

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

Bruno de Souza Chaves

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA PREVISÃO
DE DESEMPENHO À FADIGA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A
PARTIR DA MODELAGEM VISCOELÁSTICA**

**Santa Maria, RS, Brasil
2021**

Bruno de Souza Chaves

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO DESEMPENHO DE
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS À FADIGA A PARTIR DA MODELAGEM
VISCOELÁSTICA**

Dissertação apresentada Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Deividi da Silva Pereira

**Santa Maria, RS, Brasil
2021**

Chaves, Bruno de Souza

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA PREVISÃO DE DESEMPENHO À FADIGA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS A PARTIR DA MODELAGEM VISCOELÁSTICA / Bruno de Souza Chaves.- 2021.
306 p.; 30 cm

Orientador: Deividi da Silva Pereira
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2021

1. Pavimentos asfálticos 2. Fadiga 3. VECD 4. Área Trincada 5. FlexPAVE™ I. da Silva Pereira, Deividi II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

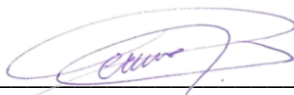
Declaro, BRUNO DE SOUZA CHAVES, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Bruno de Souza Chaves

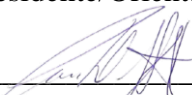
**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO DESEMPENHO DE
PAVIMENTOS ASFÁLTICOS À FADIGA A PARTIR DA MODELAGEM
VISCOELÁSTICA**

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

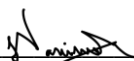
Aprovado em 12/08/2021:



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



Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)
(Examinador)



Luís Alberto Herrmann do Nascimento, PhD. (CENPES/PETROBRAS)
(Examinador)

Santa Maria, RS, Brasil
2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço sobretudo a Deus pela força para essa tarefa e por caminhar comigo em mais um capítulo dessa jornada. A Sua graça sempre é suficiente;

Agradeço à minha família, especialmente meus pais e minha avó, que sempre foram um modelo de resiliência e perseverança e em quem vejo claramente refletido o caráter de Deus;

Agradeço à Sara pela amizade que trouxe cores aos meus dias mais cinzentos;

Agradeço ao prof. Deividi Pereira por todo o apoio, paciência e dedicação, sem os quais essa pesquisa não teria chegado até aqui;

Agradeço à ajuda do Silvio, por sempre estar disposto a me ajudar e tirar minhas dúvidas sobre as análises e a parte teórica dessa pesquisa;

Agradeço ao Lucas Bueno e ao Fernando Zucchi por fornecer os dados do trecho monitorado da Av. Hέλvio Basso e pela disponibilidade em sanar minhas dúvidas;

De forma especial, agradeço à participação do prof. Luciano, Pablo, Antônio, Bethania e Rossano, por terem contribuído com sugestões e ideias que foram úteis ao trabalho. Também ao Lucas Deitos, pela ajuda com a análise econômica;

De forma geral, agradeço a todos os membros do GEPPASV pela unidade do grupo e pela disposição em trocarmos conhecimento e estarmos constantemente nos ajudando em nossas pesquisas;

Manifesto meus mais sinceros agradecimentos à NCSU, sobretudo ao prof. Kim, por ter fornecido o FlexPAVE™ para o grupo GEPPASV. Agradeço também ao Luis Nascimento por todo o meio de campo que fez nesse processo;

Quero agradecer à PETROBRAS/ANP pelo fomento dessa pesquisa por meio de bolsa e por meio dos trechos monitorados em Santa Maria;

Agradeço ao Leandro Blass, pelas medições de temperatura, que foram base para este trabalho, assim como ao CNPq, por ter fomentado sua pesquisa;

Agradeço aos meus amigos do Farol por terem tornado toda a minha jornada acadêmica, desde a graduação, muito mais leve e com um gostinho de eternidade.

RESUMO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS À FADIGA A PARTIR DA MODELAGEM VISCOELÁSTICA

AUTOR: Bruno de Souza Chaves

ORIENTADOR: Prof. Dr. Deividi da Silva Pereira

O Brasil apresenta uma grande deficiência em sua malha rodoviária no que diz respeito a suas condições de uso, e uma das principais patologias observadas é o trincamento por fadiga. Dentre os fatores que mais influenciam o desempenho de um pavimento à fadiga, está a temperatura. Atualmente, tal fator não é levado em consideração no método de dimensionamento vigente (DNER, 1981). O MeDiNa, que é a nova proposta para o dimensionamento de pavimentos, adota um modelo de fadiga a uma temperatura constante de 25 °C. Sabendo-se da grande variabilidade térmica a que um pavimento asfáltico pode estar sujeito, sobretudo em regiões de clima subtropical, como é o caso do Rio Grande do Sul, é imperativo investigar o quanto a temperatura, bem como sua variação, influencia na previsão da vida útil do pavimento. Tendo isso em vista, a presente pesquisa adota uma abordagem que considera a influência da temperatura, através de uma análise viscoelástica de dano contínuo (VECD), por meio do *software* FlexPAVE™. Sendo assim, tendo como dados de entrada os resultados de ensaios de módulo complexo e uniaxial de fadiga à tração-compressão, juntamente com dados de temperatura que simulam as condições climáticas da região central do RS, foi possível obter o dano por fadiga do pavimento ao longo do tempo. Além disso, com a aplicação de funções de transferência, foi prevista a porcentagem de área trincada para cada simulação, assim como a vida útil do pavimento com uma abordagem empírico-mecanicista e de custos de implantação. Como resultados, verificou-se que a temperatura tem grande influência tanto no dano por fadiga, quanto na previsão de área trincada e de vida útil do pavimento. Comparando os resultados com aqueles obtidos pelo MeDiNa, foi realizada uma análise econômica comparativa que mostrou que o modelo VECD, aliado a estimativas realistas de temperatura, é uma ferramenta importante na análise de fadiga de pavimentos e na previsão de área trincada.

Palavras-chaves: Pavimentos asfálticos; Fadiga; VECD; Área Trincada; FlexPAVE™.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE VARIATION IN ASPHALT PAVEMENTS FATIGUE PERFORMANCE USING VISCOELASTIC MODELATION

AUTHOR: BRUNO DE SOUZA CHAVES
ADVISOR: Dr. DEIVIDI DA SILVA PEREIRA

Brazilian highways have a great deficiency in regards to its use conditions and one of the main pathologies observed is fatigue cracking. One of the most influential factors in pavement fatigue performance is temperature. Presently, this factor is not taken into account in the current design method (DNER, 1981). In MeDiNa, which is the new proposal for pavement design method, it is considered a fatigue model based on a constant temperature of 25 °C. Given the great thermic variations to which an asphalt pavement can be subjected, mainly in subtropical climate regions, that is the case of Rio Grande do Sul, it is significant to investigate how much does temperature and its variations influence pavement life cycle. In light of this, the current research adopts an approach that considers the influence of temperature, through viscoelastic continuum damage (VECD) analysis, with the aid of software FlexPAVE™. Therefore, with complex module and uniaxial tension-compression fatigue tests as inputs, with temperature data that simulate climatic conditions of the central region of Rio Grande do Sul, it was possible to obtain the fatigue damage of the pavement along the time. Besides this, through the application of transfer functions, the percentage of cracked area to each simulation was predicted, just as the pavement life cycle with an mechanistic-empirical, implemental cost approach. It was verified in the results that temperature has great influence not only in fatigue damage, but also in cracked area prediction and pavement life cycle. Comparing the results with those obtained from MeDiNa, a comparative economic analysis was realized and it showed that VECD model, coupled with realistic temperature estimate, is an important tool in pavement fatigue analysis and cracked area prediction.

Keywords: Asphalt Pavements; Fatigue; VECD; Cracked Area; FlexPAVE™

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Carta das temperaturas médias anuais do Rio Grande do Sul	24
Figura 2.2 - Carta do Rio Grande do Sul a partir da classificação climática de Köppen	25
Figura 2.3 - Temperaturas máximas e mínimas médias em Santa Maria/RS	27
Figura 2.4 - Influência da condutividade térmica na temperatura superficial de um pavimento asfáltico.....	29
Figura 2.5 - Influência do coeficiente de convecção na temperatura superficial de um pavimento asfáltico.....	30
Figura 2.6 - Esquema das interações térmicas entre um pavimento asfáltico e o ambiente.....	33
Figura 2.7 - Comparação de temperaturas medidas e calculadas por Barber (1957)	35
Figura 2.8 - Comparação entre dados medidos (azul) e calculados (vermelho) de temperatura máxima diária	37
Figura 2.9 - Comparação entre dados medidos (azul) e calculados (vermelho) de temperatura mínima diária.....	38
Figura 2.10 - Comparação entre temperatura medida e prevista por Khan <i>et al.</i> (2019)	39
Figura 2.11 - Comparação de Souza <i>et al.</i> (2019) entre temperaturas medidas e radiação solar	40
Figura 2.12 - Exemplo de sensor digital de temperatura usado por Blass (2011).....	41
Figura 2.13 - Perfil do pavimento usado por Blass (2011) com indicação das profundidades de medição da temperatura.....	42
Figura 2.14 - Sensores utilizados por Blass (2011) instalados no pavimento	43
Figura 2.15 - Resumo do esquema de funcionamento do EICM.....	45
Figura 2.16 - Correlações entre a temperatura e a rigidez de concretos asfálticos.....	48
Figura 2.17 - Exemplo de curva de Wöhler.....	49
Figura 2.18 - Efeito da fadiga e da deformação permanente na rigidez de material viscoelástico	51
Figura 2.19 - Influência da temperatura sobre o módulo dinâmico e ângulo de fase de ligantes asfálticos	52
Figura 2.20 - Influência da temperatura e taxa de deformação na danificação de concretos asfálticos	53
Figura 2.21 - Tipos de ensaio de fadiga.....	55
Figura 2.22 - Domínios de comportamento mecânico em relação à temperatura e deformações	56
Figura 2.23 - Gráfico da tensão e deformação senoidais em um corpo de comportamento viscoelástico	58
Figura 2.24 - Exemplo de curva mestra de a) módulo dinâmico e b) ângulo de fase em ligante asfáltico.....	60
Figura 2.25 - Curva mestra antes e após aplicação do fator de deslocamento	60
Figura 2.26 - Gráfico de tensão versus deformação e tensão versus pseudodeformação para material LVE	65
Figura 2.27 - Exemplos de curvas características	68
Figura 2.28 - Exemplo de envoltória de ruptura a partir dos parâmetros N_f e GR	70
Figura 2.29 - Diferença entre os critérios de falha (a) GR e (b) DR	71
Figura 2.30 - Esquema das análises feitas no FlexPAVE™.....	73
Figura 2.31 - Aba <i>Design Structure</i> para concretos asfálticos	75
Figura 2.32 - Aba <i>Climate Data</i>	76
Figura 2.33 - Exemplo de gráfico de contorno de dano gerado pelo FlexPAVE™	77

