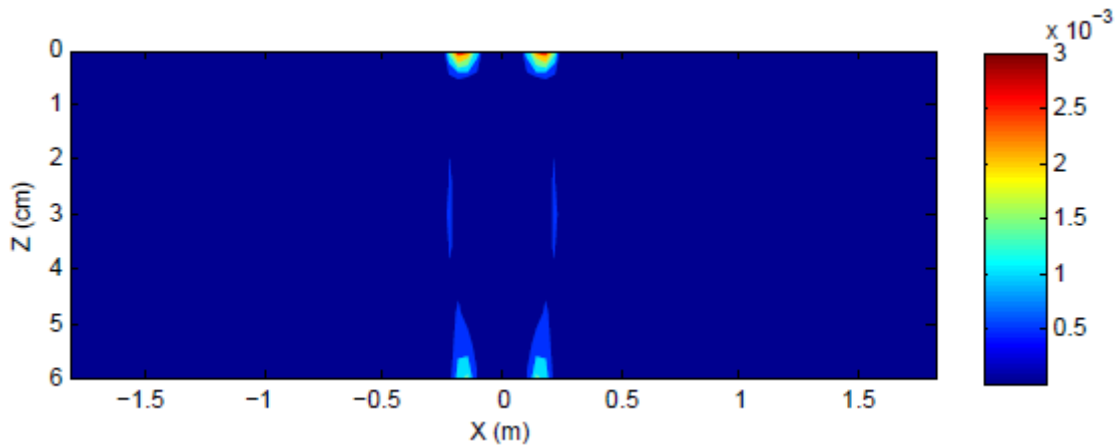
Na Figura 78 e na Figura 79, estão representados, respectivamente, os gráficos de dano no revestimento para as hipóteses Var_DAP e Var_A_6cm.

Figura 78 - Gráfico de dano para a faixa 1 da Av. Hélvio Basso e hipótese Var_DAP no 1º mês



Fonte: Autor

Figura 79 - Gráfico de dano para a faixa 1 da Av. Hólvio Basso e hipótese Var_A_6cm no 1º mês



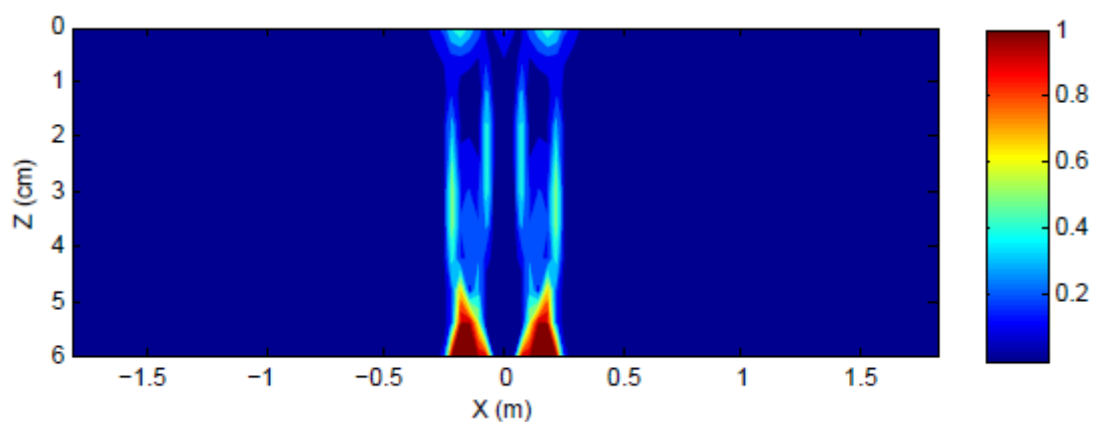
Fonte: Autor

Acerca dessa diferença na iniciação da fissuração que a hipótese Var_A_6cm gerou, pode-se atribuir isso ao fato de que, nessa hipótese, considerou-se que o revestimento estava inteiramente sujeito à média de temperaturas medidas para o mês correspondente. Com isso, o primeiro mês simulado corresponde a janeiro e, conseqüentemente, exibiu uma média de temperaturas acima de 45 °C.

Mais adiante, quando forem exibidos os resultados para a 2ª bateria de análises, será comentado sobre a tendência de haver fissuração *bottom-up* para temperaturas mais elevadas.

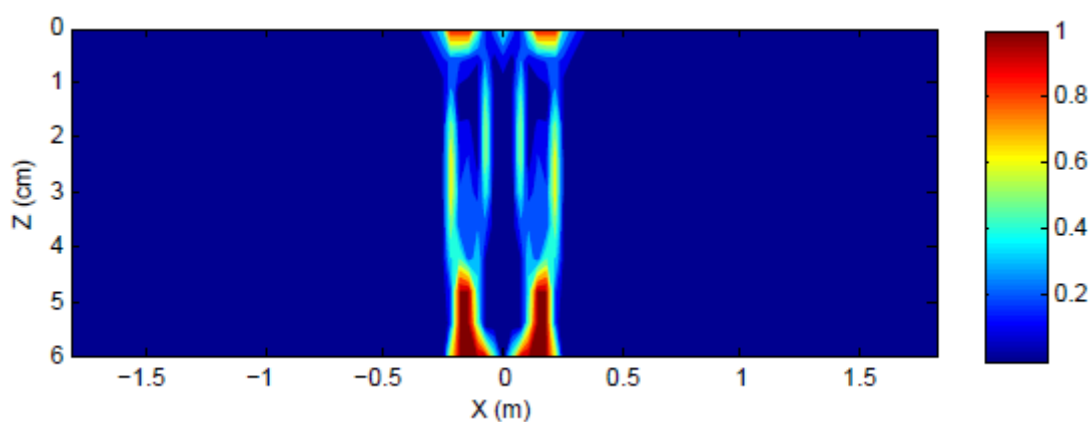
Vale observar, também, que ao final dos 180 meses, todas as simulações encerraram com dano inferior claramente maior que o superior (Figura 80 e Figura 81) pois, nesse caso, já passaram todas as variações térmicas sazonais e essa diferença exibida pela hipótese Var_A_6cm já não existe mais.

Figura 80 - Gráfico de dano para a faixa 1 da Av. Hólvio Basso e hipótese Var_DAP no 180° mês



Fonte: Autor

Figura 81 - Gráfico de dano para a faixa 1 da Av. Hólvio Basso e hipótese Var_A_6cm no 180° mês



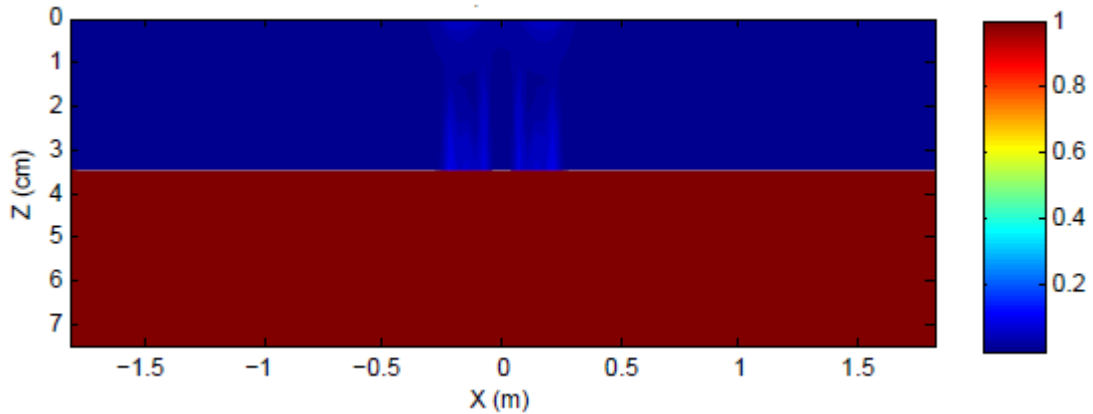
Fonte: Autor

4.1.2.2 BR-158

Nas condições específicas do trecho experimental da BR-158, a maior fragilidade da camada inferior de revestimento ocasiona um nível maior de dano e, por consequência, gera a tendência de fissuras *bottom-up* em todos os casos.

Pode-se verificar isso para o gráfico de dano de uma simulação nesse trecho logo no 1º mês (Figura 82).

Figura 82 - Gráfico de dano para a faixa 2 da BR-158 e hipótese Var_DAP no 1º mês



Fonte: Autor

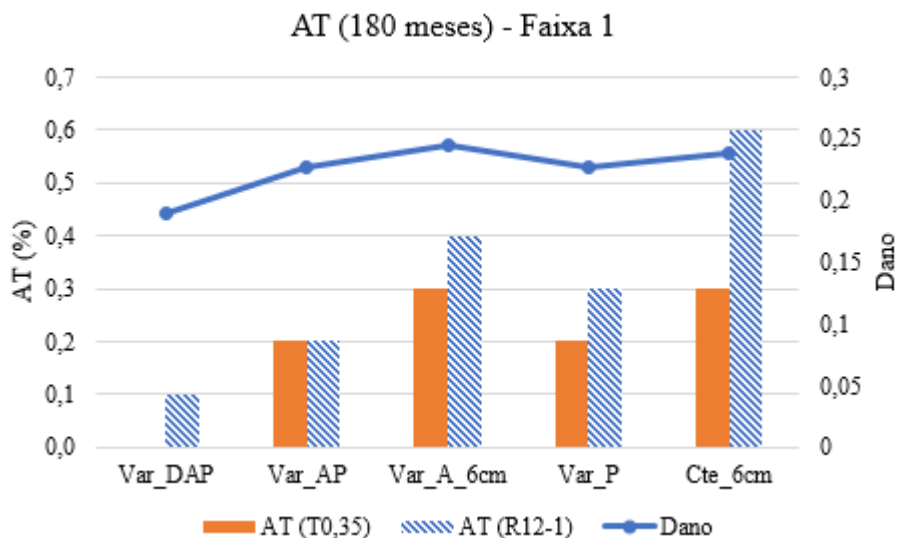
4.1.3 Área trincada

Nessa seção, serão mostrados os resultados da aplicação das funções de transferência de Nascimento (2015) nos resultados de dano do LVECD e da função de Fritzen (2016), com o MeDiNa e sua comparação com a área trincada observada em campo.

4.1.3.1 Hélvio Basso

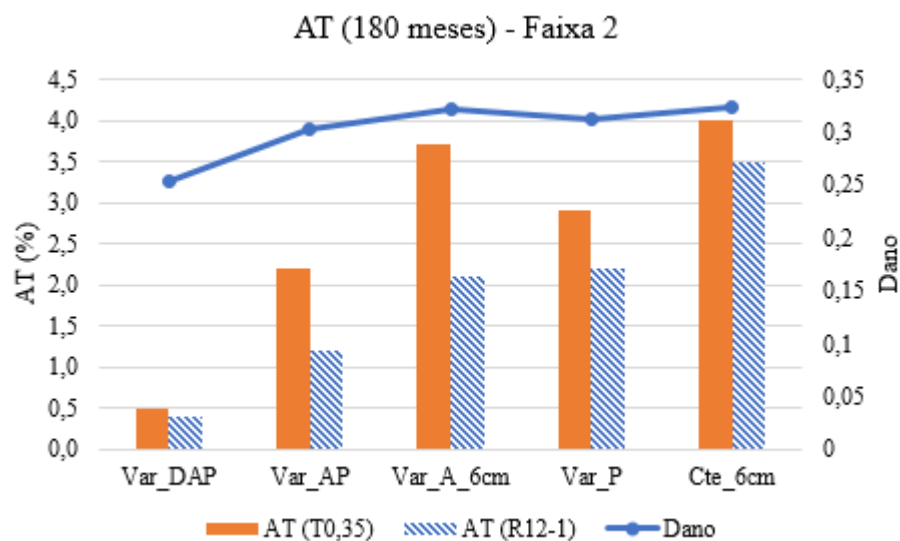
Com a aplicação das duas funções de transferência apresentadas por Nascimento (2015) e do MeDiNa, foram obtidos os resultados para a área trincada na faixa 1 e faixa 2, que estão na Figura 83 e na Figura 84, respectivamente.

Figura 83 – Dano e AT no 180º mês para a faixa 1 da Av. Hólvio Basso



Fonte: Autor

Figura 84 – Dano e AT no 180º mês para a faixa 2 da Av. Hólvio Basso



Fonte: Autor

Observando os resultados, percebe-se que, em geral, os maiores valores de dano por fadiga correspondem aos maiores valores de área trincada para ambas as funções de Nascimento, o que é razoável.

Pode-se também pontuar que a AT resultante de $T_{0,35}$ teve maiores valores para a faixa 1 e que a função de R_{12-1} resultou em maiores porcentagens de AT para a faixa 2.

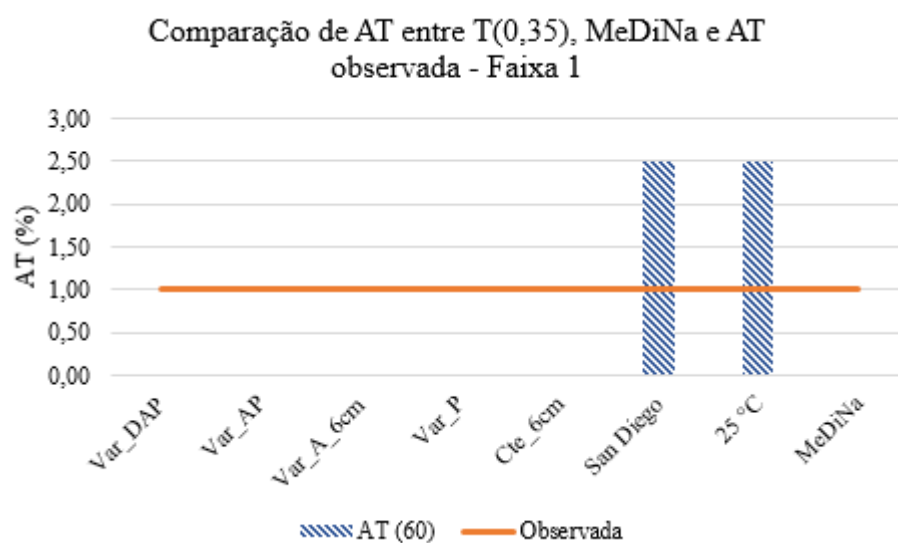
Pode ser uma explicação para isso a própria natureza destas funções. Para situações de crescimento maior do tráfego no início do período de projeto (que é o caso da faixa 2), será atingido mais rapidamente o valor de 0,35 para o dano, o que diminuirá $T_{0,35}$, e a taxa de crescimento será maior, o que aumentará R_{12-1} .

A partir dos resultados para ambas as faixas, pode-se notar que o dano sempre esteve abaixo do valor de 0,35. Isso pode ajudar a esclarecer o porquê de tais simulações apresentarem valores de AT tão baixos visto que, conforme as observações de Nascimento (2015), existe uma intensificação na evolução de AT a partir do momento em que o dano atinge o valor de 0,35.

Para ambas as faixas, a AT resultante da função de Fritzen (2016) gerou apenas valores próximos a zero e, por isso, não foram plotados. Essa diferença em relação aos demais resultados pode ser atribuída às diferentes análises reológicas que geraram os resultados (análise elástica para o MeDiNa e viscoelástica para o LVECD) e das diferenças nos protocolos de ensaio que forneceram os *inputs*.

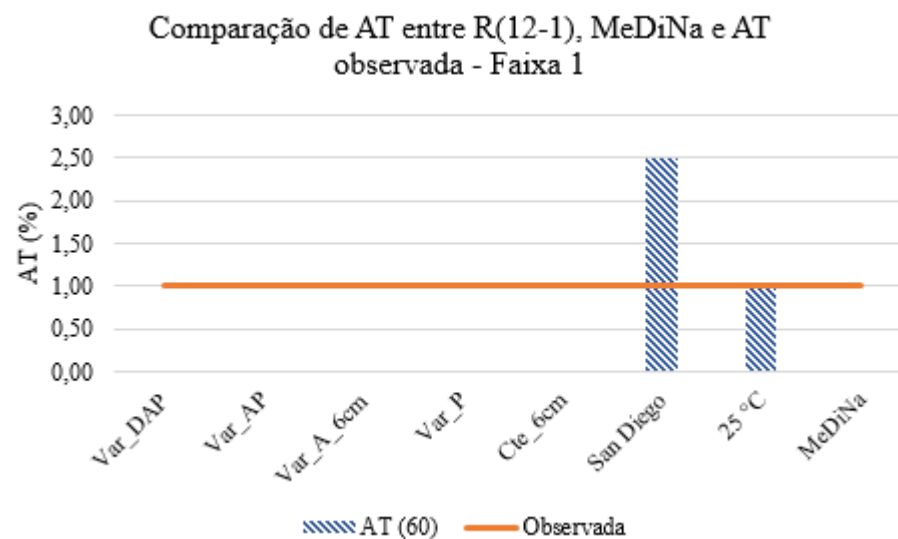
Visto que dispõe-se de dados observados em campo para os primeiros 68 meses desde a abertura do tráfego, foi feita uma comparação com as medições a 60 meses com as simulações nesse mesmo período. A comparação dos resultados simulados com aqueles obtidos em campo na Av. Hélvio Basso para a faixa 1 está na Figura 85 e na Figura 86 e, para a faixa 2, está na Figura 87 e na Figura 88.