Figura 2.34 - Exemplo de gráfico de evolução temporal das tensões S_{xx} , S_{yy} e S_{zz} gerado pelo FlexPAVE™	77
Figura 2.35 - Dados de entrada do tráfego no MeDiNa.....	79
Figura 2.36 - Dados de entrada de materiais granulares no MeDiNa.....	80
Figura 2.37 - Dados de entrada do concreto asfáltico no MeDiNa.....	80
Figura 2.38 - Pontos utilizados no MeDiNa para o cálculo do dano por fadiga.....	81
Figura 2.39 - Malha de pontos utilizada para o cálculo do dano médio no FlexPAVE™.....	84
Figura 2.40 - Parâmetros usados para o cálculo dos fatores de deslocamento	85
Figura 2.41 - Gráfico de $T_{0,35}$ versus dano média para AT a 10%	86
Figura 2.42 - Gráfico do fator de deslocamento versus $T_{0,35}$	86
Figura 3.1 - Fluxograma de análises da pesquisa.....	94
Figura 3.2 – Média das temperaturas no mês de janeiro na superfície do pavimento de Ijuí, San Diego e resultado da extrapolação dos dados de Ijuí.....	99
Figura 3.3 - Temperaturas médias de janeiro da hipótese ISD	100
Figura 3.4 - Temperaturas médias de abril da hipótese ISD.....	100
Figura 3.5 - Temperaturas médias de julho da hipótese ISD	101
Figura 3.6 - Temperaturas médias de outubro da hipótese ISD.....	101
Figura 3.7 - Comparação entre as temperaturas máximas e mínimas médias das cidades de San Diego, Cheyenne e Phoenix	104
Figura 3.8 – Polígonos de frequências relativas de temperatura para as hipóteses ISD, SAN, CHE e PHO.....	106
Figura 3.9 – Polígonos de frequências relativas acumuladas de temperatura para as hipóteses ISD, SAN, CHE e PHO	106
Figura 3.10 - Mapa do Rio Grande do Sul com destaque nas cidades de Santa Maria, Ijuí e Cruz Alta.....	108
Figura 3.11 - Localização do trecho HB na região central de Santa Maria	109
Figura 3.12 – Foto da Av. Hélio Basso.....	109
Figura 3.13 – Estrutura original do pavimento do trecho HB.....	110
Figura 3.14 - Procedimento de medição em campo de AT.....	111
Figura 3.15 - Curva granulométrica do material do subleito do trecho HB.....	112
Figura 3.16 - Sub-base do trecho HB em fase de execução.....	113
Figura 3.17 - Curva granulométrica do material da base do trecho HB	114
Figura 3.18 - Localização das usinas de asfalto U2, U3, U4 e U6 e do trecho da RS-400 de onde foi obtido o material fresado	116
Figura 3.19 - Curva granulométrica da mistura CA-50/70-HB	118
Figura 3.20 - Curva granulométrica da mistura CA-50/70-U4.....	120
Figura 3.21 - Curva granulométrica da mistura CA-50/70-U8.....	123
Figura 3.22 - Curva granulométrica da mistura CA-SBS-U2.....	125
Figura 3.23 - Curva granulométrica da mistura CA-SBS-U6.....	127
Figura 3.24 - Curva granulométrica da mistura CA-BOR.....	130
Figura 3.25 - Curva granulométrica das misturas estudadas por Correa (2020).....	132
Figura 3.26 – Curvas mestras de módulo dinâmico.....	135
Figura 3.27 – Curvas mestras de ângulo de fase.....	135
Figura 3.28 – Curvas características de dano $C \times S$	136
Figura 3.29 – Envoltórias de ruptura $G^R \times N_f$	136
Figura 3.30 - Gráfico da distribuição do tráfego ao longo do dia para o trecho HB referente ao 2º semestre de 2019.....	138
Figura 3.31 - Dados de entrada das simulações TC no FlexPAVE™	146
Figura 3.32 - Dados de entrada das simulações HT no FlexPAVE™	147

Figura 3.33 – Resumo do processo de dimensionamento utilizado nesta pesquisa a partir do FlexPAVE™	148
Figura 3.34 – Dados de entrada das simulações CC no FlexPAVE™	149
Figura 3.35 – Comparação entre o número N acumulado medido em campo e o adotado nas simulações	149
Figura 4.1 – Evolução temporal do dano a temperaturas constantes considerando 10 cm de revestimento para as misturas a) CA-50/70-HB, b) CA-50/70-U4, c) CA-50/70-U8, d) CA-SBS-U2, e) CA-SBS-U6, f) CA-BOR e f) CA-RAP30.....	160
Figura 4.2 – Evolução temporal do dano por fadiga considerando diferentes condições de temperatura a partir do <i>software</i> CAP3D-D	161
Figura 4.3 - Dano a 180 meses para diferentes temperaturas e misturas com a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento	162
Figura 4.4 – Dano a 25°C para as misturas CA-50/70-HB, CA-50/70-U4, CA-50/70-U8 e CA-RAP30 a 180 meses	163
Figura 4.5 – Dano a 25°C para as misturas CA-50/70-HB, CA-50/70-U4, CA-50/70-U8 e CA-RAP30 a 24 meses.....	164
Figura 4.6 – Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-HB a 120 meses a 25 °C e espessura de revestimento de a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm	164
Figura 4.7 – Evolução temporal do dano médio para a mistura CA-50/70-HB a 25 °C considerando a) malha de 110 pontos e b) duas primeiras e duas últimas linhas da malha de 110 pontos	165
Figura 4.8 – Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-HB a 1 mês e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C	166
Figura 4.9 – Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-U4 a 1 mês e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C	167
Figura 4.10 – Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-U8 a 1 mês e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C ..	167
Figura 4.11 – Distribuição do dano para a mistura CA-SBS-U2 a 6 meses e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C ..	167
Figura 4.12 – Distribuição do dano para a mistura CA-SBS-U6 a 6 meses e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C ..	168
Figura 4.13 – Distribuição do dano para a mistura CA-BOR a 24 meses e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C	168
Figura 4.14 – Distribuição do dano para a mistura CA-RAP30 a 1 mês e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C	168
Figura 4.15 – Distribuição da deformação principal para a mistura CA-50/70-HB considerando 5 cm de revestimento a 20 °C.....	169
Figura 4.16 – Evolução temporal da AT para as misturas a) CA-50/70-HB, b) CA-50/70-U4, c) CA-50/70-U8, d) CA-SBS-U2, e) CA-SBS-U6 e f) CA-RAP30 considerando 10 cm de revestimento	171
Figura 4.17 – AT a 60 meses para diferentes temperaturas e misturas com a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento.....	172
Figura 4.18 – Vida à fadiga correspondente à AT de 30% para diferentes misturas e temperaturas considerando a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento.....	173
Figura 4.19 – Variação relativa da vida à fadiga correspondente à AT de 30% entre 25 e 35 °C para diferentes misturas	174
Figura 4.20 – Evolução temporal do dano para as misturas a) CA-50/70-HB, b) CA-50/70-U4, c) CA-50/70-U8, d) CA-SBS-U2, e) CA-SBS-U6 e f) CA-RAP30 a diferentes hipóteses de temperatura considerando 10 cm de revestimento	177

Figura 4.21 - Temperatura média anual da hipótese ISD ao longo da profundidade e para diferentes horas do dia	178
Figura 4.22 - Temperatura média anual da hipótese SAN ao longo da profundidade e para diferentes horas do dia	178
Figura 4.23 - Temperatura média anual da hipótese CHE ao longo da profundidade e para diferentes horas do dia	179
Figura 4.24 - Temperatura média anual da hipótese PHO ao longo da profundidade e para diferentes horas do dia	179
Figura 4.25 - Média das temperaturas para cada hipótese considerando diferentes espessuras de revestimento	180
Figura 4.26 – Correlação entre a temperatura média e o dano médio a 60, 120 e 180 meses para cada hipótese de temperatura considerando a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento .	182
Figura 4.27 - Dano a 24 meses para as misturas a) CA-50/70-HB, b) CA-50/70-U4, c) CA-50/70-U8, d) CA-SBS-U2, e) CA-SBS-U6, f) CA-BOR e f) CA-RAP30 considerando espessuras de revestimento entre 5 e 15 cm.....	183
Figura 4.28 - Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-HB a 1 mês e 5 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO.....	184
Figura 4.29 - Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-HB a 6 meses e 10 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO.....	184
Figura 4.30 - Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-HB a 24 meses e 15 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO.....	185
Figura 4.31 - Distribuição do dano para a mistura CA-SBS-U2 a 6 meses e 5 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO.....	185
Figura 4.32 - Distribuição do dano para a mistura CA-SBS-U2 a 24 meses e 10 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO.....	185
Figura 4.33 - Distribuição do dano para a mistura CA-SBS-U2 a 60 meses e 15 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO.....	186
Figura 4.34 - Distribuição do dano para a mistura CA-BOR a 120 meses e 5 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO.....	186
Figura 4.35 - Distribuição do dano para a mistura CA-BOR a 180 meses e 10 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO.....	186
Figura 4.36 - Distribuição do dano para a mistura CA-BOR a 180 meses e 15 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO.....	187
Figura 4.37 - Distribuição do dano para a mistura CA-RAP30 a 1 mês e 5 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO.....	187
Figura 4.38 - Distribuição do dano para a mistura CA-RAP30 a 1 mês e 10 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO.....	187
Figura 4.39 - Distribuição do dano para a mistura CA-RAP30 a 6 meses e 15 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO.....	188
Figura 4.40 - Evolução temporal da AT para as misturas a) CA-50/70-HB, b) CA-50/70-U4, c) CA-50/70-U8, d) CA-SBS-U2, e) CA-SBS-U6 e f) CA-RAP30 considerando 10 cm de revestimento	190
Figura 4.41 - AT a 180 meses para a mistura CA-SBS-U2 considerando espessuras de revestimento entre 5 e 15 cm	191
Figura 4.42 – AT prevista a 180 meses a partir das duas funções de transferência considerando mistura CA-SBS-U2, hipótese SAN e diferentes espessuras de revestimento	192
Figura 4.43 - Vida à fadiga correspondente à AT de 30% para a mistura CA-50/70-HB considerando diferentes espessuras e hipóteses de temperatura	193
Figura 4.44 - Correlação entre a temperatura média e a vida à fadiga considerando a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento.....	194

Figura 4.45 - Correlação entre a temperatura média e a vida à fadiga considerando a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento para as misturas com ligante convencional e mistura CA-RAP30	195
Figura 4.46 – Espessuras admissíveis para as misturas com ligante convencional e a mistura CA-RAP30	196
Figura 4.47 Variação relativa da vida à fadiga considerando 5 cm de revestimento	197
Figura 4.48 Variação relativa da vida à fadiga considerando 10 cm de revestimento	198
Figura 4.49 Variação relativa da vida à fadiga considerando 15 cm de revestimento	198
Figura 4.50 – Evolução temporal da AT do trecho HB medida em campo e prevista pela função de Nascimento (2015) com 50% de confiabilidade.....	200
Figura 4.51 - Evolução temporal da AT obtida pelo MeDiNa para a mistura CA-50/70-HB considerando diferentes espessuras de revestimento.....	202
Figura 4.52 - Evolução temporal da AT obtida pelo MeDiNa e pelo FlexPAVE™ para a mistura CA-50/70-HB considerando a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento.....	203
Figura 4.53 - Vida à fadiga obtida pelo MeDiNa e pelo FlexPAVE™ correspondente à AT de 30% para a mistura CA-50/70-HB considerando diferentes espessuras de revestimento.....	204
Figura 4.54 - Evolução temporal da AT obtida pelo MeDiNa e pelo FlexPAVE™ considerando estrutura e tráfego reais do trecho HB	205
Figura 4.55 - Custo da implantação por quilômetro em função do tipo de mistura asfáltica e da espessura de revestimento	208
Figura 4.56 – Custo da implantação por quilômetro obtido a partir das espessuras admissíveis	209
Figura 4.57 – Custo da implantação por quilômetro por N obtido a partir das espessuras admissíveis	209
Figura 4.58 - Decréscimo relativo no custo por quilômetro por N considerando hipóteses DNIT e ISD.....	210
Figura 4.59 – Custo da implantação por quilômetro por N para a mistura CA-50/70-HB a partir do FlexPAVE™ e do MeDiNa.....	212

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores extremos de radiação solar para diferentes locais do Brasil	26
Tabela 2.2 - Resumo dos dados climáticos de Santa Maria a partir das normais climatológicas de 1981 a 2010.....	26
Tabela 2.3 – Médias das temperaturas médias compensadas, máximas e mínimas de Santa Maria segundo normais climatológicas de 1981 a 2010	27
Tabela 2.4 - Valores de albedo, calor específico e condutibilidade térmica para diferentes tipos de superfície.....	32
Tabela 2.5 - Modelos de temperaturas obtidos por Blass (2011)	43
Tabela 2.6 - Princípio de Superposição de Boltzmann.....	57
Tabela 2.7 - Coeficientes de deslocamento e de ajuste da função de transferência	87
Tabela 3.1 - Processo de minoração das temperaturas de Ijuí no mês de janeiro na superfície do pavimento	96
Tabela 3.2 – Processo de extrapolação das temperaturas de Ijuí no mês de julho na superfície do revestimento entre 0:00 e 12:00.....	97
Tabela 3.3 – Processo de extrapolação das temperaturas de Ijuí no mês de julho na superfície do revestimento entre 17:00 e 23:00.....	98
Tabela 3.4 - Fatores de ponderação para as temperaturas médias mensais de Cruz Alta	103
Tabela 3.5 - Resumo das hipóteses de temperatura.....	105
Tabela 3.6 - AT medida em campo no trecho HB.....	111
Tabela 3.7 - Caracterização do subleito do trecho HB	113
Tabela 3.8 - Caracterização da base do trecho HB.....	114
Tabela 3.9 - <i>Ranking</i> do dano por fadiga das misturas de Schuster (2018)	115
Tabela 3.10 - Dados das misturas asfálticas	117
Tabela 3.11 – Características de CA-50/70-HB relativas aos agregados	118
Tabela 3.12 – Parâmetros volumétricos da mistura CA-50/70-HB.....	119
Tabela 3.13 - Parâmetros da modelagem da curva mestra e do modelo S-VECD referentes à mistura CA-50/70-HB	119
Tabela 3.14 - Coeficientes da série de Prony para a mistura CA-50/70-HB.....	120
Tabela 3.15 - Características de CA-50/70-U4 relativas aos agregados	121
Tabela 3.16 - Parâmetros volumétricos da mistura CA-50/70-U4	121
Tabela 3.17 - Parâmetros dos modelos WLF, Arrhenius, 2S2P1D e do S-VECD para a mistura CA-50/70-U4.....	121
Tabela 3.18 - Coeficientes da série de Prony para a mistura CA-50/70-U4	122
Tabela 3.19 - Características de CA-50/70-U8 relativas aos agregados	123
Tabela 3.20 - Parâmetros volumétricos da mistura CA-50/70-U8	123
Tabela 3.21 - Parâmetros dos modelos WLF, Arrhenius, 2S2P1D e do S-VECD para a mistura CA-50/70-U8.....	124
Tabela 3.22 - Coeficientes da série de Prony para a mistura CA-50/70-U8	124
Tabela 3.23 - Características de CA-SBS-U2 relativas aos agregados	125
Tabela 3.24 - Parâmetros volumétricos da mistura CA-SBS-U2	126
Tabela 3.25 - Parâmetros dos modelos WLF, Arrhenius, 2S2P1D e do S-VECD para a mistura CA-SBS-U2.....	126
Tabela 3.26 - Coeficientes da série de Prony para a mistura CA-SBS-U2	126
Tabela 3.27 - Características de CA-SBS-U6 relativas aos agregados	128
Tabela 3.28 - Parâmetros volumétricos da mistura CA-SBS-U6.....	128
Tabela 3.29 - Parâmetros dos modelos WLF, Arrhenius, 2S2P1D e do S-VECD para a mistura CA-SBS-U6.....	128

Tabela 3.30 - Coeficientes da série de Prony para a mistura CA-SBS-U6.....	129
Tabela 3.31 - Características de CA-BOR relativas aos agregados	130
Tabela 3.32 – Parâmetros volumétricos da mistura CA-BOR.....	130
Tabela 3.33 - Parâmetros dos modelos WLF, Arrhenius, 2S2P1D e do S-VECD para a mistura CA-BOR.....	131
Tabela 3.34 - Coeficientes da série de Prony para a mistura CA-BOR.....	131
Tabela 3.35 - Granulometria do RAP 50/70 estudado por Correa (2020)	132
Tabela 3.36 - Características de CA-RAP30 relativas aos agregados	133
Tabela 3.37 - Parâmetros volumétricos da mistura CA-RAP30	133
Tabela 3.38 - Parâmetros dos modelos WLF, Arrhenius, 2S2P1D e do S-VECD para a mistura CA-RAP30.....	133
Tabela 3.39 - Coeficientes a série de Prony para a mistura CA-RAP30	134
Tabela 3.40 - Coeficientes da função sigmoideal para a mistura CA-RAP30.....	134
Tabela 3.41 - Contagem do tráfego do trecho HB no 2º semestre de 2019	137
Tabela 3.42 - Distribuição do tráfego de veículos comerciais ao longo do dia para o trecho HB a partir da contagem do tráfego do 2º semestre do 2019	137
Tabela 3.43 - Dados de entrada da aba <i>General Information</i>	138
Tabela 3.44 - Dados de entrada do subleito no FlexPAVE™.....	140
Tabela 3.45 - Dados de entrada referentes da sub-base no FlexPAVE™.....	140
Tabela 3.46 - Dados de entrada da base no FlexPAVE™	141
Tabela 3.47 - Dados de entrada do revestimento no FlexPAVE™.....	141
Tabela 3.48 - Dados de entrada das misturas asfálticas no FlexPAVE™ relativos à modelagem da curva mestra	142
Tabela 3.49 - Dados de entrada das misturas asfálticas no FlexPAVE™ relativos à curva característica e à envoltória de ruptura	142
Tabela 3.50 - Dados de entrada da mistura CA-BOR no FlexPAVE™	143
Tabela 3.51 - Opções de análise e resultados das simulações no FlexPAVE™	144
Tabela 3.52 - Dados de entrada do MeDiNa referentes aos materiais.....	151
Tabela 3.53 - Dados de entrada do MeDiNa referentes ao tráfego majorado do trecho HB .	152
Tabela 3.54 - Dados de entrada do MeDiNa referentes ao tráfego real do trecho HB	152
Tabela 3.55 – Dados geométricos adotados para o levantamento de custos.....	153
Tabela 3.56 – Quantitativos relativos à sinalização adotados para o levantamento de custos	153
Tabela 3.57 - DMTs adotadas para as composições relativas à pavimentação.....	153
Tabela 3.58 - DMTs adotadas para as composições relativas à sinalização	154
Tabela 3.59 – Custo unitário, mês e estado de referência dos insumos fornecidos pela ANP	154
Tabela 3.60 - Composições utilizadas para a orçamentação da terraplenagem	155
Tabela 3.61 - Composições utilizadas para a orçamentação da pavimentação.....	156
Tabela 3.62 - Composições utilizadas para a orçamentação da sinalização	156
Tabela 4.1 – Coeficientes de correlação entre o dano médio e a temperatura média de cada hipótese	182
Tabela 4.2 – Custo de implantação	206
Tabela 4.3 – Custo do revestimento por quilômetro tendo como base janeiro de 2021	206
Tabela 4.4 – Custo da pavimentação por quilômetro.....	207
Tabela 4.5 – Custo da implantação por quilômetro	207

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

'	Minutos
"	Segundos/Polegadas
%	porcentagem
°	Graus
°C	Graus Celsius
2S2P1D	2 Springs, 2 Parabolic Dashpots, 1 Dashpot
A	Área
AADTT	Average Annual Daily Truck Traffic
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AB	Asfalto Borracha
acum.	Acumulado
AEMC	Análise Elástica de Múltiplas Camadas
α	Constante do Material Relativa à Viscoelasticidade
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível
at	Shift Factor da Curva Mestra
AT	Percentual de Área Trincada
BA	Bahia
BDI	Benefícios e Despesas Indiretas
BGS	Brita Graduada Simples
c	Difusividade
C	Pseudorrigidez
CA	Concreto Asfáltico
CAGED	Cadastro Geral de Empregados e Desempregados
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAP3D	Computer Analysis of Pavements
CBR	California Bearing Ratio
CENPES	Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello
Cfa	Clima subtropical, com verão quente
Cfb	Clima temperado, com verão ameno
CHE	Cheyenne
cm	Centímetro
CM	Cura Média
Coef.	Coeficiente
compr.	Comprimento
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
D	Dano por Fadiga
DMM	Densidade Máxima Medida
DMT	Densidade Máxima Teórica
DMT	Distância Média de Transporte
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

D^R	Taxa de variação entre o somatório da perda de de pseudorrigidez até a falha e a vida à fadiga
e	Emissividade/Constante de Euler
E(t)	Módulo de Relaxação
E^*	Módulo Complexo
$ E^* $	Módulo Dinâmico
E1	Storage Modulus
E2	Loss Modulus
EICM	Enhanced Integrated Climatic Model
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ε	Deformação
ε^R	Pseudodeformação
E_R	Módulo de Referência
Esp.	Espessura/Específico
et al.	et alii (e outros)
FGTS	Fundo de Garantia do Tempo de Serviço
FHWA	Federal Highway Administration
FIC	Fator de Influência de Chuvas
FIT	Fator de Influência do Tráfego
fr	Frequência
FV	Fator de Veículo
g	Grama
GEPPASV	Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária
G^R	Taxa de Liberação da Energia de Pseudodeformação
GUI	Graphical User Interface
h	Hora
HB	Hélio Basso
Hz	Hertz
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPR	Instituto de Pesquisas Rodoviárias
ISD	Ijuí + San Diego
J	Joule
k	Condutividade Térmica
km	Quilômetro
kN	Kilonewton
kPa	Kilopascal
Ksi	Tempo reduzido
larg.	Largura
LVE	Linear Viscoelástico
FlexPAVE™	Linear Viscoelastic Pavement Design for Critical Distresses
LVEMA	Layered Viscoelastic Moving Load Analysis
Ly	Langley
m	Metro

Máx.	Máximo
MeDiNA	Método de Dimensionamento Nacional
MEPDG	Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide
Mín.	Mínimo
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
MS	Macadame Seco
$\mu\epsilon$	Microstrains
N	Número de Solicitações do Eixo Padrão
$N_{30\%}$	Número N correspondente a 30% de Área Trincada
NA	Não Atingido
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NCSU	North Carolina State University
N_f	Número de Solicitações do Eixo Padrão até a Falha por Fadiga (Vida à fadiga)
N°	Número
$^\circ\text{F}$	Graus Fahrenheit
ω	Frequência Angular
PE	Pernambuco
Petrobras	Petróleo Brasileiro S. A.
φ/ϕ	Ângulo de Fase
PHO	Phoenix
PL	Pintura de Ligação
PROCERGS	Companhia de Tecnologia da Informação e Comunicação do Estado do Rio Grande do Sul S. A.
Prof.	Profundidade
Q	Calor
R\$	Reais
R_{12-1}	Taxa Secante de Danificação entre 12 meses e 1 mês
R^2	Coefficiente de Determinação
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
Ref.	Referência
RR	Ruptura Rápida
RS	Rio Grande do Sul
s	Segundo
S	Variável Interna de Danificação
S-VECD	Simplified Viscoelastic Continuum Damage
SAN	San Diego
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
S_e	Erro Padrão
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
σ	Tensão
SP	São Paulo
$S_{T0,35}$	Fator de Deslocamento da Função de Transferência