Figura 85 - Comparação entre AT simulada pelo T(0,35), MeDiNa e AT observada para a faixa 1 da Av. Hólvio Basso ao final de 60 meses



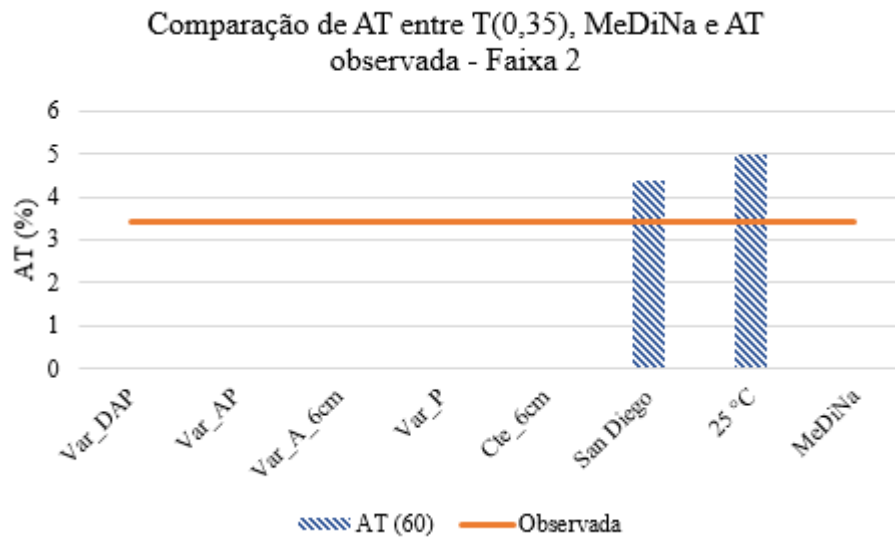
Fonte: Autor

Figura 86 - Comparação entre AT simulada pelo R(12-1), MeDiNa e AT observada para a faixa 1 da Av. Hólvio Basso ao final de 60 meses



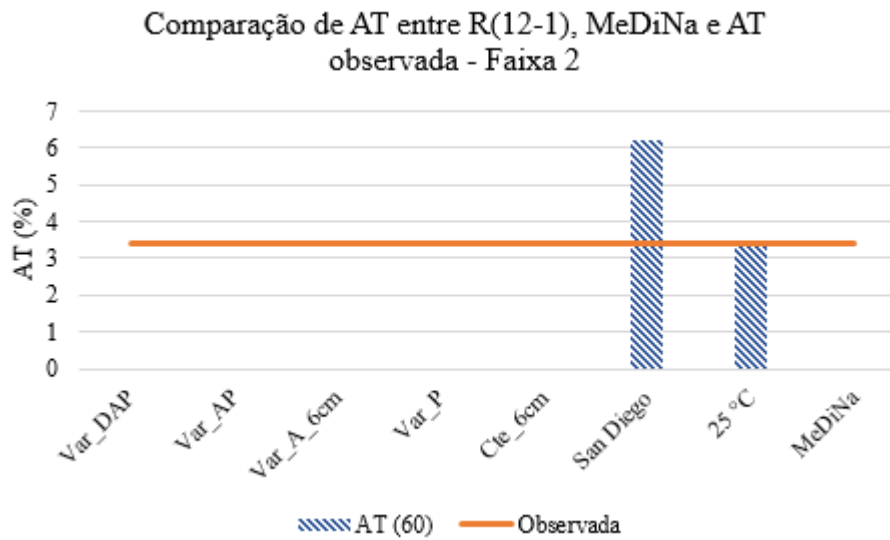
Fonte: Autor

Figura 87 - Comparação entre AT simulada pelo T(0,35), MeDiNa e AT observada para a faixa 2 da Av. Hélio Basso ao final de 60 meses



Fonte: Autor

Figura 88 - Comparação entre AT simulada pelo R(12-1), MeDiNa e AT observada para a faixa 2 da Av. Hélio Basso ao final de 60 meses



Fonte: Autor

Nos gráficos acima, é identificável que as 5 hipóteses de temperatura, bem como o MeDiNa, resultaram em valores de AT de ordens de grandeza muito baixas e, portanto, sem sentido físico.

Tal diferença, como já discutido, pode ser atribuída à diferença entre as médias de temperatura entre as 5 hipóteses, os valores norte-americanos e os 25°C constantes.

Sendo assim, foram as temperaturas medidas em San Diego e a hipótese de 25 °C constantes que geraram, através da simulação do LVECD, os resultados de AT mais próximos do que foi medido em campo.

Com isso, há o indicativo de que as funções de transferência de dano para AT propostas não são as que melhor descrevem o comportamento dos pavimentos em questão com as condições climáticas da região em estudo.

4.1.3.2 BR-158

Aplicando ambas as funções de transferência para os resultados de dano da BR-158, foram obtidos resultados maiores que 100% para todas as simulações ao final de 180 meses.

4.2 2ª BATERIA DE ANÁLISES

Com a 2ª Bateria, foi realizada uma análise de sensibilidade para captar a influência da temperatura sobre o dano calculado pelo protocolo S-VECD e sobre a AT.

4.2.1 Comparação de dano a diferentes temperaturas

Na segunda bateria de simulações, foram realizadas 39 simulações. Cada uma foi feita a temperaturas constantes, de 0 °C até 60 °C, com intervalos de 5 °C entre cada, para as duas faixas da avenida Hélvio Basso e para a BR-158.

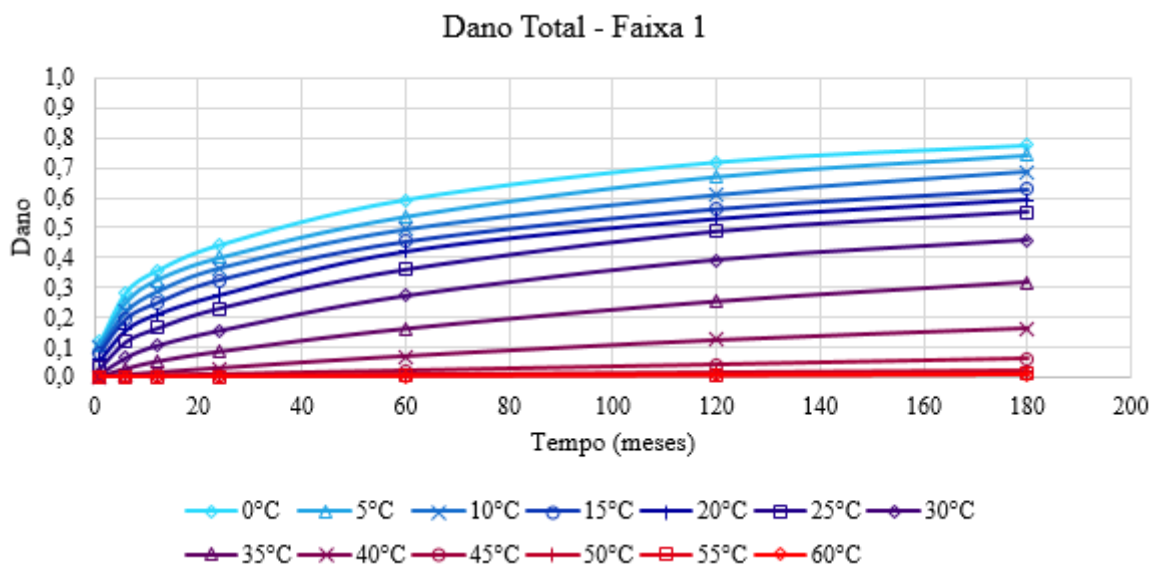
4.2.1.1 Hélvio Basso

Na Figura 89 e na Figura 90, estão os resultados de dano total para a faixa 1 e faixa 2 da Av. Hélvio Basso.

Observa-se que, quanto maior é a temperatura simulada, menor é o dano por fadiga, tanto para a menos carregada como para a mais carregada. Isso é razoável pois a rigidez do revestimento diminui com o aumento da temperatura e o asfalto fica cada vez mais dúctil. Desse modo, se manifesta em menor intensidade o fenômeno da fadiga. Em contrapartida, o fenômeno da deformao permanente provavelmente se acentua nessas condioes de temperatura mais elevada.

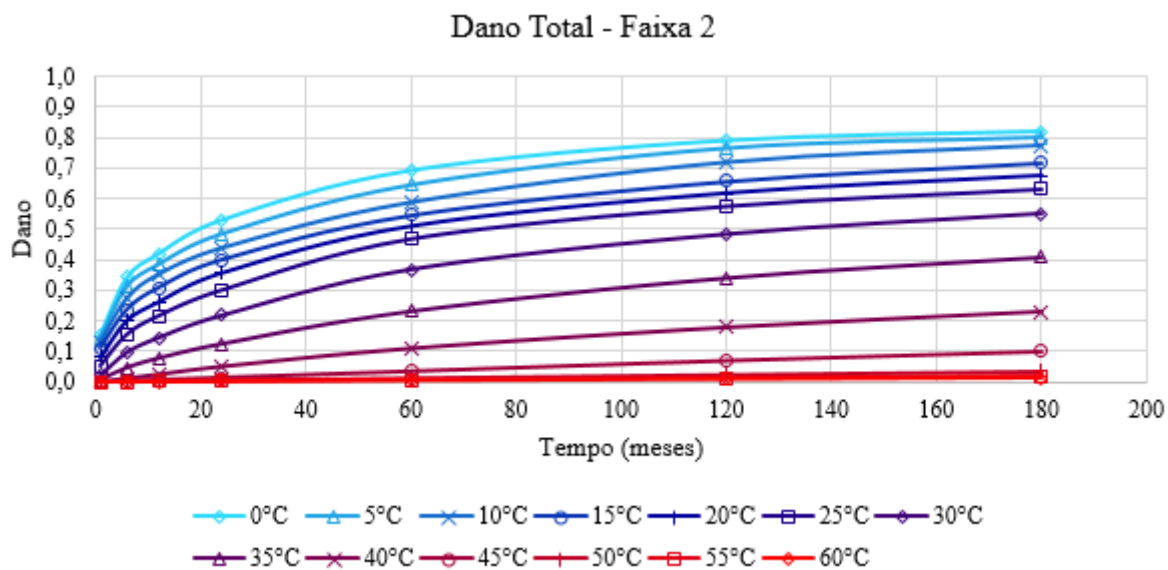
Também, comparando os resultados com os da 1a Bateria, pode-se ver que o dano ao fim de 180 meses para as 5 hipóteses ficou entre os valores de 35C e 40C constantes, tanto para a faixa 1 como para a faixa 2. Da mesma forma, as simulaoes com os dados de San Diego e 25C da Bateria 1 se aproximaram dos resultados de 20C e 25C constantes na Bateria 2.

Figura 89 - Dano total para a faixa 1 (temperaturas constantes)



Fonte: Autor

Figura 90 - Dano total para a faixa 2 (temperaturas constantes)

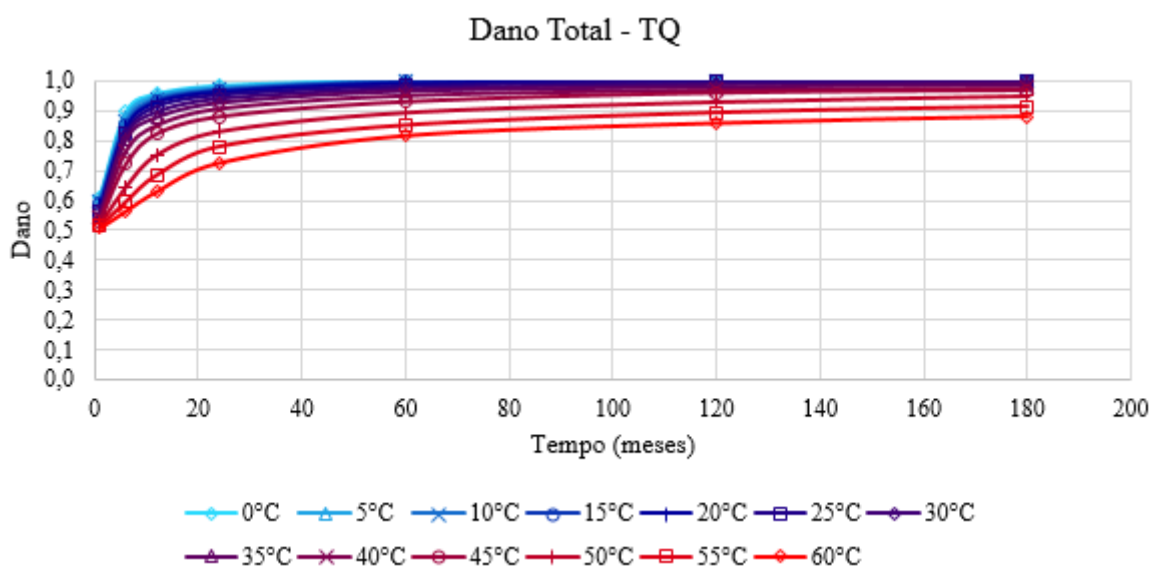


Fonte: Autor

4.2.1.2 BR-158

Na Figura 91, está representada a evolução do dano total na BR-158.

Figura 91 - Dano total para a BR-158 (temperaturas constantes)



Fonte: Autor

Assim como no caso da Av. Hélvio Basso, percebe-se claramente a diminuição do dano por fadiga  medida que a temperatura simulada aumenta. Devido às características mecânicas deste pavimento, já citadas, houve uma evolução muito mais rápida do dano.

Ao se comparar os resultados da BR-158 com os da Av. Hélvio Basso, pode-se ver que, no segundo caso, que apresenta uma mistura asfáltica de propriedades superiores,  mais visível a influência da temperatura no dano.

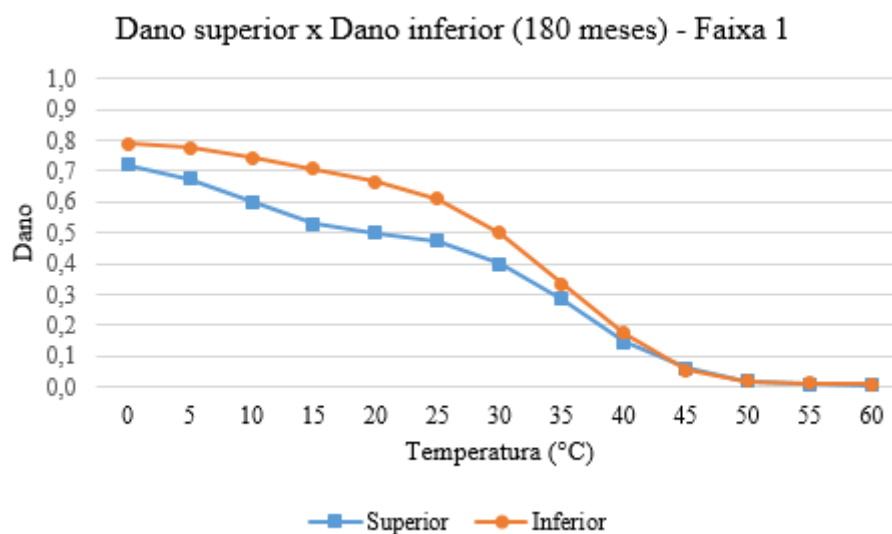
4.2.2 Tipo de fissuração

Assim como na 1 Bateria, foi investigada a evolução do dano na parte superior e na inferior do revestimento dos dois pavimentos em estudo.

4.2.2.1 Hélvio Basso

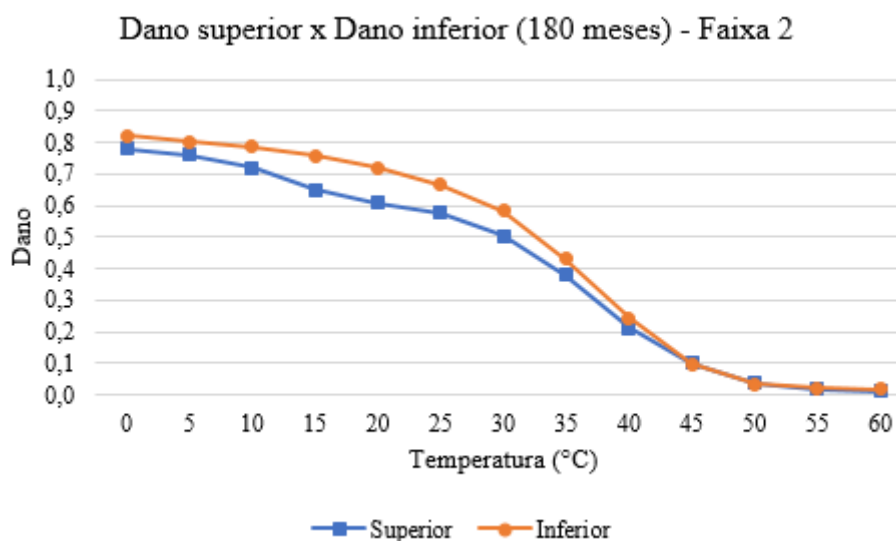
Analisando a propagação das fissuras de fadiga no pavimento, percebe-se que ocorre uma inversão de comportamento entre situações a temperaturas baixas e a temperaturas altas (Figura 92 e Figura 93).