SUCS	Sistema de Unificado de Classificação dos Solos
T	Temperatura
t	Tempo/Tonelada
T0,35	Tempo (em meses) em que o Dano Chega a 0,35
Temp.	Temperatura
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
u_x, u_y, u_z	Deslocamentos nas Direções x, y e z
VAM	Vazios nos Agregados Minerais
VDM	Volume Diário Médio
VECD	Viscoelastic Continuum Damage
Vel.	Velocidade
W	Energia Emitida
w	Velocidade do Vento
WF	Weight Factor
WLF	Williams-Landel-Ferry
WMAAT	Weighted Mean Annual Air Temperature
WMAPT	Weighted Mean Annual Pavement Temperature
WR	Função de Densidade de Energia de Pseudodeformação
z	Profundidade
Z_p	Desvio Padrão Médio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Objetivo Geral	20
1.2	Objetivos Específicos	21
1.3	Organização do Trabalho	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Clima no Rio Grande do Sul e Santa Maria	23
2.2	Transferência de Calor	28
2.3	Modelagem da Temperatura em Pavimentos Asfálticos	33
2.3.1	Barber (1957)	33
2.3.2	Wood (1998)	35
2.3.3	Diefenderfer (2002)	36
2.3.4	Khan <i>et al.</i> (2019)	38
2.3.5	Souza <i>et al.</i> (2019)	40
2.3.6	Blass (2011)	41
2.3.7	EICM	44
2.4	Influência da Temperatura no comportamento mecânico e desempenho de pavimentos asfálticos	47
2.4.1	Rigidez de misturas asfálticas	47
2.4.2	Fadiga em Misturas Asfálticas	48
2.4.3	Análise Viscoelástica de Pavimentos	56
2.4.4	Modelo viscoelástico de dano contínuo (VECD)	63
2.5	FlexPAVE™	71
2.5.1	Interface Gráfica	74
2.6	MeDiNa	77
2.7	Previsão da Área trincada	83
2.8	Custos diretos de construção rodoviária	89
3	MATERIAIS E MÉTODOS	93
3.1	Dados Climáticos	94
3.1.1	Hipótese ISD	95
3.1.2	Hipótese SHELL	102
3.1.3	Hipótese DNIT	103
3.1.4	Hipóteses SAN, CHE e PHO	104
3.1.5	Resumo das hipóteses	105
3.2	Materiais de Pavimentação para as Simulações	107
3.2.1	Subleito	112
3.2.2	Sub-base	113
3.2.3	Base	114
3.2.4	Revestimento	115
3.3	Tráfego	137
3.4	Emprego do FlexPAVE™	138
3.4.1	Informações gerais	138
3.4.2	Camadas de suporte	139
3.4.3	Revestimento	141
3.4.4	Clima	142
3.4.5	Tráfego	143
3.4.6	Opções de resultados e análises	144
3.4.7	Simulações	144

3.5	Aplicação da Função de Transferência.....	150
3.6	Emprego do MeDiNa.....	150
3.7	Análise econômica.....	152
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	159
4.1	Simulações TC.....	159
4.1.1	Dano por fadiga.....	159
4.1.2	Tipo de fissuração.....	166
4.1.3	Área trincada.....	170
4.1.4	Síntese das análises.....	175
4.2	Simulações HT.....	175
4.2.1	Dano por fadiga.....	176
4.2.2	Tipo de fissuração.....	184
4.2.3	Área trincada.....	189
4.2.4	Síntese das análises.....	199
4.3	Simulações CC.....	200
4.4	Análise dos resultados do MeDiNa.....	201
4.5	Análise econômica.....	206
4.5.1	Síntese das análises.....	212
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	215
5.1	Conclusões.....	215
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	217
	REFERÊNCIAS.....	219
	APÊNDICE A.....	231
	APÊNDICE B.....	237
	APÊNDICE C.....	249
	APÊNDICE D.....	253
	APÊNDICE E.....	265
	APÊNDICE F.....	285
	APÊNDICE G.....	288
	APÊNDICE H.....	306

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, um dos principais defeitos observados nos pavimentos asfálticos é o trincamento por fadiga nos pavimentos asfálticos (NASCIMENTO, 2015). Todavia, no atual método adotado nacionalmente para dimensionar pavimentos asfálticos, conhecido como “método do CBR” (DNER, 1981), baseado em parâmetros de natureza empírica, esse fenômeno não é levado em consideração. Na verdade, essa abordagem não considera propriedades fundamentais dos materiais de pavimentação, sendo unicamente função de correlações matemáticas e estatísticas que levam em conta a proteção da estrutura e, ademais, não consideram a aplicação cíclica de cargas, que é o que ocorre em campo.

Apesar do significativo avanço na engenharia brasileira com o advento desse método, tem-se buscado avançar além de processos empíricos. Engenheiros e órgãos rodoviários de diversos países têm visado compreender o pavimento a partir de abordagens cada vez mais mecanicistas.

Por mecanicista, entende-se um método que correlaciona a influência do clima e do tráfego com a manifestações de patologias no pavimento a partir das tensões, deformações e deslocamentos a que os materiais estão sujeitos. Assim, podem ser levados em consideração no projeto de pavimentos dados que realmente representem como os materiais de pavimentação irão se comportar em campo (MEDINA, 2006).

Devido a isso, vem sendo proposto atualmente um novo método de dimensionamento, conhecido como Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), surgido a partir da pesquisa de Franco (2007) e dos esforços da Rede Temática de Asfalto, que vem trazendo inovações relevantes nos quesitos de compreensão do comportamento mecânico dos materiais por meio da teoria elástica de camadas.

Tais inovações são advindas de pesquisas realizadas nos Estados Unidos no fim da década de 1940 por pesquisadores como Hveem e Carmany (1948). Da mesma maneira, é necessário que novos modelos continuem a ser propostos de modo a aperfeiçoar aqueles que utilizam a análise elástica de camadas e futuramente possam ser implementados.

Um dos modelos que leva em consideração as propriedades viscoelásticas das misturas asfálticas e a danificação por fadiga é o chamado modelo *Viscoelastic Continuum Damage* (VECD). Esse modelo é implementado, dentre outros programas, pelo FlexPAVE™.

No *software*, desenvolvido na *North Carolina State University* (NCSU), são levados em consideração tanto as propriedades fundamentais dos materiais de pavimentação quanto dados climáticos e de tráfego. Desse modo, o que realmente ocorre *in situ* é cada vez mais aproximado da fase de projeto, permitindo antecipar com maior acurácia a evolução das patologias que se manifestarão.

O FlexPAVE™ permite inserir dados de temperatura para diferentes profundidades da camada de revestimento e para cada hora do dia durante o período de um ano. Contudo, a forma como leva-se em consideração esses dados de entrada pode influenciar nos resultados obtidos e, conseqüentemente, na previsão da formação de trincas na superfície do pavimento.

Assim, esse trabalho tem como foco analisar como a temperatura influencia na estimativa de desempenho dos pavimentos asfálticos à fadiga. Conforme Tramontini (2007), as temperaturas medidas na superfície de uma rodovia no estado do Rio Grande do Sul podem variar em mais de 30 °C durante um período de 24 h. Desse modo, é possível que considerar uma temperatura constante de 25 °C, como é o caso do MeDiNa, não represente bem as condições desses pavimentos e forneça resultados bem distintos no que diz respeito à estrutura do pavimento prevista em projeto, o que terá reflexos econômicos.

Dessa forma, ao se considerar a variação da temperatura no comportamento de pavimentos asfálticos, cada vez mais é diminuída a parcela empírica do processo de dimensionamento e, com o desenvolvimento de funções de transferência com maior precisão e confiabilidade, se torna possível realizar projetos de pavimentos que correspondam mais à realidade.

1.1 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa tem como objetivo geral avaliar a influência da temperatura sobre a previsão de desempenho à fadiga de pavimentos asfálticos a partir de materiais de pavimentação disponíveis no estado do Rio Grande do Sul.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Comparar a previsão de área trincada obtida a partir do dano calculado pelo FlexPAVE™ mediante a função de transferência proposta por Nascimento (2015) com a previsão de área trincada obtida por meio do MeDiNa mediante a função de transferência de Fritzen (2016);
- b) Avaliar economicamente a influência da temperatura a partir do orçamento das estruturas de pavimento obtidas com a utilização do FlexPAVE™ e comparar os custos com aqueles obtidos por intermédio do MeDiNa;
- c) Avaliar a influência de CAPs modificados com adição de SBS, borracha e RAP e comparar os resultados de dano por fadiga e área trincada, além da subsequente análise econômica, com misturas convencionais;
- d) Avaliar a influência da variação diária e sazonal de temperatura sobre a previsão de área trincada.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1 deste trabalho, é apresentada a introdução para contextualizar o tema e são pontuados o objetivo geral e os objetivos específicos que se espera alcançar.

O capítulo 2 contém uma revisão da literatura acerca da influência do clima no comportamento mecânico de pavimentos asfálticos e em seu desempenho, das abordagens utilizadas para estudar a viscoelasticidade e o fenômeno de fadiga de misturas asfálticas, do funcionamento do programa FlexPAVE™ e das ferramentas necessárias para a análise econômica comparativa com o MeDiNa.

No capítulo 3, é abordado como foram obtidas as hipóteses de temperatura para as simulações no FlexPAVE™, além dos dados de entrada referentes aos materiais e ao tráfego. Também são discutidas as considerações para as simulações no MeDiNa e para o orçamento das estruturas de pavimento obtidas.

No capítulo 4, são exibidos e discutidos resultados obtidos de dano, área trincada, vida à fadiga e de análise econômica e são feitas comparações com a literatura consultada.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões decorrentes das análises dos resultados juntamente com sugestões para futuras pesquisas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada uma revisão bibliográfica acerca do clima no Rio Grande do Sul, com foco na região central do estado; dos fenômenos de transferência de calor entre um pavimento asfáltico e o ambiente; da influência da temperatura nas suas propriedades mecânicas e em seu desempenho à fadiga; e de ferramentas utilizadas na previsão de desempenho de pavimentos asfálticos.

2.1 CLIMA NO RIO GRANDE DO SUL E SANTA MARIA

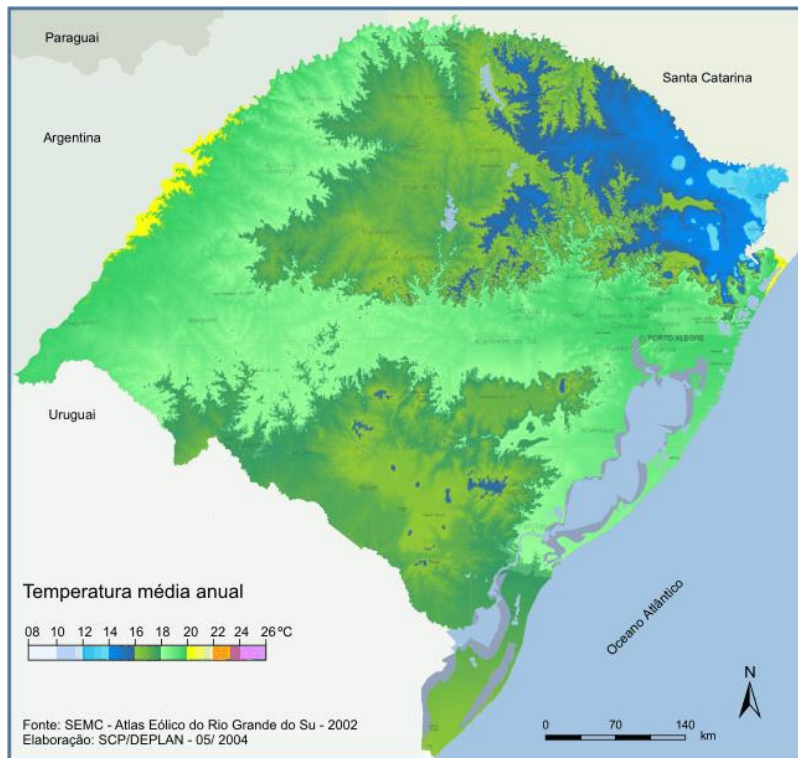
Nesta parte do trabalho, serão apontadas as principais características climáticas do Rio Grande do Sul e, mais especificamente, de Santa Maria/RS que serão relevantes nas análises posteriores.

O estado do Rio Grande do Sul está localizado entre os paralelos $-27^{\circ}04'56''$ e $-33^{\circ}45'07''$ e, portanto, está completamente situado fora da zona intertropical (IBGE, 2018).

Devido à sua latitude elevada, está sujeito às massas polares advindas do Sul e, mediante a interação dessa com as massas tropicais marítimas e continentais, tem-se a gênese de grande parte dos aspectos climáticos da região e das grandes variações de temperatura observadas no estado, chegando a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ no verão em certas localidades e a temperaturas negativas com possível geada no inverno (PROCERGS, 2020).

Contudo, conforme Buriol *et al.* (2007), as médias mensais dos meses mais frios são superiores a $11,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, nos meses mais quentes, não ultrapassam os $26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ em nenhum local do estado, o que é característico do clima temperado quente (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Carta das temperaturas médias anuais do Rio Grande do Sul

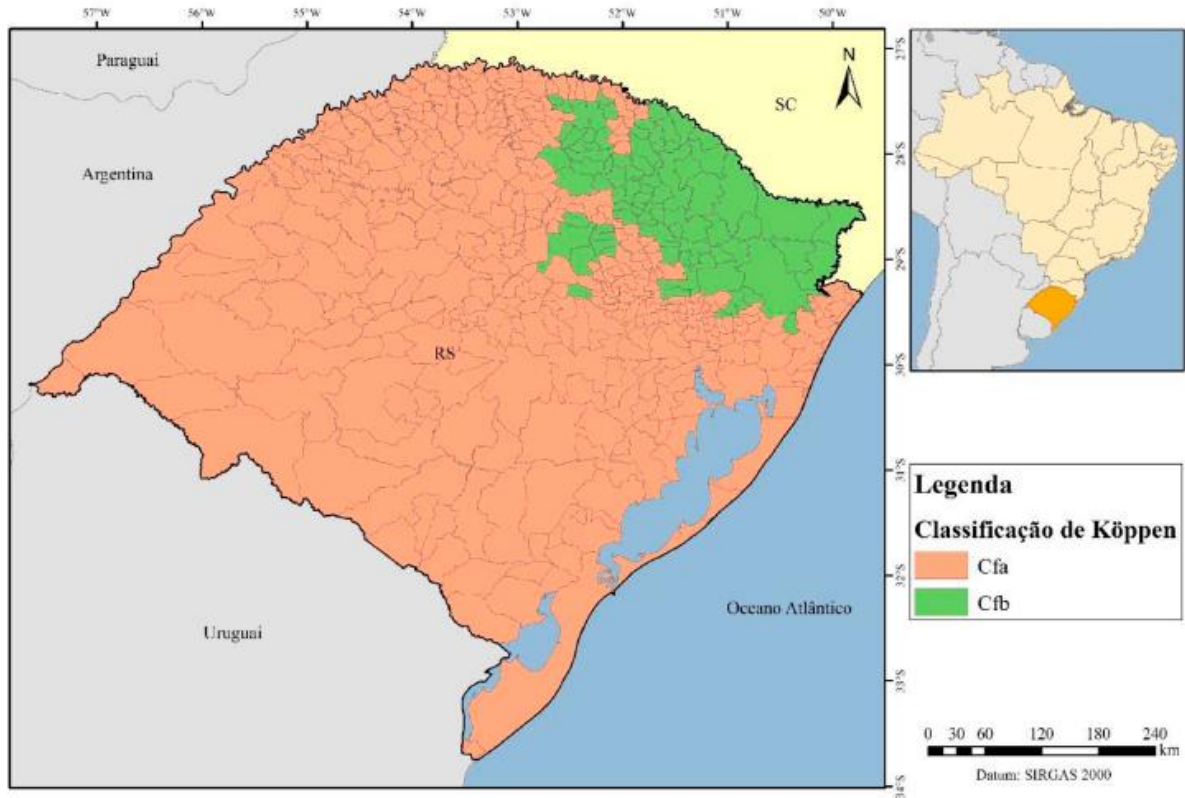


Fonte: PROCERGS (2020)

As precipitações são relativamente uniformes ao longo do ano devido à grande influência das massas de ar marítimas. Contudo, nas regiões norte e nordeste do estado são verificados níveis maiores em comparação com a região sul (PROCERGS, 2020).

Álvares *et al.* (2014) aplicaram a classificação climática de Köppen ao território brasileiro e, segundo tal critério, o clima do Rio Grande do Sul pode ser classificado nas categorias Cfa e Cfb (subtropical úmido com clima oceânico com verão quente e com verão temperado, respectivamente), conforme mostra a Figura 2.2.

Figura 2.2 - Carta do Rio Grande do Sul a partir da classificação climática de Köppen



Fonte: Adaptado de Álvares *et al.* (2014)

Como é possível observar na Figura 2.2, a região central do Rio Grande do Sul, onde está localizada Santa Maria, pertence à classificação Cfa, ou seja, clima subtropical úmido com verão quente e com distribuição regular de chuvas ao longo do ano. Vale, também destacar, que as cidades de Cruz Alta e Ijuí, que serão abordadas futuramente, também estão localizadas na mesma região climática.

O Rio Grande do Sul é o estado do Brasil atingido tanto pelas maiores taxas de radiação solar diárias como pelas menores (MOTTA, 1991). Isso explica as maiores disparidades entre temperaturas máximas e mínimas em regiões mais afastadas do Equador em relação àquelas que dele se aproximam, conforme está exposto na Tabela 2.1, que contém valores médios de radiação solar máxima e mínima de 4 localidades do Brasil medidos em Langley (Ly) por dia.

Tabela 2.1 - Valores extremos de radiação solar para diferentes locais do Brasil

Locais	Radiação Máxima (Ly/dia)	Ocorrência	Radiação Mínima (Ly/dia)	Ocorrência	Amplitude (%)
RS (Estado)	539	Janeiro	219	Junho	246
SP (Estado)	522	Dezembro	313	Junho	167
Salvador-BA	513	Dezembro	283	Julho	182
Recife-PE	455	Novembro	303	Junho	150

Fonte: Adaptado de Tubelis e Nascimento (1980)

Acerca das características climáticas da região central do RS, especificamente da cidade de Santa Maria, a Tabela 2.2 traz o resumo das normais climatológicas de 1981 a 2010 disponibilizadas no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020).

Tabela 2.2 - Resumo dos dados climáticos de Santa Maria a partir das normais climatológicas de 1981 a 2010

Temperatura Média Compensada - Bulbo Seco (°C)	19,3
Temperatura Máxima Absoluta (°C)	40,2
Temperatura Mínima Absoluta (°C)	-2,9
Nebulosidade (décimos)	0,5
Umidade Relativa do ar (%)	77,6
Precipitação Acumulada (mm)	1796,2
Intensidade do Vento (m/s)	2,2

Fonte: INMET (2020)

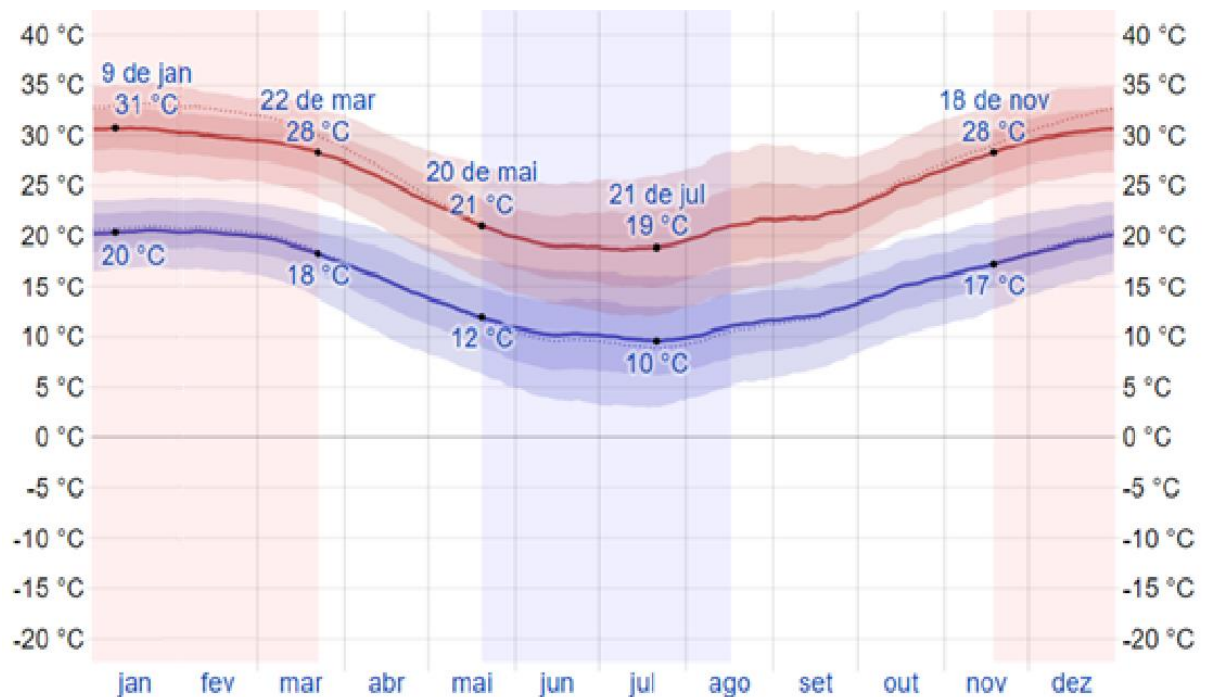
Como é visível na Tabela 2.2, as temperaturas registradas em Santa Maria podem variar entre 40 °C e 0 °C, segundo as estatísticas das normais climatológicas de 1981 a 2010. Quanto à distribuição das temperaturas ao longo dos meses do ano, os dados estão na Tabela 2.3 e na Figura 2.3. As temperaturas na Tabela 2.3 são as médias da temperatura média compensada, máxima e mínima medidas diariamente na estação meteorológica de Santa Maria, localizada no campus sede da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao longo do período de 1981 a 2010, onde a temperatura média compensada é a média entre as temperaturas medidas às 9:00, 15:00 e 21:00 mais a temperatura mínima e a máxima em cada dia, conforme INMET (2020).

Tabela 2.3 – Médias das temperaturas médias compensadas, máximas e mínimas de Santa Maria segundo normais climatológicas de 1981 a 2010

Mês	T Média (°C)	T Máx. (°C)	T Mín. (°C)
Janeiro	24,9	30,9	19,8
Fevereiro	24,0	29,9	19,4
Março	22,9	29,1	18,5
Abril	19,4	25,7	15,0
Maio	16,0	22,0	12,0
Junho	14,2	19,7	10,3
Julho	13,4	19,0	9,4
Agosto	15,1	21,4	10,5
Setembro	16,4	22,1	11,9
Outubro	19,4	25,2	14,8
Novembro	21,6	27,8	16,4
Dezembro	24,1	30,3	18,6

Fonte: INMET (2020)

Figura 2.3 - Temperaturas máximas e mínimas médias em Santa Maria/RS



Fonte: Weather Spark (2021a)

Pode-se perceber que a estação quente em Santa Maria se estende do final de novembro ao final de março, com temperaturas máximas ultrapassando os 30 °C. O dia com máxima temperatura média ao longo do período entre 1980 e 2016 é 9 de janeiro, com 31 °C. No período mais frio, entre fim de maio e metade de agosto, as temperaturas mínimas médias oscilam entre 10°C e 15°C, tendo como dia mais frio 20 de julho, com temperatura média de 10 °C.