Figura 92 - Comparação entre dano superior e inferior para a faixa 1



Fonte: Autor

Figura 93 - Comparação entre dano superior e inferior para a faixa 2

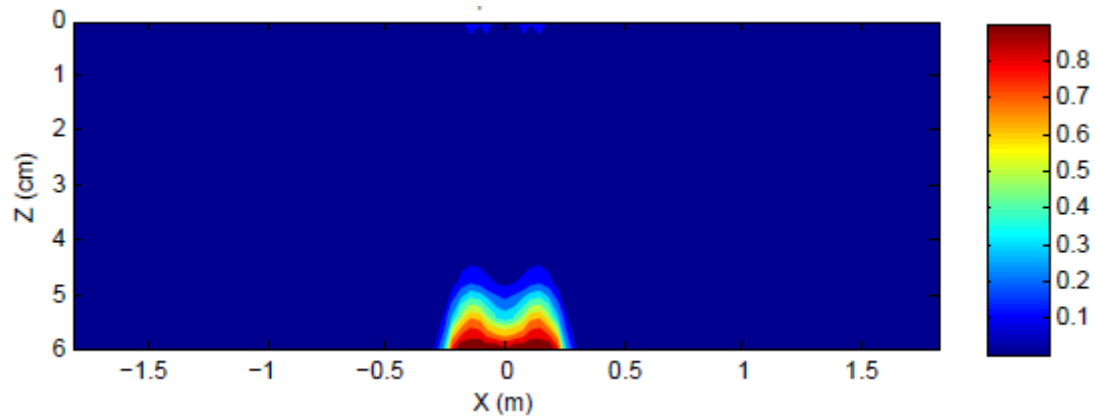


Fonte: Autor

Tanto nas simulações da faixa 1 como da faixa 2, percebe-se que, até 45 °C, as fissuras começam a se propagar na parte inferior da camada asfáltica, caracterizando a fissuração *bottom-up*, conforme pode ser verificado nos gráficos de dano da Figura 94 e da Figura 95. A

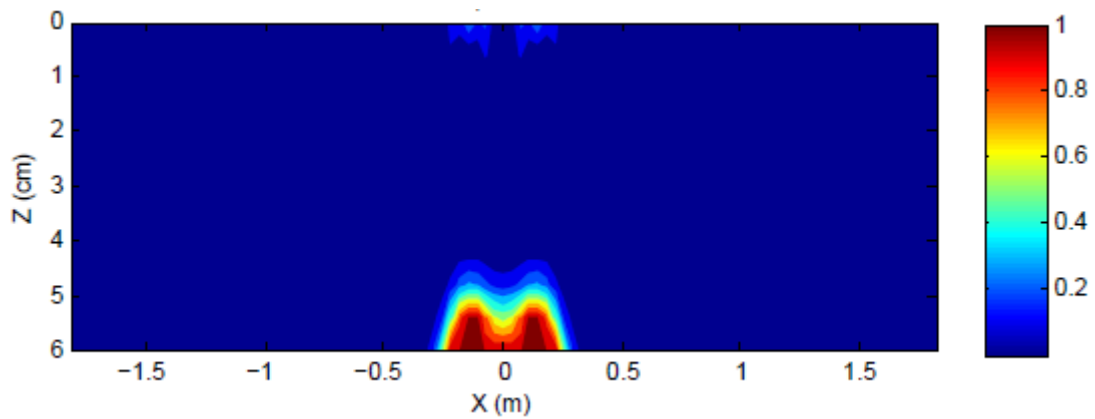
temperaturas superiores a essa, as fissuras começam na parte superior de asfalto, configurando a fissuração *top-down* (Figura 96 e Figura 97).

Figura 94 - Gráfico de dano do dano para a faixa 1 a 0°C no 1º mês



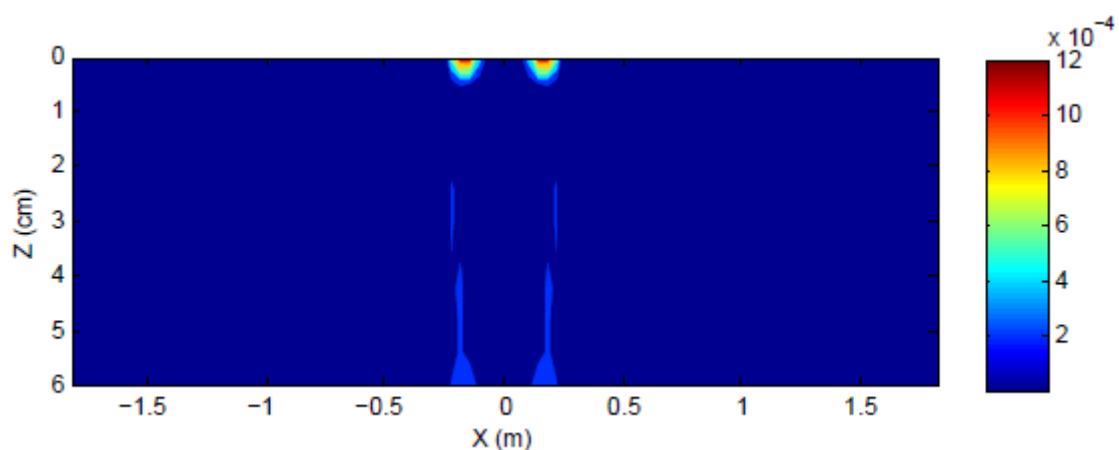
Fonte: Autor

Figura 95 - Gráfico de dano para a faixa 2 a 0°C no 1º mês



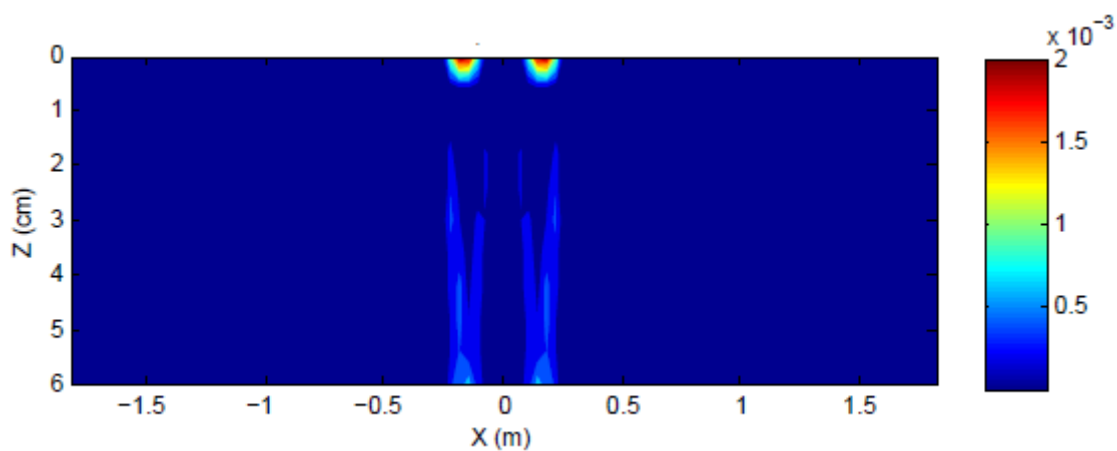
Fonte: Autor

Figura 96 - Gráfico de dano para a faixa 1 a 50°C no 1º mês



Fonte: Autor

Figura 97 - Gráfico de dano para a faixa 2 a 50°C no 1º mês

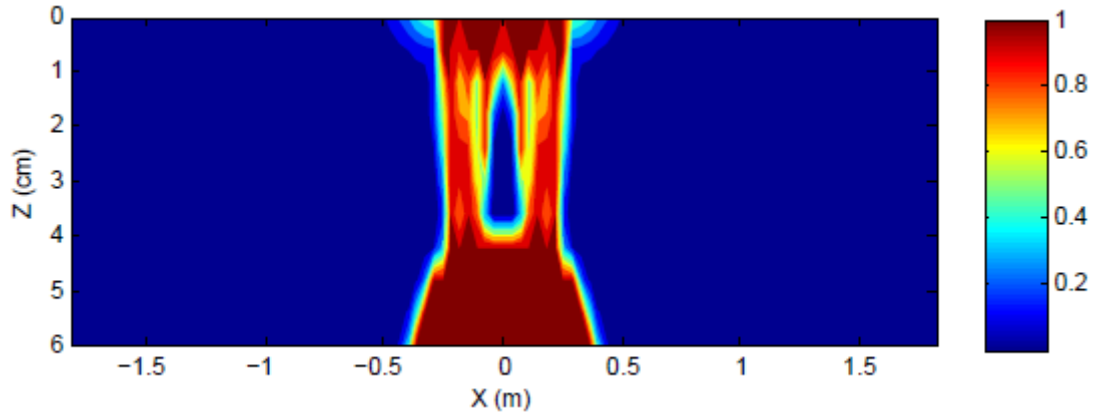


Fonte: Autor

Análises publicadas no relatório do NCHRP (2010) mostram que, para pavimentos localizados em regiões de clima mais frio ou variações mais extremas de temperatura, há uma maior tendência de exibir dano tanto no topo como no fundo da camada de revestimento se comparados com pavimentos em regiões de clima mais quente e mais uniformes quanto à temperatura.

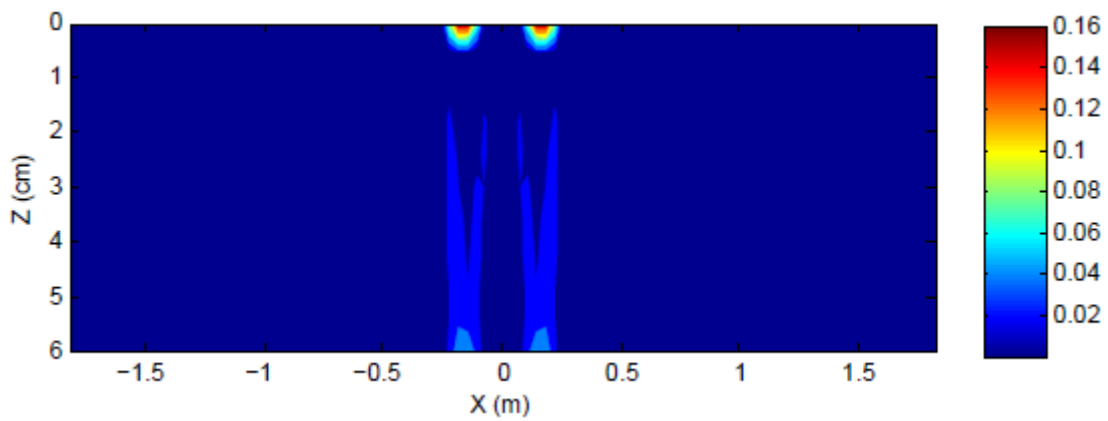
Observando os gráficos de dano após 120 meses de tráfego (Figura 98 à Figura 101), é possível perceber essa tendência.

Figura 98 - Gráfico de dano para a faixa 1 a 0°C no 120º mês



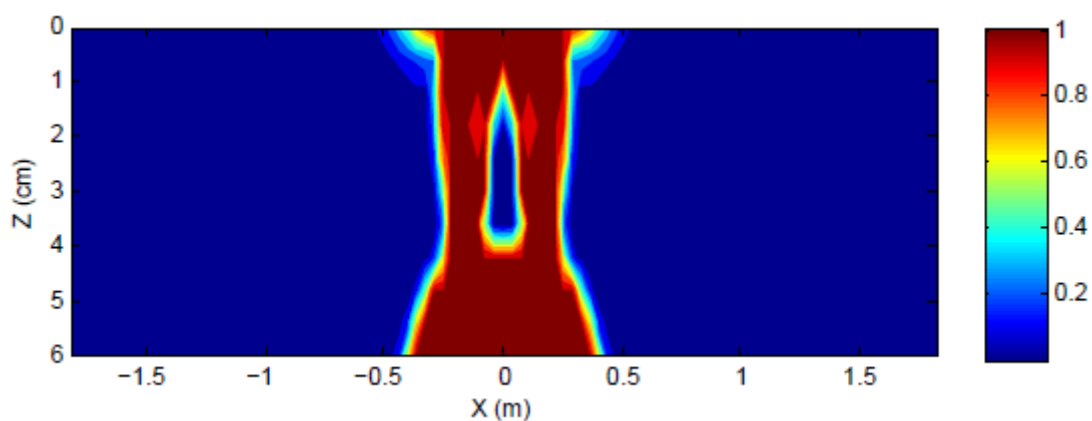
Fonte: Autor

Figura 99 - Gráfico de dano para a faixa 1 a 50°C no 120º mês



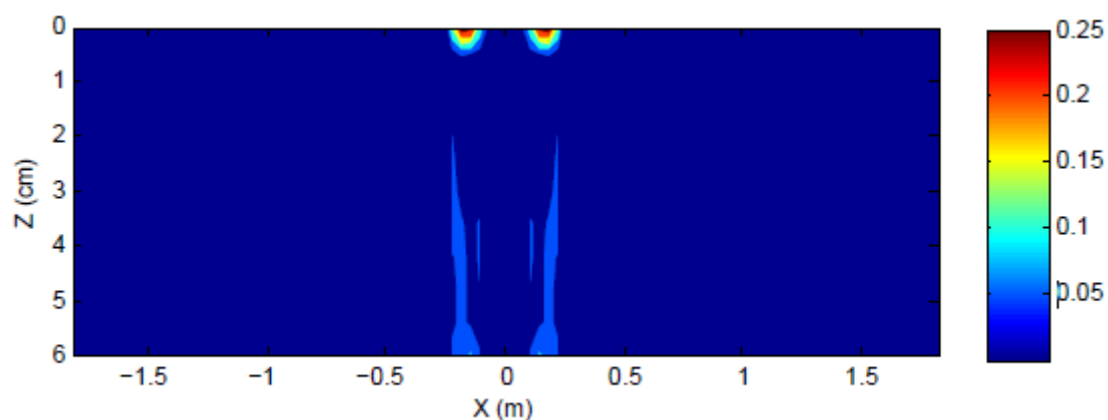
Fonte: Autor

Figura 100 - Gráfico de dano para a faixa 2 a 0°C no 120º mês



Fonte: Autor

Figura 101 - Gráfico de dano para a faixa 2 a 50°C no 120º mês



Fonte: Autor

4.2.2.2 BR-158

Assim como foi observado na seção da 1ª bateria de análises, a fissuração na BR-158 é, devido às características reológicas das duas camadas de revestimento, sempre do tipo *bottom-up*.

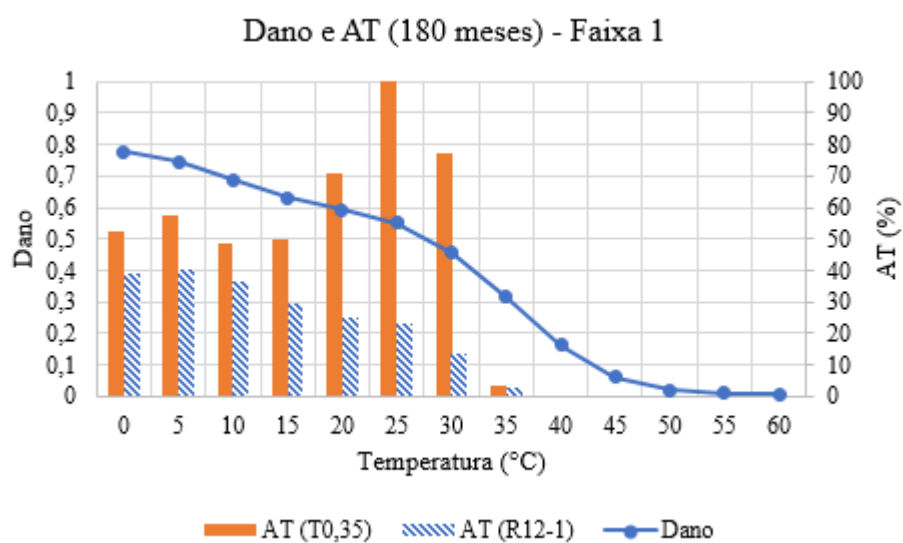
4.2.3 Área trincada

Com a aplicação das duas funções de transferência em estudo e sua comparação, chegou-se aos resultados expostos nessa seção.