2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Visto que o foco deste trabalho está em fenômenos influenciados pela temperatura de pavimentos, a presente seção direcionar-se-á ao tema da transferência de calor. Contudo, vale apontar que o foco deste estudo não é a aferição das propriedades térmicas dos materiais de pavimentação em campo ou em laboratório, mas sim investigar como a temperatura influencia no desempenho de pavimentos asfálticos.

A transferência de calor se dá devido à diferença de temperatura entre dois ou mais corpos, de modo a alcançar o equilíbrio térmico entre eles e suas temperaturas se igualem após um certo tempo (TIPLER e MOSCA, 2009).

Essa transferência pode ocorrer por condução, convecção ou irradiação, como será explicado adiante nessa seção.

Condução, conforme Nussenzveig (2018), é o fenômeno em que a energia térmica é transferida no interior de um meio material fluido ou sólido sem que haja movimento relativo entre as partículas desse meio. A Lei de Fourier governa a condução térmica e é representada pela Equação (2.1).

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Em que:

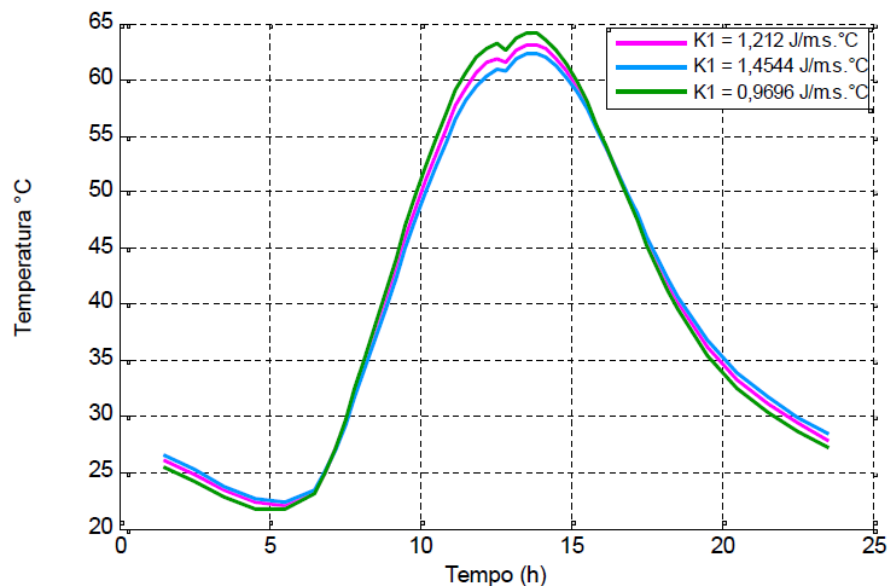
dQ = quantidade infinitesimal de energia térmica em movimento (calor) sendo transmitida em um intervalo de tempo dt pela área A (J);

dT/dx = gradiente térmico ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$);

k = condutividade térmica ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{\circ-1}$).

Tramontini (2007) realizou simulações computacionais utilizando diferentes condutividades térmicas para uma camada de revestimento asfáltico de 15 cm de espessura e plotou os resultados de temperatura na superfície ao longo de um período de 24 h, conforme mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Influência da condutividade térmica na temperatura superficial de um pavimento asfáltico



Fonte: Tramontini (2007)

De acordo com a Figura 2.4, adotando-se um valor de $1,212 \text{ J/m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ para a condutividade térmica, é prevista uma temperatura máxima de $64,5 \text{ }^\circ\text{C}$ para o pavimento asfáltico. Variando-se a condutividade em 20% para mais ou para menos, as temperaturas máximas resultantes não variam em mais de 4%.

Convecção, segundo Halliday *et al.* (2003), o calor é transmitido com movimentação de massa e ocorre através de líquidos ou gases em contato com uma superfície de temperatura mais elevada. Essa diferença de temperatura ocasiona uma diferença de densidade em pontos distintos do fluido, o que leva a porção próxima à superfície aquecida a subir e a porção mais elevada (e mais fria) a descer.

Conforme Tipler e Mosca (2009), a condutividade térmica do ar é pequena. Contudo, devido à convecção, ele se torna um meio efetivo de transferência de energia térmica quando não estiver confinado, que é o caso em que se encontram as estruturas de pavimentos.

A convecção é descrita, com as devidas simplificações, pela lei de resfriamento de Newton, dada pela Equação (2.2).

$$\frac{dQ}{dt} = Ah(T_s - T_\infty) \quad (2.2)$$

Em que:

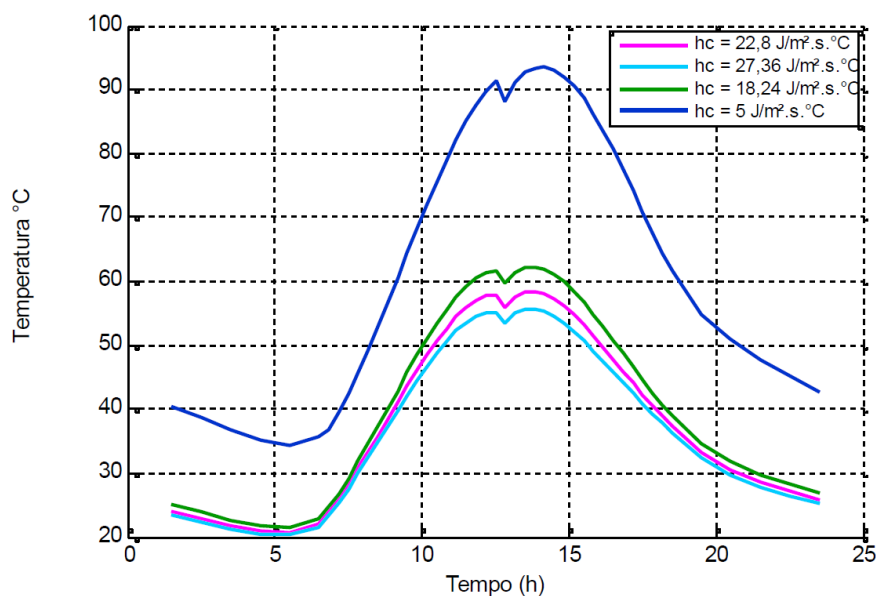
h = coeficiente de convecção ($J \cdot s^{-1} \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$);

T_s = temperatura na superfície onde ocorre a troca de calor ($^\circ C$);

T_∞ = temperatura limite longe da superfície ($^\circ C$).

Conforme Medina e Motta (2015), o coeficiente de convecção é dependente da velocidade do vento. A partir disso, Tramontini (2007) simulou a influência que a variação de tal coeficiente tem sobre a temperatura superficial e obteve resultados conforme mostra a Figura 2.5.

Figura 2.5 - Influência do coeficiente de convecção na temperatura superficial de um pavimento asfáltico



Fonte: Tramontini (2007)

O gráfico exposto na Figura 2.5 mostra que, adotando-se um coeficiente de convecção de $5,0 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ (correspondente a uma velocidade do vento quase nula), a temperatura prevista para o pavimento asfáltico pode chegar a $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ao longo do dia. Por outro lado, quando é considerado o valor de $22,8 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ (correspondente a um vento com velocidade média de $11,6 \text{ km/h}$), a temperatura máxima do pavimento não ultrapassa os $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Conforme Tramontini (2007), o coeficiente de convecção tem uma influência muito maior na transmissão de calor de um pavimento do que a condutividade térmica ou do calor específico da mistura asfáltica.

Radiação é a transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas, normalmente na faixa do infravermelho, que são emitidas por qualquer objeto aquecido (BREITHAUPT, 2018). A Equação (2.3), cuja formulação é conhecida como lei de Stefan-Boltzmann, rege a radiação térmica.

$$W = e\sigma AT^4 \quad (2.3)$$

Em que

W = energia emitida (J/s);

e = emissividade (função da superfície);

σ = constante de Stefan (igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$);

A = área da superfície (m^2);

T = temperatura absoluta (K).

De acordo com Motta (1991), a radiação solar está diretamente vinculada com a temperatura do ar e de toda a superfície da Terra. Ou seja, o balanço entre a energia absorvida e a energia refletida por um corpo influencia diretamente sua temperatura. Quanto maior for a capacidade de refletir e difundir a luz (propriedade conhecida como albedo) de um tipo de superfície, mais energia térmica fornecida por radiação será convertida em aumento de temperatura. No caso do concreto asfáltico, a sua cor aproxima o seu comportamento de um corpo negro, o que leva a superfície do pavimento asfáltico a absorver uma grande quantidade de energia (o que corresponde a uma maior emissividade) e, conseqüentemente, aumentar consideravelmente sua temperatura. Na Tabela 2.4, estão valores de albedo, calor específico e condutibilidade térmica de diferentes tipos de superfície.

Tabela 2.4 - Valores de albedo, calor específico e condutibilidade térmica para diferentes tipos de superfície

Superfície	Albedo (%)	Calor específico (cal/g · °C)	Condutibilidade Térmica (cal · g/s · cm ²)
Solo sem vegetação	7 - 20	0,22	4,00
Areia	15 - 25	0,19	0,86
Gramado	15 - 30	-	-
Neve	50 - 80	0,51	0,60
Concreto asfáltico	7	0,22	1,30
Água	6 - 40	0,94	1,40
Concreto de cimento Portland	22	0,21	2,20

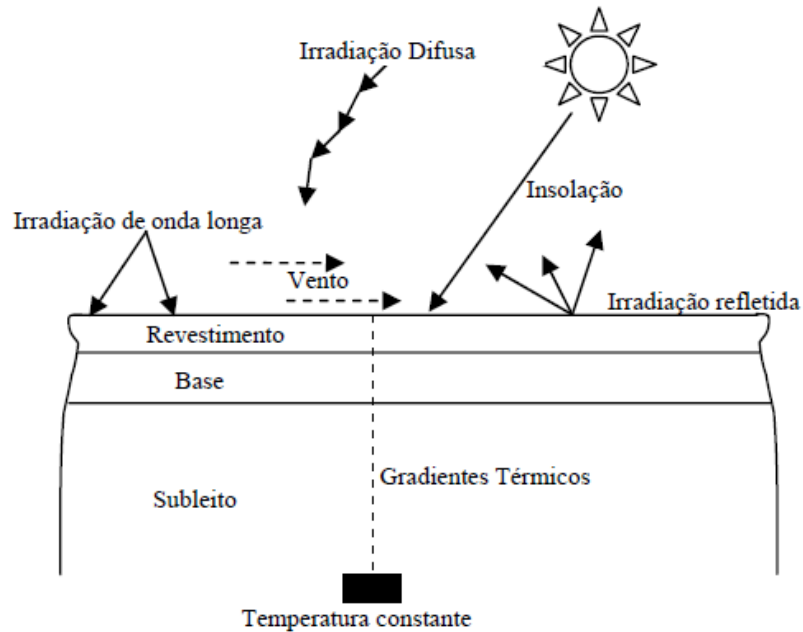
Fonte: Motta (1991)

É relevante destacar que o pequeno nível de albedo de uma superfície composta por concreto asfáltico é menor que aquele verificado no concreto de cimento Portland. A partir disso, percebe-se a razão das maiores amplitudes térmicas verificadas no primeiro caso em condições climáticas semelhantes, conforme observou Tramontini (2007).