4.2.3.1 Hélvio Basso

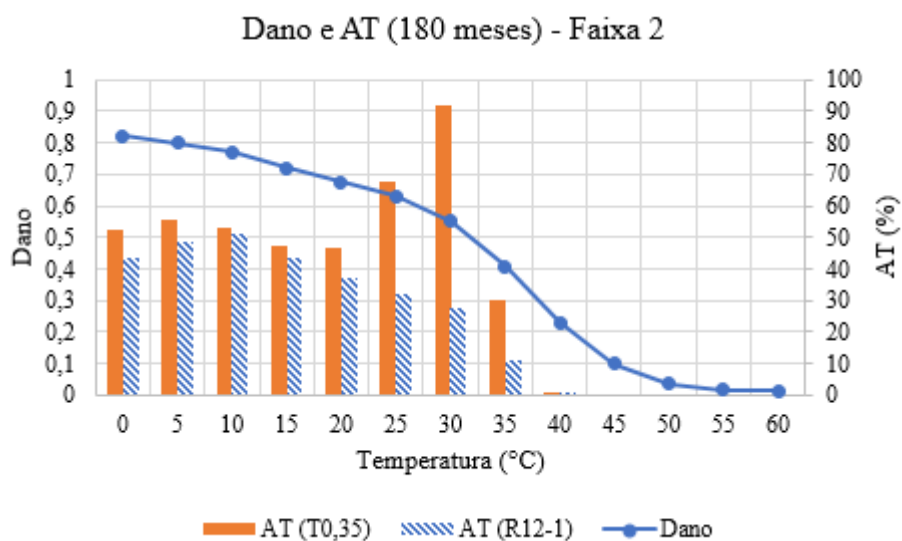
Nas figuras a seguir, estão exibidos os resultados de AT para a Av. Hélvio Basso

Figura 102 - Dano total e AT no 180º mês para a faixa 1 da Av. Hélvio Basso (temperaturas constantes)



Fonte: Autor

Figura 103 - Dano total e AT no 180º mês para a faixa 2 da Av. Hélvio Basso (temperaturas constantes)



Fonte: Autor

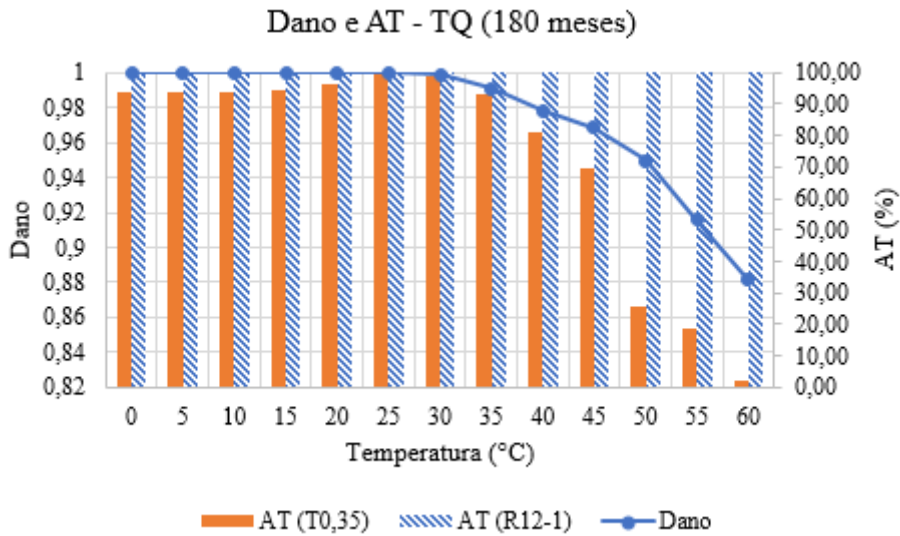
  relevante comentar que as duas funoes de transferência utilizadas mostraram comportamentos distintos na evoluao dos resultados  medida que a temperatura simulada aumentou. Para a funao com base no R_{12-1} , a AT acompanhou a tendência do dano, diminuindo com o aumento da temperatura. No caso da funao baseada no $T_{0,35}$, houve uma temperatura com dano máximo (25 °C para a faixa 1 e 30 °C para a faixa 2).

Uma explicaao para esse padrão exibido para os resultados da aplicaçao da segunda funao  que existem dois fatores com efeitos opostos em funao da temperatura. Um deles  o dano, que diminui com o aumento da temperatura e o outro  o próprio $T_{0,35}$, que assume maiores valores para temperaturas superiores, devido ao retardo para ser alcançado o dano de 0,35. Desse modo, a atuaao dessas duas influências sobre a AT ocasiona um valor máximo.

4.2.3.2 BR-158

A representaao da evoluao da AT e do dano total da BR-158 está na Figura 104.

Figura 104 - Dano total e AT no 180º mês para a BR-158 (temperaturas constantes)



Fonte: Autor

Para a BR-158, a função de transferência do parâmetro R_{12-1} apresentou valores maiores que 100% de área trincada para todas as simulações, sendo este considerado como 100% na representação gráfica. Essa tendência pode ser explicada pela rápida evolução do dano no pavimento, o que resultou em fatores R_{12-1} muito elevados.

Já a função do parâmetro $T_{0,35}$ apresentou uma tendência semelhante à do dano, com decréscimo para simulações a temperaturas maiores.

Comparando os resultados de AT para os dois pavimentos, pode dizer que, no caso da Av. Hélio Basso, a função baseada no R_{12-1} apresentou resultados mais razoáveis e, no caso da BR-158, a função com base no parâmetro $T_{0,35}$ foi a que melhor a descreveu.

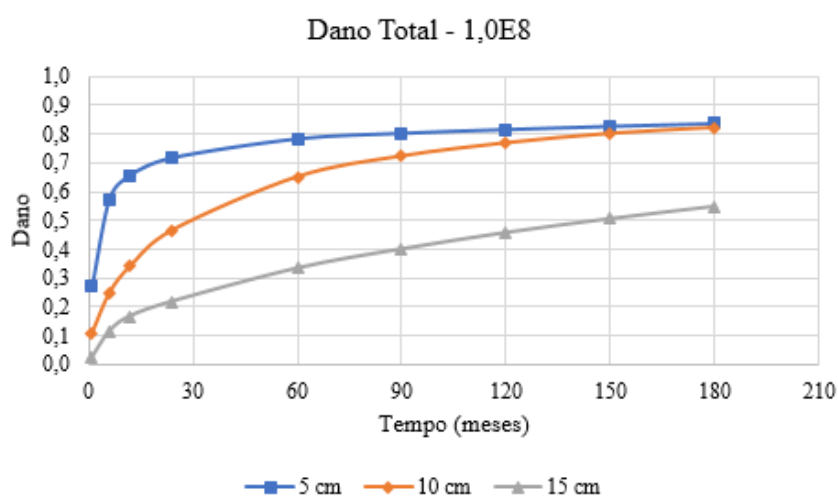
4.3 3ª BATERIA DE ANÁLISES

Na 3ª Bateria, conforme já discutido na metodologia, foi simulada a estrutura da Av. Hélio Basso com uma camada de revestimento de 5, 10 e 15 cm de espessura, tráfego de $N = 10^8$ solicitações e temperatura constante de 25 °C.

4.3.1 Comparação de dano para as diferentes espessuras de revestimento

A partir das simulações com a estrutura de pavimento da Av. Hélyvio Basso, variando apenas a espessura da camada de revestimento e mantendo a temperatura constante em 25 °C, foi obtido o resultado mostrado na Figura 105.

Figura 105 - Dano total para Av. Hélyvio Basso com $N = 1,0E8$ em 180 meses



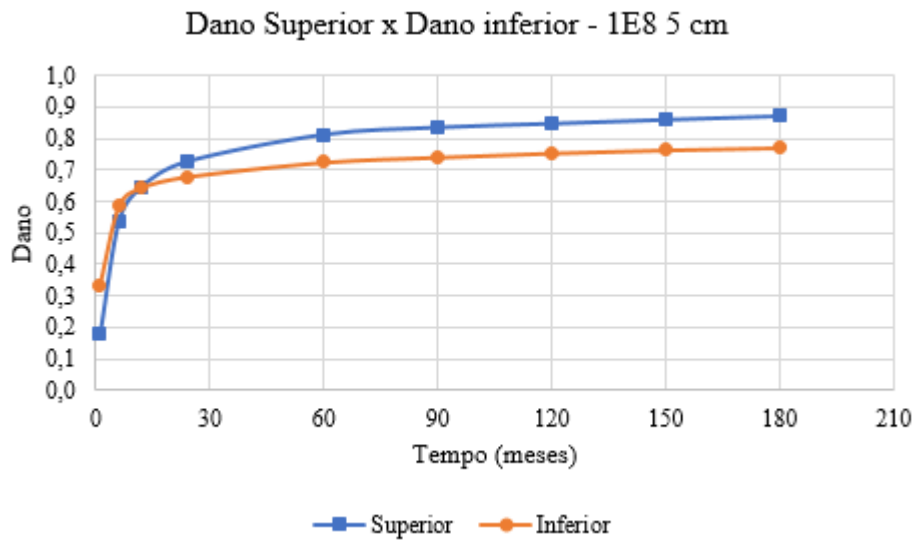
Fonte: Autor

Analisando os resultados, vê-se que o dano ao longo de toda a camada asfáltica decresceu ao o aumento da espessura dessa camada. Contudo, é visível que, ao final dos 180 meses, o dano para 5 cm e 10 cm de revestimento foi praticamente o mesmo, com redução da ordem de apenas 2% para um acréscimo de 5 cm de concreto asfáltico.

4.3.2 Tipo de fissuração

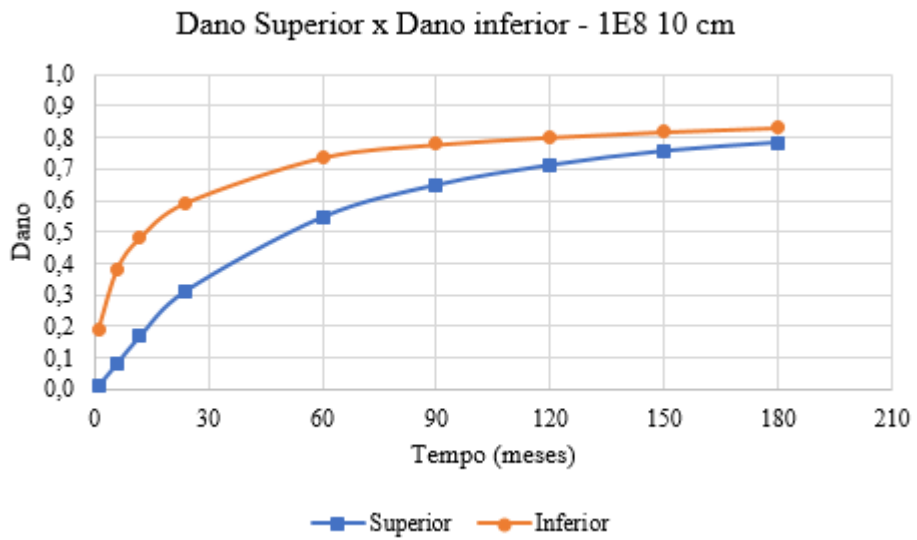
Analisando a evolução do dano na metade superior e na metade inferior do revestimento asfáltico para cada espessura, obtiveram-se os resultados expressos na Figura 106 à Figura 108.

Figura 106 - Dano superior e dano inferior para revestimento de 5 cm



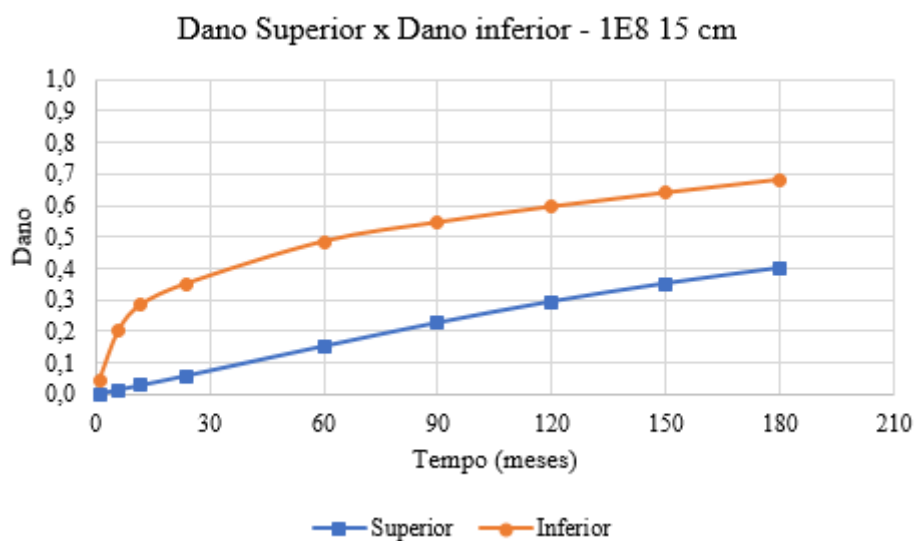
Fonte: Autor

Figura 107 - Dano superior e dano inferior para revestimento de 10 cm



Fonte: Autor

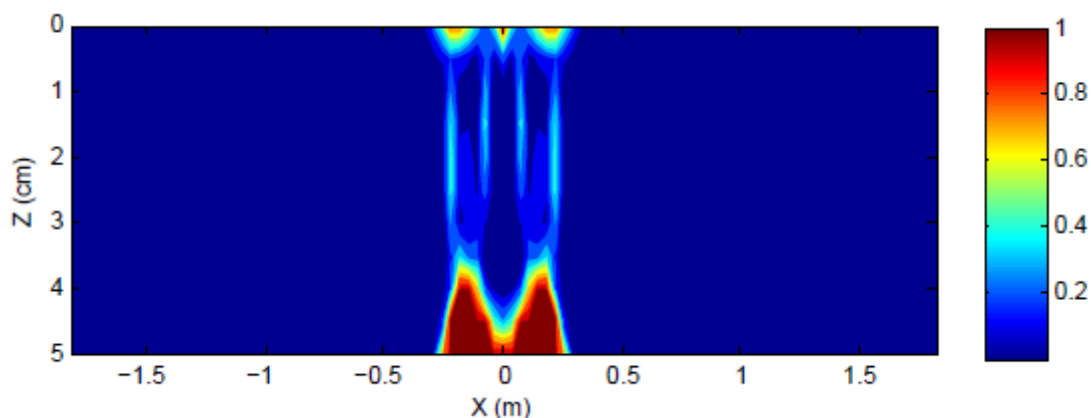
Figura 108 - Dano superior e dano inferior para revestimento de 15 cm



Fonte: Autor

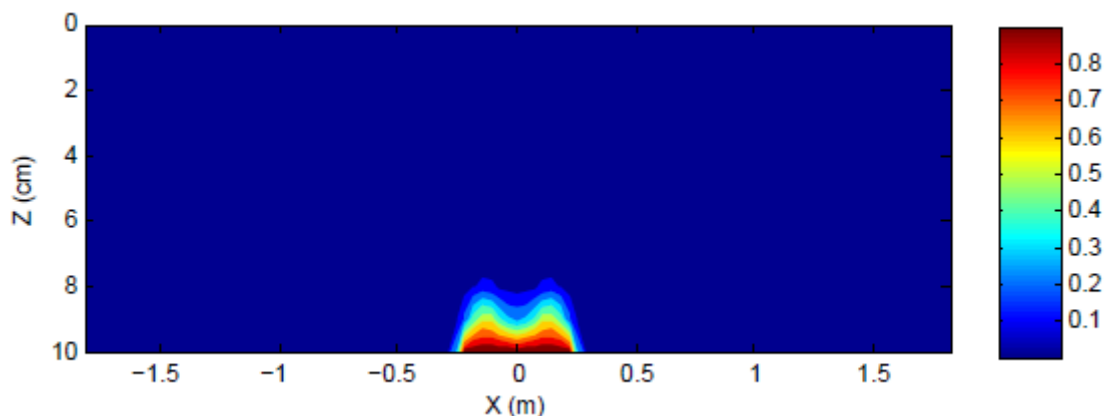
A evolução do dano para cada caso mostra que, apesar da inversão que ocorreu no pavimento com 5 cm de revestimento perto dos 12 meses, todos os casos apresentaram dano maior na metade inferior do revestimento nos primeiros meses, o que configura uma fissuração do tipo *bottom-up*, conforme mostrado nas seguintes figuras.