Na Figura 2.6, estão resumidas as interações térmicas entre um pavimento asfáltico e o ambiente que o circunda. A fonte da energia térmica, conforme mostra a Figura 2.6, é a radiação solar que chega à Terra. Conforme Wolfe *et al.* (1995), essa transferência de calor pode ocorrer de forma direta através da insolação (regiões expostas diretamente à radiação solar) ou de maneira indireta, através da radiação difusa que vem refletida do ambiente (como em regiões de sombra) ou, ainda, a energia transmitida por convecção do ar em contato com a superfície do revestimento (que é influenciada pela velocidade do vento). Em contrapartida, a superfície aquecida emite energia térmica segundo a lei descrita na Equação (2.3).

Brown (1974) cita, além da exposição ao vento, a influência da chuva e a textura da superfície da camada de revestimento como fatores que influenciam na relação entre a temperatura atmosférica e a temperatura do pavimento.

Figura 2.6 - Esquema das interações térmicas entre um pavimento asfáltico e o ambiente



Fonte: Adaptado de Wolfe *et al.* (1995)

2.3 MODELAGEM DA TEMPERATURA EM PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

O asfalto é um material cuja viscosidade varia com a temperatura. Consequentemente, sua deformabilidade e rigidez são fortemente influenciadas pela temperatura do ambiente a que ele está submetido (MEDINA e MOTTA, 2015).

Nessa seção, serão expostas pesquisas voltadas à medição da temperatura de pavimentos asfálticos e à sua modelagem. Vale ressaltar que, sempre que disponíveis, foram fornecidos os parâmetros estatísticos de cada modelo.

2.3.1 Barber (1957)

O trabalho de Barber (1957) foi um dos precursores em escala internacional na área e teve como escopo a apresentação de relações empíricas entre a temperatura no pavimento com fatores meteorológicos, a saber: vento, precipitação, temperatura do ar e radiação solar. Com a

obtenção de tais relações, segundo o autor, seria possível extrapolar temperaturas medidas para outros locais e tempos distintos. Foram comparadas as temperaturas medidas na superfície de um pavimento na cidade norte-americana de Hybla Valley, no estado da Virginia, com os resultados obtidos pelo modelo apresentado na Equação (2.4).

$$T = T_M + T_V \frac{H e^{-xC}}{\sqrt{(H + C)^2 + C^2}} \operatorname{sen} \left(0,262t - xC - \operatorname{arc} \tan \frac{C}{H + C} \right) \quad (2.4)$$

Em que:

T = temperatura do pavimento ($^{\circ}\text{C}$);

T_M = temperatura efetiva média do ar ($^{\circ}\text{C}$);

T_V = máxima variação da temperatura em relação à média ($^{\circ}\text{C}$);

t = tempo a partir do início de um ciclo (h);

x = profundidade abaixo da superfície (ft);

$H = h/k$, em que:

h = coeficiente de superfície ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \text{h}^{-1} \text{C}^{-1}$);

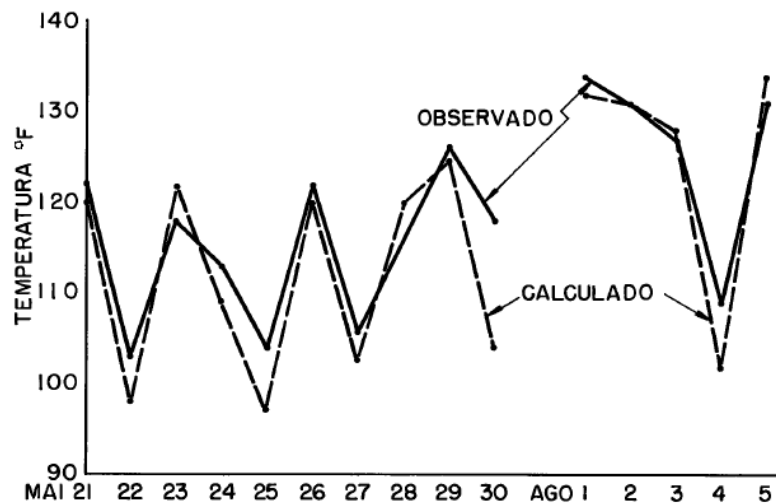
k = condutividade ($\text{J} \cdot \text{m}^{-1} \text{h}^{-1} \text{C}^{-1}$);

$C = \sqrt{0,131/c}$, em que:

c = difusividade ($\text{m}^2 \text{h}^{-1}$);

Os resultados da comparação estão plotados na Figura 2.7. Como possíveis explicações para as diferenças observadas entre medições e previsões, foram citadas condições climáticas instáveis que ocorreram durante as medições. Não foram apresentados pelo autor indicadores estatísticos relativos ao modelo.

Figura 2.7 - Comparação de temperaturas medidas e calculadas por Barber (1957)



Fonte: Adaptado de Barber (1957)

2.3.2 Wood (1998)

Wood (1998), através de uma pesquisa realizada na Nova Zelândia, cita como foram medidas temperaturas em revestimentos asfálticos localizados em 4 cidades do país durante o período de 1 ano e a subsequente correlação com parâmetros meteorológicos obtidos nas estações mais próximas, sendo eles: temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento.

Para o cálculo das temperaturas, foi utilizado um modelo de diferenças finitas com análise unidimensional e espaçamento de 5 cm entre pontos de análise a partir das Equações (2.5) a (2.8).

$$H_s + H_l - H_r - H_c = -k \frac{\partial T_l}{\partial z} \quad (2.5)$$

$$H_r = \varepsilon \sigma T_l^4 \quad (2.6)$$

$$H_l = 0,53(1 + 0,22M^2)(T_a/100)^6 \quad (2.7)$$

$$H_c = [0,82(T_1 + T_a)^{0,3}U^{0,7} + 0,68(T_1 - T_a)^{0,3}](T_1 - T_a) \quad (2.8)$$

Em que:

H_s = ganho por radiação solar;

H_l = ganho por radiação de onda longa;

H_r = perda por radiação de onda longa;

H_c = perda por convecção;

k = condutividade térmica;

T_1 = temperatura na superfície;

z = profundidade;

ε = emissividade da superfície;

σ = constante de Stefan-Boltzmann;

M = fração do céu coberta por nuvens;

U = velocidade do vento a uma altura de 2 m;

T_a = temperatura do ar.

Vale destacar que, segundo Wood (1998), as propriedades térmicas dos materiais foram obtidas via tentativa e erro dentro de limites razoáveis para cada uma. Com as análises, foram obtidos resultados satisfatórios para os três pavimentos, a não ser para a temperatura superficial dos revestimentos de 5 e 15 cm. Não foram fornecidos parâmetros estatísticos pelo autor.

2.3.3 Diefenderfer (2002)

No trabalho de Diefenderfer (2002), foram realizadas medições de temperatura e umidade em um trecho experimental de 1,3 km de pavimento flexível localizado em Blacksburg, Virginia.

Os termopares foram posicionados no fundo da camada asfáltica, a 38 mm de profundidade, além de 20 outras profundidades até chegar a 1,24 m de profundidade, totalizando 115 termopares instalados que coletaram as temperaturas de fevereiro de 2000 a maio de 2001 continuamente com intervalos de 15 minutos entre cada dado.

Como resultado, foram obtidas correlações tanto para a temperatura máxima (Equação (2.9)) quanto para a temperatura mínima (Equação (2.10)) do pavimento ao longo de um dia.

$$y = 1,1265x_1 + 0,001820x_2 + 0,0839x_3 - 53,5247x_4 + 6,0775 \quad (2.9)$$

$$y = 0,9608x_1 + 0,0641x_2 - 0,5616x_3 + 9,4893x_4 + 27,5986 \quad (2.10)$$

Em que:

y = previsão de temperatura do pavimento ($^{\circ}\text{C}$);

x_1 = temperatura ambiente máxima (no caso da Equação (2.9) ou mínima (Equação (2.10) diária;

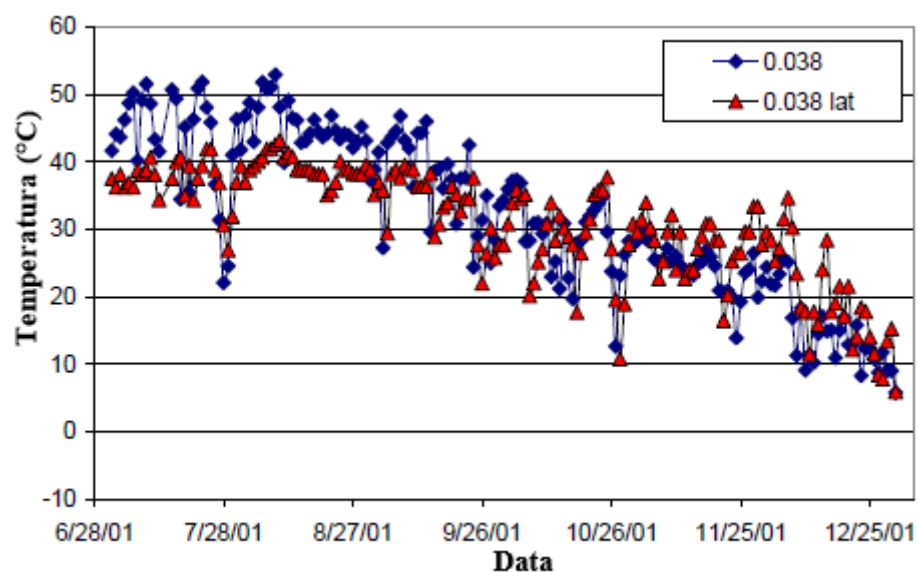
x_2 = dia do ano (de 1 a 365);

x_3 = latitude ($^{\circ}$);

x_4 = profundidade a partir da superfície (m).

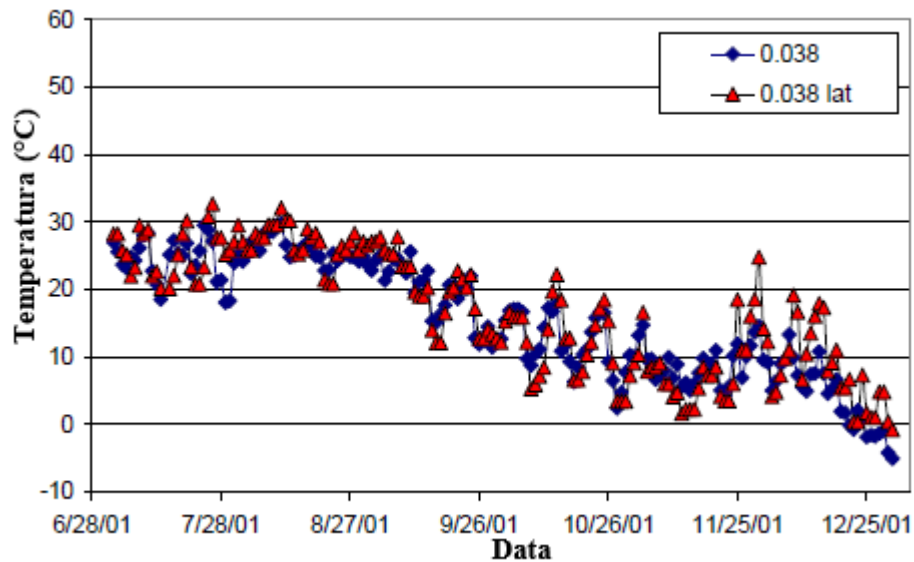
Para as equações supracitadas, foram obtidos, respectivamente, coeficientes de determinação de 0,7936 e 0,8663. Na Figura 2.8 e na Figura 2.9, estão plotados os valores das temperaturas medidas e das previsões de temperatura a partir dos modelos.