Figura 109 - Gráfico de dano para 5 cm de revestimento no 1º mês



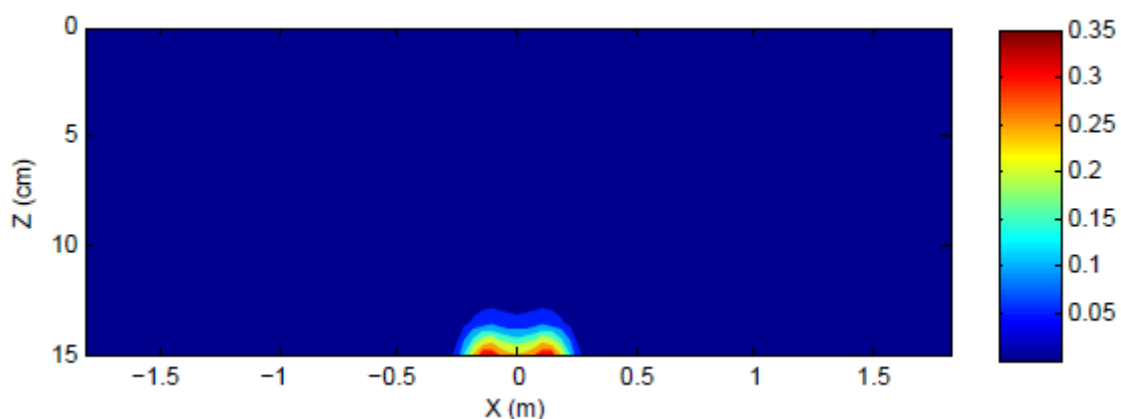
Fonte: Autor

Figura 110 - Gráfico de dano para 10 cm de revestimento no 1º mês



Fonte: Autor

Figura 111 - Gráfico de dano para 15 cm de revestimento no 1º mês



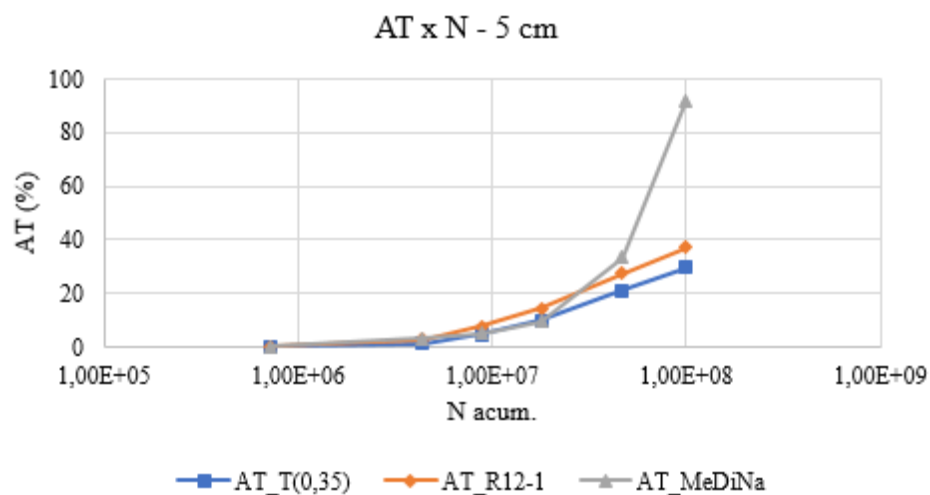
Fonte: Autor

Tal tipo de fissuração é, como já comentado anteriormente, resultado dos esforços de tração gerados pela flexão quando da passagem de veículos.

4.3.3 Área trincada

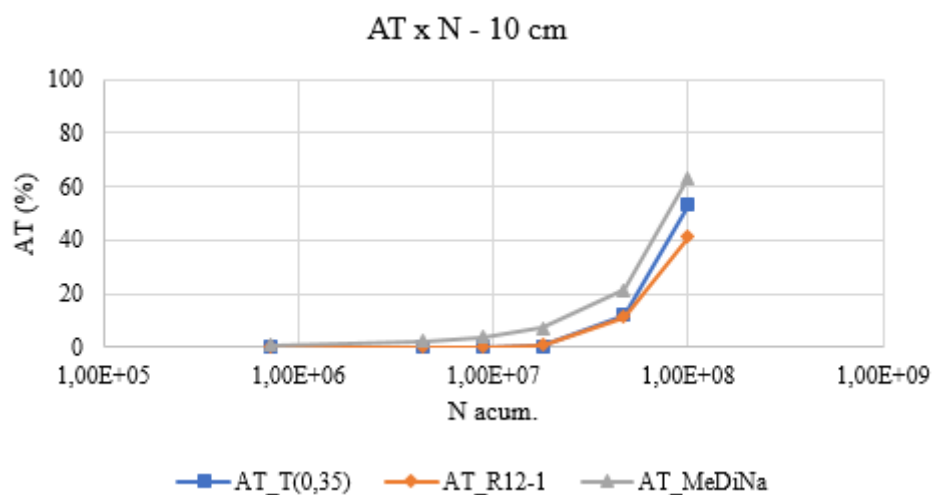
Foram aplicadas, assim como no caso das baterias anteriores, as funções de transferência de Nascimento (2015) e, além disso, foi obtida a AT pelo MeDiNa (Figura 112 à Figura 114).

Figura 112 - AT para revestimento de 5 cm



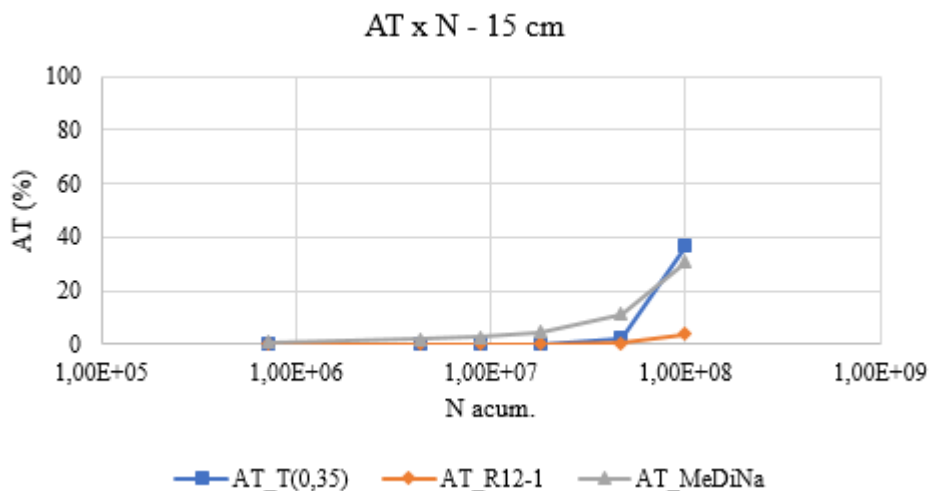
Fonte: Autor

Figura 113 - AT para revestimento de 10 cm



Fonte: Autor

Figura 114 - AT para revestimento de 15 cm



Fonte: Autor

Seguem algumas possíveis explicações para as diferenças entre os resultados obtidos com o MeDiNa e com o LVECD:

- Condições de aderência: no caso do MeDiNa, considera-se condição de não-aderência quando há camada asfáltica sobre camada granular ou camada granular sobre granular. Já no LVECD, é considerada a aderência entre camadas;
- Consideração das propriedades LVE: como foi mostrado na 1ª bateria de análises, quando a variação do tráfego ao longo do dia e a variação diária da temperatura são consideradas em conjunto, ocorre uma compensação, pois as maiores frequências ocorrem nas horas do dia em que a temperatura é mais elevada;
- Diferentes protocolos de ensaio: como já abordado na revisão, o LVECD é alimentado com o ensaio uniaxial de fadiga à tração-compressão, ao passo que o MeDiNa utiliza os resultados do ensaio de tração diametral. Essa diferença metodológica, somada com os ajustes feitos para passar a curva de fadiga obtida por Rossato (2015) para a curva de fadiga do MeDiNa podem estar colaborando para as diferenças.

4.3.4 Cálculo do tráfego

Considerando o valor de 30% de AT como critério de falha por fadiga (que é o critério utilizado no MeDiNa), foi obtido o número N de solicitações para o pavimento a partir das funções de transferência de Nascimento (2015) e da análise de camadas do MeDiNa.

Além disso, foi calculado o número N a partir do método de dimensionamento do DNER, conforme descrito na seção da metodologia.

O resumo dos resultados está no Quadro 21.

Quadro 21 - Número N obtido para diferentes métodos de análise de pavimentos

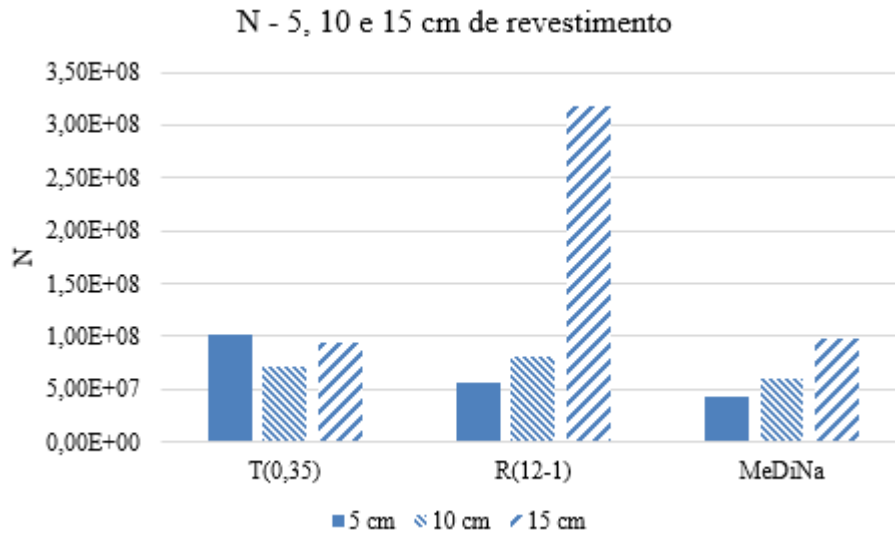
Esp. Rev. (cm)	T(0,35)	R(12-1)	MeDiNa	DNER
5	1,01E8	5,60E7	4,37E7	1,90E8
10	7,11E7	8,01E7	5,97E7	4,47E9
15	9,46E7	3,18E8	9,78E7	6,93E10

Fonte: Autor

Os maiores valores, para as 3 espessuras de revestimento adotadas, sempre foram obtidos pelo método do DNER. Conforme já citado, tal método não leva em conta as propriedades relacionadas à resiliência dos materiais e, portanto, a fadiga não é considerada. Essa é uma possível explicação para os maiores valores de tráfego resultantes desse método.

Na Figura 115, estão plotados os resultados dos demais métodos.

Figura 115 - Número N obtido pela AT a partir do LVECD e MeDiNa



Fonte: Autor

Algumas observações podem ser feitas a partir do gráfico acima:

- Os resultados para o pavimento com 5 cm de espessura de revestimento, combinados com a pequena diferença de dano entre as simulações com 5 e 10 cm indicadas na Figura 105 indicam que o LVECD pode não ter simulado de maneira adequada o comportamento do pavimento quando da utilização de camada de revestimento mais esbelta;
- O N obtido pela função de transferência do $T_{0,35}$ apresentou um valor mínimo para 10 cm de revestimento asfáltico. Conforme já comentado acerca da 2ª bateria, o uso dessa função para os pavimentos em análise neste trabalho apresentou um comportamento não linear devido à influência do crescimento rápido do dano no valor do parâmetro $T_{0,35}$ (diminuindo-o) e no valor do dano (aumentando-o). Desse modo, ocorre um valor crítico para a AT e, conseqüentemente, para o número N;
- O N calculado pelas demais funções de transferência, tanto a função do R_{12-1} quanto a função de Fritzen (2016), que está na rotina de cálculos do MeDiNa, apresentaram um aumento no tráfego suportado com o aumento da espessura da camada asfáltica, o que é mais razoável;

- O tráfego obtido para a função baseada no R_{12-1} para o revestimento de 15 cm atingiu um valor muito mais elevado que os demais devido ao crescimento menos abrupto do dano no primeiro ano, o que levou a menores valores de R_{12-1} , AT menor e, conseqüentemente, a um maior valor de N.

4.3.5 Orçamento

Conforme explicitado na seção de metodologia, foi utilizada a planilha de Silva (2019) para a realização dos orçamentos com dados do SICRO de outubro de 2018 para o estado do Rio Grande do Sul e da ANP de fevereiro de 2019.

No Quadro 22, está o resultado para o orçamento da Av. Hélvio Basso com revestimento de 5, 10 e 15 cm de espessura.

Quadro 22 - Orçamentos para trecho monitorado da Av. Hélvio Basso com revestimento de 5, 10 e 15 cm

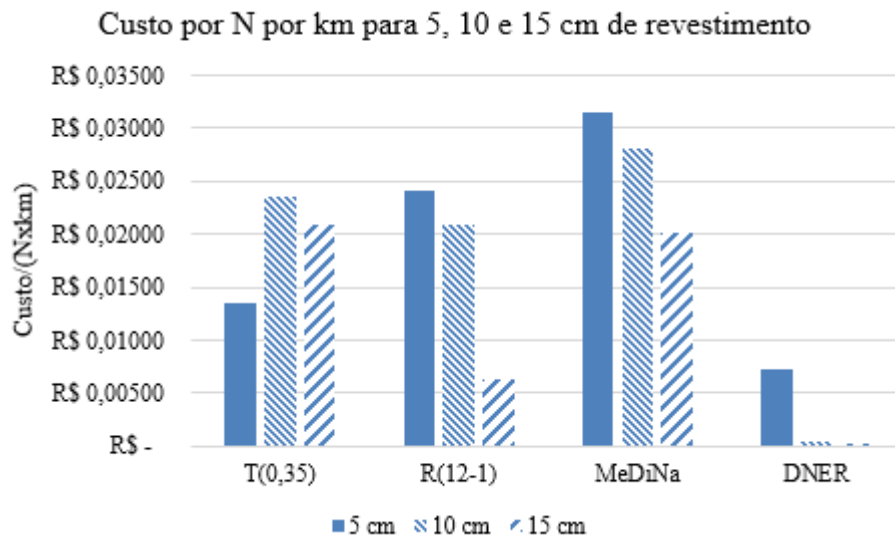
Espessura Rev. (cm)	Orçamento
5	R\$ 413.489,42
10	R\$ 502.637,71
15	R\$ 591.785,99

Fonte: Autor

4.3.6 Análise econômica comparativa

Para obter, finalmente, os valores de R\$/N para quilômetro de rodovia, foram divididos os valores de N obtidos para cada método pelo respectivo orçamento (Figura 116)

Figura 116 - Comparação de custo por passagem de eixo-padrão para os diferentes métodos de análise



Fonte: Autor

Com esses dados em mãos, pode-se inferir que:

- Os métodos que consideram a fadiga apresentaram um custo maior por passagem do eixo-padrão que o custo obtido pelo método do DNER. Apesar da aparente vantagem na utilização desse método, olhando por esse prisma, vale ressaltar que o dano por fadiga, juntamente com as deformações plásticas, são as principais patologias observadas em pavimentos brasileiros. Portanto, trata-se de uma vantagem que pode ser apenas ilusória;
- O MeDiNa forneceu os maiores valores de custo por tráfego. Essa diferença pode estar relacionada, como já discutido, com as diferenças entre o protocolo de ensaio de fadiga que alimenta o LVECD e o MeDiNa, além das diferenças entre as hipóteses de cálculo entre ambos.

5 CONCLUSÕES

O propósito deste trabalho foi o de investigar, utilizando diferentes considerações de temperatura, qual o efeito que as mesmas têm sobre o dano em pavimentos asfálticos calculado pelo protocolo S-VECD.

Como ferramentas para alcançar esse intuito, foi utilizado o *software* LVECD, que realizou as simulações com as diferentes hipóteses de temperatura, diferentes estruturas de pavimento e com diferentes tráfegos. Ainda, também foi obtida a porcentagem de área trincada através de funções de transferência e, por fim, foi averiguado o efeito que essas metodologias têm no custo do pavimento.

Para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, foram realizadas diversas simulações no LVECD e posterior aplicação das funções de transferência de Nascimento (2015). A partir das análises comparativas feitas, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- Para as condições simuladas, percebeu-se que a hipótese de temperatura com variação diária, sazonal e ao longo da profundidade gerou menos dano por fadiga do que a hipótese com temperatura constante de 25 °C ao longo de todo o ano;
- No caso da Av. Hélvio Basso, a AT obtida pelo MeDiNa e considerando temperatura constante de 25°C ao longo do ano foram aquelas que mais se aproximaram da AT observada em campo e a AT que mais considerou as variações de temperatura ao longo da profundidade do pavimento e do tempo foi a que mais divergiu das observações;
- A análise de sensibilidade revelou uma relação sempre inversa entre temperatura e dano por fadiga para os casos analisados. Quanto à área trincada, a escolha da função de transferência utilizada deve ser feita com cautela, pois as 2 funções analisadas se aplicam melhor a casos diferentes de evolução do dano. No caso estudado, a função baseada no R_{12-1} foi a que melhor se ajustou para a Av. Hélvio Basso e a BR-158 apresentou resultados mais razoáveis para a função do $T_{0,35}$;
- A análise econômica comparativa para o escopo desse trabalho resultou em custos mais maiores por N para o dimensionamento com o MeDiNa, seguidos dos resultados obtidos com o LVECD e, por último, com o método de

dimensionamento do DNER baseado no CBR. Com isso, ficou evidente o quanto o método do DNER subestima a danificação no pavimento em relação aos outros dois métodos e o quanto as diferenças entre os pressupostos da análise do LVECD e do MeDiNa se refletem em termos econômicos.

De forma resumida, a investigação realizada por meio deste trabalho revelou que a análise viscoelástica traz diversos impactos na análise de pavimentos. Isso se dá não somente no estudo das propriedades mecânicas e na danificação por fadiga, mas, em termos mais práticos, no custo mesmo do pavimento.

Apesar de não trazer ainda as ferramentas de análise LVE, o MeDiNa já apresenta um avanço considerável em relação ao empirismo presente no método do CBR. Conforme apresentado, os resultados simulados de AT se ajustaram melhor às observações que aqueles obtidos pelo LVECD. Com isso, ressalta-se a necessidade de manter a monitoração de trechos experimentais pelos grupos de estudo voltados para pavimentação nos centros de ensino do país e, também, do desenvolvimento de funções de transferência que descrevam mais acuradamente a AT, ainda que desenvolvidas de forma mais específica para uma região com clima e materiais de construção específicos.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista os temas que foram estudados ao longo desta pesquisa e as diversas possibilidades observadas, são feitas as seguintes sugestões:

- a) Implementar monitoramento de temperaturas em trecho experimental na região central do Rio Grande do Sul;
- b) Realizar simulações no LVECD com dados de temperatura coletados de hora em hora durante pelo menos um ano na região de Santa Maria;
- c) Elaborar uma função de transferência de dano para porcentagem de área trincada para a região de Santa Maria;
- d) Simular no LVECD o comportamento de pavimentos com outros tipos de materiais asfálticos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO Guide for Design of Pavement Structures**. Washington. 1993.

_____. AASHTO TP 107-18. **Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test**. Washington. 2018.

ALBERT, W. A. J. **Über Treibseile am Harz**. Archiv für Mineralogie, Geognosie. Bergbau und Hiittenkunde 10, p. 215-234. 1837.

ALI, H.; LOPEZ, A. Statistical analysis of temperature and moisture effects on pavement structural properties based on seasonal monitoring data. **Transportation Research Record** 1540, p. 48–55. 1996.

ALKASAWNEH, W.; PAN, E.; HAN, F.; ZHU, R.; GREEN, R. Effect of temperature variation on pavement responses using 3D multilayered elastic analysis. **International journal of Pavement**, Engenharia, p. 203 – 212. 2007.

ANDERSON, D. A.; CHRISTENSEN, D. W.; BAHIA, H. U.; DONGRE, R.; SHARMA, M. G.; ANTLE, C. E.; BUTTON, J. **Binder Characterization and Evaluation**. SHRP-A-369. Washington. 1994.

AYRES JR., M. **Development of a rational probabilistic approach for flexible pavement analysis**. Ph.D. Dissertation, University of Maryland, College Park, E.U.A. 1997.

BAAJ, H.; DI BENEDETTO, H.; CHAVEROT, P. Effect of Binder Characteristics on Fatigue of Asphalt Pavement Using an Intrinsic Damage Approach, **Road Materials and Pavement Design**, 6:2, p.147-174. 2005.

BABADOPULOS, L. F. de A. L.; SAUZÉAT, C.; DI BENEDETTO, H. Softening and local self-heating of bituminous mixtures during cyclic loading, **Road Materials and Pavement Design**. DOI: 10.1080/14680629.2017.1304260. 2017.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. 1. ed, 3ª reimpressão. São Paulo: Oficina de textos. 2007.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa**, 7. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2014.

BERNUCCI, L.B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, Petrobras: ABEDA, 2008.

BLASS, L. **Modelagem matemática de respostas estruturais em pavimentos flexíveis considerando a variação sazonal de temperatura**. Dissertação (Mestrado em Modelagem

Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS, 2011.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados**. Tese de doutorado – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

BURMISTER, D. M. **The Theory of Stresses and Displacements in Layered System and Applications to Design of Airport Runways**. Proceedings, Highway Research Board, Vol. 23, p. 126-149. 1943.

BURMISTER, D. M. The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. **Journal of Applied Physics**, Vol. 16, No. 2, p. 89-96; No. 3, p. 126-127; No. 5, p. 296-302. 1945

CHEBAB, G.; KIM, Y. R.; SCHAPERLY, R.; WITCZAK, M. W.; BONAQUIST, R. Time-temperature superposition principle for asphalt concrete with growing damage in tension state. **Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists – Proceedings of the Technical Sessions 71**, p. 559-593. 2002.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018. Relatório Gerencial**. Brasília. 2018.

COREE, B.; CEYLAN, H.; HARRINGTON, D. Implementing the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: Implementation Plan. **InTrans Project Reports**. 51. 2005.

DANIEL, J. S. e KIM, Y. R. **Development of a Simplified Fatigue Test and Analysis Procedure Using a Viscoelastic Continuum Damage Model**. Journal of Association of Asphalt Paving Technologists, AAPT, v. 71, p. 619–650. 2002.

DARABI, M. K.; AL-HUB, R. K. A.; MASAD, E. A.; LITTLE, D. N. Constitutive Modeling of Fatigue Damage Response of Asphaltic Concrete Materials. **Transportation Research Record 2373**. p. 11-21. 2013.

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Manual de Pavimentação**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ. 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Projeto Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia do Tipo C.R.E.M.A. 2ª ETAPA**. Rodovia: BR-392. Trecho: Porto Novo (Rio Grande) – Entr. BR-472 (Fronteira Brasil/Argentina). Subtrecho: Entr. BR-290 – Entr. BR-158(A) / 287(A)(Santa Maria). Rio de Janeiro, RJ. 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de custos de infraestrutura de transportes. Vol. 1 – Metodologia e Conceitos.** Rio de Janeiro, RJ. 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga à tensão controlada.** DNIT 183/2018 – ME. Rio de Janeiro, RJ. 2018a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico.** DNIT xxx/2018 – ME. Rio de Janeiro, RJ. 2018b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Relatório Analítico de Composição de Custos – Rio Grande do Sul – Outubro/2018.** Rio de Janeiro, RJ. 2018c.

ESLAMINIA, M., THIRUNAVUKKARASU, S., GUDDATI, M. N., KIM, Y. R. **Accelerated pavement performance modeling using layered viscoelastic analysis.** In: 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements, p. 497-506, 2012.

FACCIN, C. **Concretos asfálticos em utilização no rio grande do sul: comportamento mecânico e desempenho em campo quanto à deformação permanente** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2018

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

FRITZEN, M. A. **Desenvolvimento e Validação de Função de Transferência para Previsão do Dano por Fadiga em Pavimentos Asfálticos.** Tese de Doutorado – COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2016.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Física. v. 2.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2003.

HELLMANN, L. **Determinação de propriedades térmicas de materiais de pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, RS. 2008.

HOU, T., **Fatigue Performance Prediction of North Carolina Mixtures Using Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model.** Ms.C. thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC. 2009.

HUBER, G. A. **Weather Database for the SUPERPAVE Mix Design System.** SHRP-A-648A. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, D.C. 1994.

HVEEM, F.N., **Pavement Deflections and Fatigue Failures, Highway Research Board,** Washington, D.C., bul. 114, p. 43-87. 1955.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. <https://portaldemapas.ibge.gov.br/portal.php#mapa784>. Acesso em 21 fev. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. <http://www.inmet.gov.br/>. Acesso em 21 fev. 2019.

JANOO, V.; BERG, R. Layer Moduli Determination during freeze-thaw periods. **Transportation Research Record 1377**, p. 26-35. 1991.

KILLP, R. **Desenvolvimento de Modelos para Previsão de Temperatura em Pavimentos Flexíveis**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, RS. 2004.

KIM, Y. R. **“Modeling of Asphalt Concrete”**. ASCE Press, Vol. 1, pp. 163-200. 2009.

KIM, Y. R.; LITTLE, D. N. One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete. In: **ASCE Journal of Engineering Mechanics**, Vol. 116, No. 4, p. 751-772. 1990.

KIM, Y. R.; LITTLE, D. N.; LYTTON, R. L. “Fatigue and Healing Characterization of Asphalt Mixtures.” **ASCE Journal of Materials in Civil Engineering**, Vol. 15 (1), p. 75-83. 2003.

KIM, Y. R.; KHOSLA, N. P.; KIM, N. Effect of temperature and mixture variables on fatigue life predicted by diametral fatigue testing. **Transportation Research Record 1317**. Washington D.C., USA. p. 128-138. 1991

LEE, H. J.; KIM, Y. R. A. Uniaxial Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading. In: **ASCE Journal of Engineering Mechanics**, Vol. 124, No. 1, pp. 32-40. 1998.

LI, Q.; XIAO, D. X.; WANG, K. C. P.; HALL, K. D.; QIU, Y. Mechanistic-empirical pavement design guide (MEPDG): a bird’s eye view. **Journal of Modern Transportation** vol. 19. p. 114-133. 2011

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

MARQUES, G. L. de O. **Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratória**. Tese de Doutorado – COPPE (UFRJ). Rio de Janeiro, RJ. 2004.

MATIC, B.; TEPIC, J.; SREMAC, S.; RADONJANIN, V.; MATIC, D.; JOVANOVIĆ, P. Development and evaluation of the model for the surface pavement temperature prediction. **Metalurgija** 51. p. 329-332. 2012.

MEDINA, J. de. **Mecânica dos pavimentos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ. 1997.

MINHOTO, M. J. C.; PAIS, J. C.; PEREIRA, P. A. A.; PICADO-SANTOS, L. G. The influence of temperature variation in the prediction of the pavement overlay life. **Road Materials and Pavement Design** 6(3). p. 365-384. 2005.

MINHOTO, M. J. C.; PAIS, J. C.; PEREIRA, P. A. A. Asphalt Pavement Temperature Prediction. **Asphalt Rubber 2006 Conference**. 2006

MOTTA, L. M. G. **Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis: critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 1991.

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

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Summary report on fatigue response of asphalt mixtures**. TM-UCB-A-003A-89-3. Berkeley, USA. 1990.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures**. Final Report, NCHRP 1-37A, ARA, In. and ERES Consultants Division. 2004a.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. Laboratory determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. **National Cooperative Highway Research Program**, Transportation Research Board, n. 285. USA, 2004b.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary. **National Cooperative Highway Research Program**, Transportation Research Board. NCHRP Report 673. Washington, D.C., USA. 2011.

NGUYEN, M. L. **Etude de la fissuration et la fatigue des enrobés bitumeux**. Tese de Doutorado. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2009.

OLARD, F.; DI BENEDETTO, H. General “2S2P1D” Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. **Road Materials and Pavement Design**, 4:2, 185-224, DOI: 10.1080/14680629.2003.9689946. 2003.

ONGEL, A.; HARVEY, J. **Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures using the Enhanced Integrated Climate Model (EICM)**. Pavement Research Centre, University of California, Davis. 2004.

PAGLIOSA, C. **Determinação experimental de propriedades viscoelásticas de material polimérico**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2004.

PARK, H. J.; KIM, Y. R. Investigation into Top-Down Cracking of Asphalt Pavements in North Carolina. **Transportation Research Record 2368**. p. 45-55. 2013.

PREVITERA FILHO, J. **Efeito da temperatura na deformabilidade dos pavimentos asfálticos**. Dissertação de mestrado – COPPE, UFRJ. Rio de Janeiro/RJ. 1974.

REESE, R. Properties of Aged Asphalt Binder Related to Asphalt Concrete Fatigue Life. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, AAPT, vol. 66, p. 604-632. 1997.

ROSSATO, F. P. **Avaliação do fenômeno de fadiga e das propriedades elásticas com diferentes ligantes em variadas temperaturas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2015.

ROYLANCE, D. **Engineering Viscoelasticity**. Department of Materials Science and Engineering. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA 02139. 2001.

SABOURI, M. A.; KIM, Y. R. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading. **Transportation Research Record 2447**. p. 117–125. <https://doi.org/10.3141/2447-13>. 2014.

SANTOS, C. R. G. **Avaliação da influência do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. 2005.

SANTOS, M. S. **Desenvolvimento de modelo de previsão de desempenho a partir da implantação de trechos monitorados na região de Santa Maria – RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2015.

SCHAPERY, R. A. On viscoelastic deformation and failure behavior of composite materials with distributed flaws. *Advances in Aerospace Structures and Materials*, **Aerospace Structures and Materials**, 01, S. S. Wang and W. J. Renton, eds., 5-20. 1981.

SCHAPERY, R. A. Correspondence principles and a generalized J integral for large deformation and fracture analysis of viscoelastic media. **International Journal of Fracture**, Vol.25, No.3, p. 195-223. 1984.

SCHAPERY, R. A. A theory of mechanical behavior of elastic media with growing damage and other changes in structure. **J. Mech. Phys. Solids**, Vol. 38, p. 215-253. 1990.

SCHUSTER, S. L. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas asfálticas aplicadas em campo por meio da teoria viscoelástica de dano contínuo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2018.

SCHÜTZ, W. A history of fatigue. **Engineering Fracture Mechanics**. No 2. p. 263-300. 1996.

SHAN, L.; TAN, Y.; UNDERWOOD, S.; KIM, Y. R. Application of Thixotropy to Analyze Fatigue and Healing Characteristics of Asphalt Binder. **Transportation Research Record 2179**. p. 85–92. <https://doi.org/10.3141/217910>. 2010.

SILVA, L. E. D. **Estudo comparativo técnico-econômico entre métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos novos: método do DNER e método de dimensionamento nacional**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2019.

SOUSA, J. B.; PAIS, J. C.; WAY, G. B. A Mechanistic-Empirical Based Overlay Design Method for Reflective Cracking. **Road Materials and Pavement Design** 6. DOI: 10.1080/14680629.2005.9690011. 2002.

SOUTHGATE, H. B.; DEEN, R. C. Temperature Distribution Within Asphalt Pavements and its Relationship to Pavement Deflection. **Kentucky Transportation Center Research Report**. Disponível em: https://uknowledge.uky.edu/ktc_researchreports/1050. 1968.

SOUZA, M. L. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. 3ª ed. DNIT, IPR (IPR Publ. 667). Rio de Janeiro, RJ. 1981.

SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus**. 2004. 279f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 2004.

TAPSOBA, N. **Comportement des enrobés bitumineux à base de matériaux recyclés et/ou fabriqués à température réduite** Tese de doutorado. École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) de l'Université de Lyon (UdL), Vaulx-en-Velin. 2011.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros, v. 1: Mecânica, Oscilações e Ondas, Termodinâmica**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2009.

TRAMONTINI, R. **Modelagem Matemática da Transferência de Calor em Pavimentos Rígidos e Flexíveis**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) - Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Ijuí, RS. 2007.

ULLIDTZ, P. **Pavement Analysis**. The Technical University of Denmark. Amsterdam; Oxford; New-York: Elsevier. 1987.

UNDERWOOD, B. S., KIM, Y. R., GUDDATI N. M., **Improved calculation method of damage parameter in viscoelastic continuum damage model**. International Journal of Pavement Engineering, 11:6, 459-476, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10298430903398088>. 2010.

UNDERWOOD, B. S. **Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete**. Tese (Doutorado), North Carolina State University – Raleigh, North Carolina. 2011.

UNDERWOOD, B., BAEK, C., & KIM, Y. R., **Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis**. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2296, 36–45. <https://doi.org/10.3141/229604>. 2012.

WILLIAMS, M. L., LANDEL, R. F., & FERRY, J. D. **The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids**. Journal of the American Chemical Society, 77(14), 3701–3707. <https://doi.org/10.1021/ja01619a008>. 1955.

WITCZAK, M. W. **The universal airport pavement design system, report II: asphalt mixture material characterization**. University of Maryland. 1989.

WITCZAK, M. W.; KALOUSH, K.; PELLINEN, T. Simple performance test for superpave mix design. **NCHRP Report 465**. National Research Council, Transportation Research Board. Washington, D.C. 2002.

WÖHLER, A. Über die Festigkeitsversuche mit Eisen und Stahl. **Zeitschrift für Bauwesen**, 20, p. 73-106. 1870.

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

WOLFE, R. K.; RANDOLPH, B. W.; COLONY, D. C. Standardized Elastic Moduli of Pavement Layers for Overlay Design. **Journal of Transportation Engineering** v. 121 No 2. p. 221-232. 1995.

ZHANG, J. **Development of Failure Criteria for Asphalt Concrete Mixtures under Fatigue Loading**. Master Thesis, North Carolina State University, Raleigh, NC. 2012.

APÊNDICE A – INPUTS CLIMÁTICOS

(continua)

HIPÓTESE Var DAP - TEMPERATURAS (°C)						
Data/Prof. (cm)	0,00	3,00	6,00	9,00	12,00	15,00
JANEIRO						
01/01/2000 00:00	35,32	36,36	34,64	33,23	32,06	29,97
01/01/2000 01:00	35,35	36,20	34,37	32,95	31,80	29,76
01/01/2000 02:00	35,25	36,08	34,21	32,76	31,61	29,62
01/01/2000 03:00	35,28	36,00	34,08	32,62	31,47	29,48
01/01/2000 04:00	35,28	35,97	34,00	32,53	31,38	29,37
01/01/2000 05:00	35,46	36,01	33,99	32,46	31,28	29,28
01/01/2000 06:00	38,26	37,34	34,47	32,61	31,27	29,23
01/01/2000 07:00	43,13	40,33	36,10	33,45	31,67	29,36
01/01/2000 08:00	49,84	44,86	38,83	35,06	32,53	29,76
01/01/2000 09:00	56,49	50,14	42,38	37,34	33,94	30,47
01/01/2000 10:00	61,14	54,37	45,68	39,75	35,52	31,38
01/01/2000 11:00	64,27	57,60	48,44	41,88	37,04	32,28
01/01/2000 12:00	65,65	59,59	50,40	43,54	38,32	33,07
01/01/2000 13:00	65,50	60,20	51,40	44,60	39,20	33,70
01/01/2000 14:00	69,10	63,20	53,80	46,50	41,40	35,50
01/01/2000 15:00	66,40	61,20	54,90	48,40	43,30	37,10
01/01/2000 16:00	62,40	58,50	54,20	49,00	44,30	38,90
01/01/2000 17:00	57,13	55,02	52,06	47,76	43,65	38,66
01/01/2000 18:00	50,62	50,52	49,11	45,92	42,57	38,14
01/01/2000 19:00	43,17	45,23	45,41	43,48	41,06	37,35
01/01/2000 20:00	39,88	41,43	42,00	40,89	39,31	36,35
01/01/2000 21:00	38,76	39,62	39,96	39,05	37,88	35,44
01/01/2000 22:00	37,89	38,44	38,63	37,83	36,88	34,80
01/01/2000 23:00	37,67	37,83	37,84	37,03	36,20	34,32
FEVEREIRO						
01/02/2000 00:00	39,69	40,06	38,43	35,59	34,10	30,14
01/02/2000 01:00	39,52	39,83	38,18	35,37	33,89	29,98
01/02/2000 02:00	39,33	39,65	38,00	35,18	33,73	29,87
01/02/2000 03:00	38,96	39,34	37,76	34,99	33,57	29,75
01/02/2000 04:00	39,02	39,27	37,60	34,85	33,42	29,62
01/02/2000 05:00	39,00	39,23	37,53	34,74	33,30	29,52
01/02/2000 06:00	40,60	39,78	37,64	34,72	33,23	29,43
01/02/2000 07:00	46,40	43,07	39,26	35,43	33,49	29,50
01/02/2000 08:00	53,27	47,89	42,21	37,08	34,38	29,87
01/02/2000 09:00	59,17	52,65	45,60	39,27	35,73	30,53
01/02/2000 10:00	63,18	56,55	48,75	41,50	37,22	31,34
01/02/2000 11:00	65,80	59,15	51,09	43,35	38,57	32,12
01/02/2000 12:00	67,15	61,00	52,90	44,82	39,70	32,78

(continuação)

01/02/2000 13:00	67,40	61,70	53,90	45,80	40,50	33,30
01/02/2000 14:00	72,70	65,40	57,10	48,70	43,10	34,70
01/02/2000 15:00	69,20	63,20	57,80	50,80	45,00	36,10
01/02/2000 16:00	63,30	58,40	56,00	51,40	46,00	37,60
01/02/2000 17:00	58,27	55,34	54,07	50,28	45,45	37,40
01/02/2000 18:00	51,49	50,80	51,08	48,42	44,41	36,93
01/02/2000 19:00	44,65	45,63	47,24	45,88	42,89	36,20
01/02/2000 20:00	42,04	42,53	44,24	43,44	41,17	35,30
01/02/2000 21:00	41,31	41,08	42,42	41,75	39,84	34,52
01/02/2000 22:00	40,83	40,26	41,38	40,71	38,98	33,97
01/02/2000 23:00	40,62	39,76	40,73	40,04	38,41	33,61
MARÇO						
01/03/2000 00:00	35,82	36,04	34,02	30,71	28,86	27,16
01/03/2000 01:00	35,71	35,79	33,68	30,43	28,62	26,99
01/03/2000 02:00	35,49	35,56	33,45	30,22	28,45	26,84
01/03/2000 03:00	35,26	35,33	33,26	30,06	28,31	26,72
01/03/2000 04:00	35,14	35,16	33,09	29,89	28,17	26,60
01/03/2000 05:00	35,08	35,06	32,95	29,77	28,05	26,51
01/03/2000 06:00	36,03	35,44	33,04	29,75	27,98	26,43
01/03/2000 07:00	40,56	37,73	34,02	30,14	28,08	26,43
01/03/2000 08:00	47,53	42,23	36,56	31,43	28,72	26,70
01/03/2000 09:00	53,93	47,22	39,92	33,46	29,91	27,29
01/03/2000 10:00	58,29	51,23	43,01	35,59	31,30	28,08
01/03/2000 11:00	61,02	54,00	45,47	37,43	32,60	28,87
01/03/2000 12:00	62,75	55,94	47,30	38,87	33,66	29,54
01/03/2000 13:00	63,20	57,00	48,50	39,90	34,50	30,10
01/03/2000 14:00	66,60	59,90	51,70	43,00	36,90	31,80
01/03/2000 15:00	64,00	58,30	52,10	44,90	39,00	33,30
01/03/2000 16:00	60,00	56,00	50,80	45,50	40,80	35,70
01/03/2000 17:00	54,07	52,22	48,55	44,21	40,11	35,42
01/03/2000 18:00	46,68	47,22	45,35	42,21	38,96	34,85
01/03/2000 19:00	42,33	43,00	41,92	39,82	37,43	34,03
01/03/2000 20:00	40,96	40,95	39,78	37,98	36,05	33,21
01/03/2000 21:00	40,25	39,83	38,50	36,77	35,07	32,60
01/03/2000 22:00	39,68	39,06	37,67	36,00	34,45	32,17
01/03/2000 23:00	39,26	38,54	37,09	35,47	33,98	31,84
ABRIL						
01/04/2000 00:00	33,11	32,19	29,97	27,24	25,01	23,87
01/04/2000 01:00	32,71	31,89	29,68	27,01	24,83	23,74
01/04/2000 02:00	32,37	31,59	29,42	26,81	24,69	23,62
01/04/2000 03:00	32,02	31,28	29,17	26,61	24,52	23,51
01/04/2000 04:00	31,86	31,06	28,99	26,44	24,38	23,40
01/04/2000 05:00	31,86	30,98	28,84	26,32	24,28	23,31
01/04/2000 06:00	32,07	31,02	28,81	26,24	24,19	23,23
01/04/2000 07:00	34,32	32,03	29,16	26,34	24,18	23,18

(continuação)

01/04/2000 08:00	39,27	34,86	30,62	27,01	24,46	23,28
01/04/2000 09:00	45,16	38,89	33,06	28,42	25,20	23,63
01/04/2000 10:00	49,99	42,78	35,81	30,18	26,27	24,21
01/04/2000 11:00	53,12	45,65	38,17	31,87	27,40	24,88
01/04/2000 12:00	54,75	47,70	39,99	33,28	28,39	25,50
01/04/2000 13:00	54,50	48,20	40,90	34,20	29,10	26,00
01/04/2000 14:00	57,10	50,20	43,40	36,70	31,50	27,10
01/04/2000 15:00	54,80	49,80	44,50	38,20	32,90	28,60
01/04/2000 16:00	48,50	45,60	43,00	38,00	33,80	29,00
01/04/2000 17:00	43,24	42,24	40,94	36,84	33,19	28,76
01/04/2000 18:00	37,90	38,29	38,16	35,10	32,17	28,27
01/04/2000 19:00	35,91	35,88	35,89	33,37	31,01	27,64
01/04/2000 20:00	35,37	34,81	34,58	32,23	30,12	27,08
01/04/2000 21:00	34,70	34,05	33,76	31,47	29,53	26,71
01/04/2000 22:00	34,26	33,49	33,15	30,93	29,10	26,43
01/04/2000 23:00	33,69	32,96	32,67	30,53	28,76	26,22
MAIO						
01/05/2000 00:00	21,78	22,14	20,97	20,01	18,47	17,33
01/05/2000 01:00	21,35	21,71	20,60	19,67	18,22	17,17
01/05/2000 02:00	20,72	21,18	20,22	19,38	18,00	17,01
01/05/2000 03:00	20,12	20,69	19,82	19,08	17,79	16,86
01/05/2000 04:00	19,83	20,35	19,49	18,80	17,58	16,72
01/05/2000 05:00	19,37	19,96	19,20	18,57	17,41	16,58
01/05/2000 06:00	19,84	20,04	19,10	18,41	17,26	16,46
01/05/2000 07:00	22,05	21,15	19,53	18,55	17,26	16,41
01/05/2000 08:00	27,07	23,82	20,83	19,16	17,50	16,48
01/05/2000 09:00	34,57	28,75	23,62	20,71	18,26	16,83
01/05/2000 10:00	41,01	33,80	27,07	22,92	19,54	17,49
01/05/2000 11:00	44,70	37,56	30,10	25,12	20,96	18,31
01/05/2000 12:00	45,80	39,29	31,96	26,77	22,18	19,04
01/05/2000 13:00	45,80	40,00	33,00	27,80	23,00	19,60
01/05/2000 14:00	48,70	43,30	36,40	30,10	25,00	20,60
01/05/2000 15:00	46,10	42,40	37,10	31,20	26,50	21,80
01/05/2000 16:00	41,50	38,70	35,70	31,20	27,10	22,50
01/05/2000 17:00	34,53	34,36	33,09	29,73	26,35	22,19
01/05/2000 18:00	30,01	30,28	29,94	27,65	25,11	21,58
01/05/2000 19:00	28,78	28,45	28,00	26,04	23,96	20,94
01/05/2000 20:00	27,52	27,16	26,70	24,96	23,13	20,45
01/05/2000 21:00	26,56	26,16	25,75	24,14	22,53	20,08
01/05/2000 22:00	25,58	25,27	24,96	23,51	22,06	19,78
01/05/2000 23:00	24,82	24,52	24,30	23,00	21,66	19,55
JUNHO						
01/06/2000 00:00	18,56	18,43	17,40	15,77	14,53	13,62
01/06/2000 01:00	18,03	17,95	16,98	15,46	14,32	13,48
01/06/2000 02:00	17,59	17,55	16,62	15,19	14,11	13,36

(continuação)

01/06/2000 03:00	16,91	17,04	16,28	14,94	13,94	13,23
01/06/2000 04:00	16,96	16,87	16,02	14,73	13,78	13,11
01/06/2000 05:00	16,90	16,77	15,90	14,59	13,66	13,01
01/06/2000 06:00	17,01	16,76	15,83	14,50	13,57	12,94
01/06/2000 07:00	18,17	17,30	16,02	14,54	13,53	12,89
01/06/2000 08:00	21,61	19,07	16,85	14,91	13,68	12,92
01/06/2000 09:00	27,33	22,55	18,77	15,90	14,16	13,14
01/06/2000 10:00	32,94	26,68	21,44	17,47	15,05	13,58
01/06/2000 11:00	36,82	30,03	23,95	19,18	16,14	14,19
01/06/2000 12:00	38,46	32,12	25,90	20,66	17,15	14,80
01/06/2000 13:00	38,50	32,80	26,90	21,60	17,90	15,30
01/06/2000 14:00	41,30	36,00	29,80	24,30	19,70	16,40
01/06/2000 15:00	39,40	35,70	31,30	25,80	21,20	17,70
01/06/2000 16:00	35,50	33,40	31,10	26,50	22,30	19,00
01/06/2000 17:00	29,58	29,64	28,76	25,21	21,65	18,71
01/06/2000 18:00	26,88	26,75	26,30	23,56	20,67	18,22
01/06/2000 19:00	25,64	25,22	24,77	22,32	19,80	17,72
01/06/2000 20:00	24,64	24,17	23,72	21,46	19,18	17,34
01/06/2000 21:00	23,81	23,32	22,92	20,81	18,71	17,05
01/06/2000 22:00	22,68	22,41	22,18	20,27	18,33	16,81
01/06/2000 23:00	22,09	21,77	21,57	19,79	18,00	16,60
JULHO						
01/07/2000 00:00	22,94	22,11	20,91	18,53	16,72	16,03
01/07/2000 01:00	22,10	21,49	20,45	18,20	16,50	15,89
01/07/2000 02:00	21,69	21,04	20,05	17,91	16,29	15,74
01/07/2000 03:00	21,20	20,62	19,69	17,64	16,11	15,60
01/07/2000 04:00	20,75	20,25	19,40	17,41	15,93	15,49
01/07/2000 05:00	20,19	19,85	19,08	17,19	15,77	15,37
01/07/2000 06:00	20,45	19,79	18,89	17,01	15,62	15,26
01/07/2000 07:00	21,59	20,26	19,04	17,00	15,56	15,18
01/07/2000 08:00	25,76	22,34	19,98	17,38	15,69	15,20
01/07/2000 09:00	32,03	26,24	22,18	18,49	16,22	15,44
01/07/2000 10:00	37,66	30,34	24,98	20,16	17,16	15,93
01/07/2000 11:00	41,33	33,69	27,60	21,93	18,28	16,58
01/07/2000 12:00	42,84	35,56	29,42	23,34	19,27	17,20
01/07/2000 13:00	43,00	36,40	30,50	24,30	20,00	17,70
01/07/2000 14:00	44,10	38,50	32,50	26,40	21,70	18,60
01/07/2000 15:00	42,70	38,50	33,60	28,00	23,10	19,60
01/07/2000 16:00	39,40	36,60	33,20	28,30	24,20	20,50
01/07/2000 17:00	33,63	33,06	31,08	27,14	23,62	20,26
01/07/2000 18:00	30,83	30,14	28,73	25,60	22,70	19,80
01/07/2000 19:00	29,33	28,55	27,23	24,41	21,89	19,34
01/07/2000 20:00	28,44	27,49	26,19	23,54	21,25	18,96
01/07/2000 21:00	27,34	26,52	25,34	22,90	20,76	18,68
01/07/2000 22:00	26,60	25,78	24,67	22,38	20,39	18,45

(continuação)

01/07/2000 23:00	25,53	24,96	24,04	21,90	20,07	18,24
AGOSTO						
01/08/2000 00:00	22,78	21,86	19,82	17,11	16,36	15,38
01/08/2000 01:00	22,52	21,57	19,54	16,91	16,19	15,27
01/08/2000 02:00	22,10	21,24	19,31	16,73	16,06	15,17
01/08/2000 03:00	21,67	20,90	19,06	16,55	15,92	15,08
01/08/2000 04:00	21,29	20,57	18,79	16,37	15,78	14,98
01/08/2000 05:00	20,95	20,27	18,58	16,19	15,65	14,88
01/08/2000 06:00	21,13	20,25	18,45	16,08	15,54	14,79
01/08/2000 07:00	22,98	21,05	18,71	16,13	15,51	14,74
01/08/2000 08:00	27,44	23,49	19,89	16,64	15,73	14,81
01/08/2000 09:00	32,52	26,84	21,85	17,70	16,32	15,09
01/08/2000 10:00	37,24	30,33	24,19	19,09	17,16	15,55
01/08/2000 11:00	40,77	33,45	26,48	20,58	18,15	16,10
01/08/2000 12:00	42,12	35,14	28,07	21,78	19,04	16,66
01/08/2000 13:00	42,30	35,90	29,00	22,60	19,70	17,10
01/08/2000 14:00	44,40	38,40	31,70	25,20	22,00	18,70
01/08/2000 15:00	42,60	38,20	33,60	27,70	24,10	20,00
01/08/2000 16:00	38,80	36,30	33,40	29,70	26,30	21,30
01/08/2000 17:00	34,17	33,25	31,45	28,54	25,65	21,04
01/08/2000 18:00	30,32	30,13	29,15	27,01	24,73	20,60
01/08/2000 19:00	28,86	28,33	27,47	25,67	23,79	20,10
01/08/2000 20:00	27,86	27,20	26,33	24,70	23,07	19,68
01/08/2000 21:00	27,15	26,42	25,54	24,04	22,55	19,39
01/08/2000 22:00	26,50	25,77	24,93	23,52	22,16	19,15
01/08/2000 23:00	26,02	25,25	24,44	23,10	21,85	18,96
SETEMBRO						
01/09/2000 00:00	25,07	25,15	23,15	20,07	19,51	18,44
01/09/2000 01:00	24,62	24,69	22,76	19,76	19,27	18,26
01/09/2000 02:00	24,27	24,33	22,42	19,51	19,05	18,12
01/09/2000 03:00	23,61	23,84	22,09	19,27	18,88	17,99
01/09/2000 04:00	23,58	23,64	21,85	19,07	18,71	17,86
01/09/2000 05:00	23,48	23,50	21,67	18,93	18,57	17,75
01/09/2000 06:00	23,91	23,62	21,66	18,85	18,47	17,65
01/09/2000 07:00	27,99	25,50	22,33	19,05	18,51	17,63
01/09/2000 08:00	35,18	29,90	24,64	20,13	19,01	17,82
01/09/2000 09:00	42,17	35,00	27,84	21,94	20,06	18,34
01/09/2000 10:00	47,40	39,58	31,13	23,99	21,40	19,10
01/09/2000 11:00	50,47	42,63	33,69	25,81	22,72	19,88
01/09/2000 12:00	52,05	44,58	35,52	27,22	23,79	20,56
01/09/2000 13:00	52,40	45,60	36,70	28,20	24,60	21,10
01/09/2000 14:00	53,80	47,80	39,60	31,80	27,50	23,20
01/09/2000 15:00	52,20	47,90	41,80	34,00	29,10	24,60
01/09/2000 16:00	48,90	45,20	41,00	35,50	31,00	26,40
01/09/2000 17:00	42,96	41,43	38,74	34,23	30,34	26,12

(continuação)

01/09/2000 18:00	35,44	36,34	35,47	32,27	29,25	25,60
01/09/2000 19:00	32,55	32,95	32,40	30,07	27,79	24,83
01/09/2000 20:00	30,95	31,06	30,53	28,49	26,64	24,13
01/09/2000 21:00	29,83	29,75	29,23	27,36	25,77	23,59
01/09/2000 22:00	29,10	28,87	28,30	26,56	25,14	23,19
01/09/2000 23:00	28,36	28,12	27,58	25,97	24,67	22,89
OUTUBRO						
01/10/2000 00:00	29,91	30,08	28,73	26,43	23,78	22,18
01/10/2000 01:00	29,52	29,64	28,30	26,07	23,51	21,99
01/10/2000 02:00	29,23	29,35	27,98	25,81	23,29	21,82
01/10/2000 03:00	29,25	29,22	27,80	25,61	23,13	21,69
01/10/2000 04:00	29,28	29,14	27,68	25,47	23,01	21,58
01/10/2000 05:00	29,19	29,08	27,58	25,37	22,91	21,48
01/10/2000 06:00	30,53	29,50	27,68	25,35	22,84	21,41
01/10/2000 07:00	36,66	32,80	29,16	25,97	23,05	21,45
01/10/2000 08:00	44,01	37,68	32,08	27,57	23,84	21,79
01/10/2000 09:00	51,26	43,31	35,87	29,87	25,12	22,45
01/10/2000 10:00	55,83	47,49	39,22	32,23	26,61	23,30
01/10/2000 11:00	58,34	50,40	41,84	34,23	27,97	24,10
01/10/2000 12:00	59,56	51,84	43,43	35,64	29,00	24,79
01/10/2000 13:00	60,70	53,20	44,70	36,70	29,80	25,30
01/10/2000 14:00	63,00	55,40	47,30	39,30	32,30	27,50
01/10/2000 15:00	59,70	54,80	48,30	41,50	34,20	28,80
01/10/2000 16:00	55,40	52,50	48,90	43,00	36,00	30,30
01/10/2000 17:00	49,57	48,75	46,65	41,74	35,40	30,07
01/10/2000 18:00	41,99	43,63	43,28	39,70	34,31	29,57
01/10/2000 19:00	35,47	38,09	39,13	36,98	32,73	28,78
01/10/2000 20:00	33,13	35,09	36,10	34,55	31,09	27,85
01/10/2000 21:00	32,62	33,80	34,44	32,99	29,89	27,12
01/10/2000 22:00	32,23	33,03	33,46	32,03	29,14	26,61
01/10/2000 23:00	31,52	32,29	32,71	31,37	28,64	26,27
NOVEMBRO						
01/11/2000 00:00	36,56	36,74	34,72	30,93	27,21	24,39
01/11/2000 01:00	36,06	36,24	34,28	30,59	26,96	24,20
01/11/2000 02:00	35,91	36,00	33,99	30,31	26,75	24,04
01/11/2000 03:00	35,61	35,70	33,73	30,11	26,58	23,92
01/11/2000 04:00	35,42	35,49	33,52	29,93	26,42	23,80
01/11/2000 05:00	35,58	35,49	33,41	29,79	26,30	23,70
01/11/2000 06:00	38,60	36,79	33,84	29,89	26,27	23,63
01/11/2000 07:00	44,27	40,22	35,66	30,72	26,60	23,73
01/11/2000 08:00	50,80	44,84	38,51	32,31	27,42	24,09
01/11/2000 09:00	56,84	49,42	41,71	34,31	28,55	24,67
01/11/2000 10:00	61,92	53,92	45,04	36,50	29,86	25,38
01/11/2000 11:00	64,56	56,82	47,62	38,39	31,12	26,09
01/11/2000 12:00	66,21	58,57	49,38	39,82	32,12	26,70

(continuação)

01/11/2000 13:00	66,90	59,90	50,70	40,90	32,90	27,20
01/11/2000 14:00	69,10	62,30	53,80	43,90	35,20	30,10
01/11/2000 15:00	65,50	61,30	54,50	46,30	37,60	33,10
01/11/2000 16:00	61,70	58,10	53,50	47,80	39,50	34,60
01/11/2000 17:00	56,52	54,75	51,48	46,67	38,97	34,41
01/11/2000 18:00	50,09	50,28	48,56	44,87	38,04	33,97
01/11/2000 19:00	43,23	45,23	44,99	42,53	36,72	33,27
01/11/2000 20:00	40,32	41,79	41,87	40,16	35,20	32,43
01/11/2000 21:00	38,52	39,68	39,75	38,36	33,95	31,65
01/11/2000 22:00	38,24	38,78	38,56	37,21	33,09	31,08
01/11/2000 23:00	37,72	38,08	37,75	36,45	32,49	30,68
DEZEMBRO						
01/12/2000 00:00	36,64	36,44	34,45	30,56	28,13	27,79
01/12/2000 01:00	36,71	36,35	34,25	30,34	27,93	27,60
01/12/2000 02:00	36,35	36,06	34,04	30,16	27,77	27,48
01/12/2000 03:00	36,50	36,05	33,92	30,02	27,65	27,33
01/12/2000 04:00	36,39	35,91	33,81	29,91	27,54	27,25
01/12/2000 05:00	36,73	36,05	33,82	29,86	27,47	27,14
01/12/2000 06:00	39,91	37,52	34,36	30,03	27,48	27,11
01/12/2000 07:00	45,29	40,72	36,10	30,87	27,84	27,25
01/12/2000 08:00	52,31	45,67	39,11	32,50	28,70	27,67
01/12/2000 09:00	58,00	49,92	42,19	34,46	29,89	28,36
01/12/2000 10:00	63,55	54,71	45,63	36,66	31,26	29,15
01/12/2000 11:00	66,43	57,80	48,32	38,64	32,62	30,01
01/12/2000 12:00	67,86	59,55	50,14	40,11	33,69	30,73
01/12/2000 13:00	67,90	60,50	51,30	41,10	34,50	31,30
01/12/2000 14:00	69,60	61,90	53,00	43,60	36,70	33,30
01/12/2000 15:00	67,50	62,00	54,30	45,80	38,70	35,20
01/12/2000 16:00	63,70	59,60	53,80	47,40	41,40	36,70
01/12/2000 17:00	58,60	56,23	51,75	46,25	40,84	36,47
01/12/2000 18:00	52,25	51,86	48,96	44,53	39,87	36,00
01/12/2000 19:00	44,52	46,50	45,35	42,24	38,51	35,29
01/12/2000 20:00	40,78	42,37	41,85	39,70	36,85	34,35
01/12/2000 21:00	39,37	40,32	39,66	37,81	35,46	33,48
01/12/2000 22:00	38,57	39,10	38,30	36,57	34,47	32,82
01/12/2000 23:00	38,13	38,36	37,46	35,76	33,80	32,36

HIPÓTESE Var AP - TEMPERATURAS (°C)						
Data/Prof. (cm)	0,00	3,00	6,00	9,00	12,00	15,00
JANEIRO						
01/01/2000 00:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 01:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 02:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 03:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05

(continuação)

01/01/2000 04:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 05:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 06:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 07:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 08:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 09:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 10:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 11:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 12:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 13:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 14:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 15:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 16:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 17:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 18:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 19:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 20:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 21:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 22:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
01/01/2000 23:00	48,30	46,33	42,54	39,19	36,49	33,05
FEVEREIRO						
01/02/2000 00:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 01:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 02:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 03:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 04:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 05:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 06:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 07:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 08:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 09:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 10:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 11:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 12:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 13:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 14:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 15:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 16:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 17:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 18:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 19:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 20:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 21:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 22:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67
01/02/2000 23:00	50,95	48,40	45,45	41,42	38,34	32,67

(continuação)

MARÇO						
01/03/2000 00:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 01:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 02:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 03:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 04:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 05:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 06:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 07:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 08:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 09:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 10:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 11:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 12:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 13:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 14:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 15:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 16:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 17:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 18:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 19:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 20:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 21:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 22:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
01/03/2000 23:00	47,07	44,53	40,49	35,98	32,92	29,97
ABRIL						
01/04/2000 00:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 01:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 02:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 03:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 04:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 05:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 06:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 07:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 08:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 09:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 10:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 11:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 12:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 13:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 14:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 15:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 16:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 17:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 18:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46

(continuação)

01/04/2000 19:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 20:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 21:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 22:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
01/04/2000 23:00	40,52	37,81	34,69	30,89	27,87	25,46
MAIO						
01/05/2000 00:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 01:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 02:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 03:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 04:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 05:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 06:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 07:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 08:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 09:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 10:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 11:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 12:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 13:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 14:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 15:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 16:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 17:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 18:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 19:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 20:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 21:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 22:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
01/05/2000 23:00	30,75	28,79	26,15	23,60	21,12	18,82
JUNHO						
01/06/2000 00:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 01:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 02:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 03:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 04:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 05:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 06:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 07:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 08:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 09:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 10:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 11:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 12:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 13:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21

(continuação)

01/06/2000 14:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 15:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 16:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 17:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 18:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 19:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 20:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 21:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 22:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
01/06/2000 23:00	26,14	24,18	21,97	19,14	16,88	15,21
JULHO						
01/07/2000 00:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 01:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 02:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 03:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 04:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 05:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 06:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 07:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 08:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 09:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 10:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 11:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 12:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 13:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 14:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 15:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 16:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 17:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 18:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 19:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 20:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 21:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 22:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
01/07/2000 23:00	30,06	27,50	24,95	21,54	18,95	17,29
AGOSTO						
01/08/2000 00:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 01:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 02:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 03:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 04:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 05:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 06:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 07:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 08:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27

(continuação)

01/08/2000 09:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 10:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 11:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 12:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 13:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 14:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 15:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 16:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 17:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 18:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 19:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 20:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 21:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 22:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
01/08/2000 23:00	30,19	27,59	24,57	21,23	19,56	17,27
SETEMBRO						
01/09/2000 00:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 01:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 02:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 03:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 04:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 05:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 06:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 07:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 08:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 09:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 10:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 11:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 12:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 13:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 14:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 15:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 16:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 17:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 18:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 19:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 20:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 21:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 22:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
01/09/2000 23:00	35,85	33,37	29,67	25,33	23,32	21,04
OUTUBRO						
01/10/2000 00:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 01:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 02:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 03:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92

(continuação)

01/10/2000 04:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 05:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 06:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 07:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 08:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 09:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 10:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 11:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 12:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 13:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 14:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 15:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 16:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 17:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 18:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 19:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 20:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 21:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 22:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
01/10/2000 23:00	42,00	39,59	36,35	32,31	27,98	24,92
NOVEMBRO						
01/11/2000 00:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 01:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 02:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 03:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 04:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 05:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 06:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 07:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 08:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 09:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 10:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 11:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 12:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 13:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 14:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 15:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 16:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 17:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 18:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 19:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 20:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 21:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 22:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95
01/11/2000 23:00	48,59	46,10	42,12	37,03	31,49	27,95

(continuação)

DEZEMBRO						
01/12/2000 00:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 01:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 02:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 03:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 04:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 05:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 06:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 07:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 08:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 09:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 10:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 11:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 12:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 13:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 14:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 15:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 16:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 17:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 18:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 19:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 20:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 21:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 22:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92
01/12/2000 23:00	49,73	46,73	42,33	36,87	32,88	30,92

HIPÓTESE Var_A (15cm) - TEMPERATURAS (°C)						
Data/Prof. (cm)	0,00	3,00	6,00	9,00	12,00	15,00
JANEIRO						
01/01/2000 00:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 01:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 02:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 03:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 04:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 05:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 06:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 07:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 08:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 09:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 10:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 11:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 12:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 13:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98
01/01/2000 14:00	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98	40,98

(continuação)

01/12/2000 10:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 11:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 12:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 13:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 14:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 15:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 16:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 17:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 18:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 19:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 20:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 21:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 22:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91
01/12/2000 23:00	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91	39,91

HIPÓTESE Var P - TEMPERATURAS (°C)						
Data/Prof. (cm)	0,00	3,00	6,00	9,00	12,00	15,00
JANEIRO						
01/01/2000 00:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 01:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 02:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 03:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 04:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 05:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 06:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 07:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 08:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 09:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 10:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 11:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 12:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 13:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 14:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 15:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 16:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 17:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 18:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 19:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 20:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 21:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 22:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/01/2000 23:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
FEVEREIRO						
01/02/2000 00:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/02/2000 01:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55

(continuação)

01/07/2000 12:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/07/2000 13:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/07/2000 14:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/07/2000 15:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/07/2000 16:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/07/2000 17:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/07/2000 18:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/07/2000 19:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/07/2000 20:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/07/2000 21:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/07/2000 22:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/07/2000 23:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
AGOSTO						
01/08/2000 00:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 01:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 02:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 03:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 04:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 05:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 06:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 07:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 08:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 09:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 10:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 11:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 12:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 13:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 14:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 15:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 16:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 17:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 18:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 19:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 20:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 21:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 22:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/08/2000 23:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
SETEMBRO						
01/09/2000 00:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 01:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 02:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 03:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 04:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 05:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 06:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55

(continuação)

01/09/2000 07:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 08:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 09:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 10:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 11:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 12:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 13:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 14:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 15:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 16:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 17:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 18:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 19:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 20:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 21:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 22:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/09/2000 23:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
OUTUBRO						
01/10/2000 00:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 01:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 02:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 03:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 04:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 05:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 06:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 07:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 08:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 09:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 10:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 11:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 12:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 13:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 14:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 15:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 16:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 17:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 18:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 19:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 20:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 21:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 22:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/10/2000 23:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
NOVEMBRO						
01/11/2000 00:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/11/2000 01:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55

(continuação)

01/12/2000 22:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55
01/12/2000 23:00	40,01	37,58	34,27	30,38	27,32	24,55

HIPÓTESE Cte (15cm) - TEMPERATURAS (°C)						
Data/Prof. (cm)	0,00	3,00	6,00	9,00	12,00	15,00
JANEIRO						
01/01/2000 00:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 01:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 02:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 03:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 04:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 05:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 06:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 07:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 08:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 09:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 10:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 11:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 12:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 13:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 14:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 15:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 16:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 17:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 18:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 19:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 20:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 21:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 22:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/01/2000 23:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
FEVEREIRO						
01/02/2000 00:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 01:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 02:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 03:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 04:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 05:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 06:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 07:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 08:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 09:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 10:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 11:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 12:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/02/2000 13:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35

(conclusão)

01/11/2000 14:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/11/2000 15:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/11/2000 16:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/11/2000 17:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/11/2000 18:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/11/2000 19:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/11/2000 20:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/11/2000 21:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/11/2000 22:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/11/2000 23:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
DEZEMBRO						
01/12/2000 00:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 01:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 02:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 03:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 04:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 05:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 06:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 07:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 08:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 09:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 10:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 11:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 12:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 13:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 14:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 15:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 16:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 17:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 18:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 19:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 20:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 21:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 22:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35
01/12/2000 23:00	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35	32,35