Figura 2.8 -Comparação entre dados medidos (azul) e calculados (vermelho) de temperatura máxima diária



Fonte: Adaptado de Diefenderfer (2002)

Figura 2.9 - Comparação entre dados medidos (azul) e calculados (vermelho) de temperatura mínima diária



Fonte: Adaptado de Diefenderfer (2002)

2.3.4 Khan *et al.* (2019)

As pesquisas efetuadas por Khan *et al.* (2019) foram voltadas à obtenção de uma correlação entre a temperatura do revestimento asfáltico de um pavimento e parâmetros meteorológicos. Os dados meteorológicos foram medidos em uma rodovia próxima à cidade norte-americana de Albuquerque de outubro de 2012 a outubro de 2013 e os modelos propostos foram validados com os dados climáticos de outubro de 2014 a junho de 2015.

Através de uma análise não-linear de mínimos quadrados, foi obtido um modelo para as 24 horas do dia (Equação (2.11)) e, devido às grandes diferenças entre a radiação solar incidente no dia e na noite, foram propostas correlações especificamente para cada uma dessas situações, que não serão abordadas nessa revisão.

$$\begin{aligned}
 T_s = & 26,081 - 0,844w + 0,479T_a - 0,187R_H - 0,0173S + 0,0042254wT_a \quad (2.11) \\
 & + 0,00565wR_H + 0,0016wS + 0,00342T_aR_H + 0,000117T_aS \\
 & + 5,7029 \times 10^{-5}R_HS + 0,00425T_a^2 + 1,9125 \times 10^{-5}S^2
 \end{aligned}$$

Em que:

T_s é a temperatura na superfície (°F);

w = velocidade do vento (m/s);

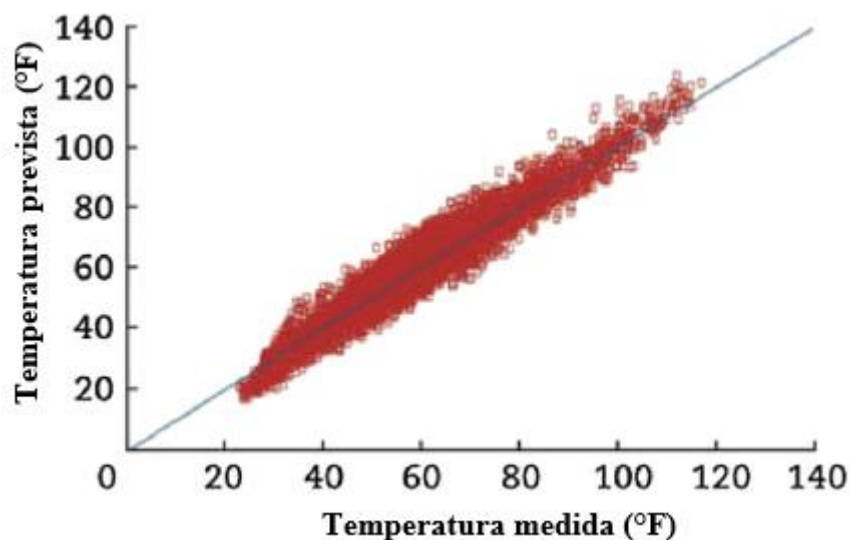
T_a = temperatura do ar (°F);

R_H = umidade relativa;

S = radiação solar (W/m²).

A Equação (2.11) exposta apresenta R^2 de 0,973 e raiz quadrada do erro médio igual a 2,28 °C (4,12 °F). Na Figura 2.10, está a comparação entre as temperaturas calculadas pelo método e medidas em campo. Além disso, Khan *et al.* (2019) compararam os resultados da correlação com o modelo utilizado no *software* AASHTOWare e aqueles exibiram menor erro se comparados aos valores medidos em campo.

Figura 2.10 - Comparação entre temperatura medida e prevista por Khan *et al.* (2019)

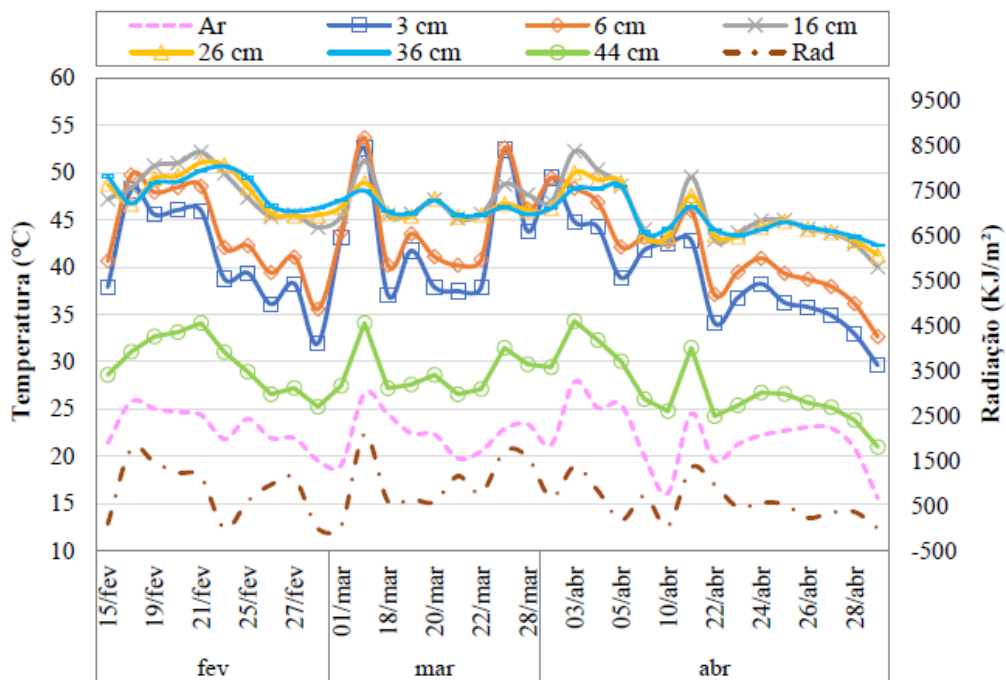


Fonte: Adaptado de Khan *et al.* (2019)

2.3.5 Souza *et al.* (2019)

Souza *et al.* (2019) analisaram um trecho monitorado em Araranguá/SC, onde foram medidas temperaturas mediante 6 termopares do tipo K instalados ao longo de diversas profundidades do pavimento. Tais temperaturas foram coletadas de 15 de fevereiro de 2019 a 29 de abril do mesmo ano e comparadas com leituras de temperatura atmosférica, radiação solar e umidade realizadas na estação A867 do mesmo município. (Figura 2.11). Contudo, os autores escolheram correlacionar a temperatura do pavimento somente com a temperatura atmosférica a partir das Equações (2.12) e (2.13), que indicam o ciclo de aquecimento e de resfriamento, respectivamente, do pavimento.

Figura 2.11 - Comparação de Souza *et al.* (2019) entre temperaturas medidas e radiação solar



Fonte: Souza *et al.* (2019)

$$y = -0,1703x^2 + 8,7154x - 64,965 \quad (2.12)$$

$$y = 0,385x^2 - 16,184x + 204,2 \quad (2.13)$$

Em que:

y = temperatura do pavimento (°C);

x = temperatura atmosférica (°C).

Os coeficientes de correlação para equação do ciclo de aquecimento foi de 0,92 e, para o ciclo de resfriamento, de 0,93.

2.3.6 Blass (2011)

O trabalho de Blass (2011), que foi utilizado como base para os dados de temperatura abordados na presente pesquisa, foi desenvolvido na cidade de Ijuí/RS. Em seu estudo, o objetivo era modelar o comportamento de um pavimento asfáltico com base em diferenças finitas e corrigir os dados de rigidez e coeficiente de Poisson a partir de temperaturas medidas *in loco*.

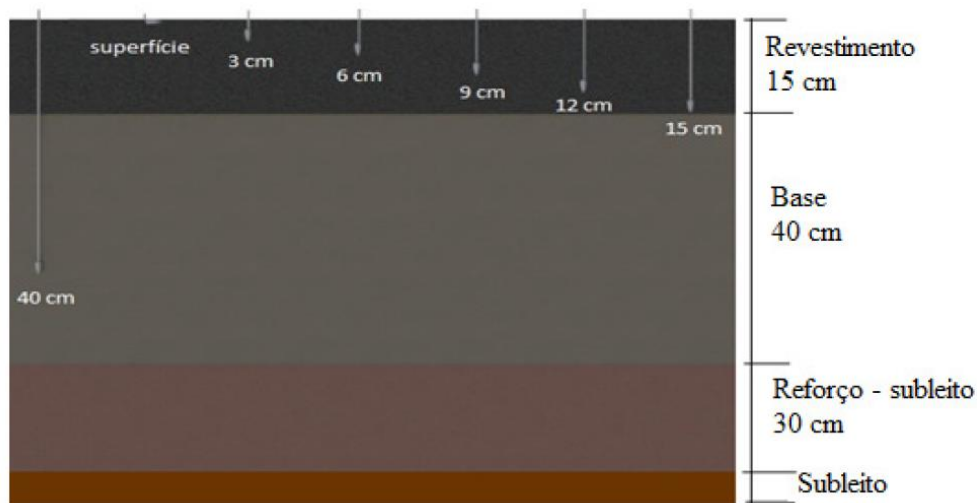
Para tal, foram instalados sensores de temperatura do tipo termopares (Figura 2.12) em um pavimento flexível no Laboratório da Engenharia Civil da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ). A estrutura do pavimento está representada na Figura 2.13.

Figura 2.12 - Exemplo de sensor digital de temperatura usado por Blass (2011)



Fonte: Blass (2011)

Figura 2.13 - Perfil do pavimento usado por Blass (2011) com indicação das profundidades de medição da temperatura



Fonte: Blass (2011)

Conforme indicado na Figura 2.13, o pavimento que Blass (2011) utilizou era constituído por camada de revestimento de pré-misturado a frio com 15 cm de espessura, camada de base de brita graduada simples com 40 cm, reforço do subleito de macadame seco com 30 cm e subleito argiloso. Foram instalados 6 termopares na camada de revestimento, começando pela superfície até o fundo da camada a cada 3 cm de profundidade, além de um termopar a 40 cm de profundidade, no interior da camada de base. Cada um dos 7 termopares foi instalado em um orifício com 1 cm de diâmetro, que foi posteriormente preenchido com pó de pedra e selado com silicone na superfície. A Figura 2.14 mostra o local onde os sensores foram instalados no pavimento.

As medições foram realizadas por Blass (2011) durante todo o ano de 2010 para se observar a variação da temperatura do pavimento ao longo do ano. A aquisição de temperatura foi realizada durante os dez dias com maior insolação de cada mês do ano. O horário das medições foi das 13:00 às 16:00 (com o objetivo de estimar a temperatura máxima do dia) e com intervalos de 20 minutos entre cada medição.

A partir das temperaturas medidas em campo, Blass (2011) obteve, por regressão múltipla, modelos que correlacionam a temperatura medida entre os horários de 13:00 e 16:00 com a profundidade (z) em metros e o tempo (t) medido em segundos a partir das 13:00. Os modelos, assim como os seus respectivos coeficientes de correlação, estão na Tabela 2.5.

Figura 2.14 - Sensores utilizados por Blass (2011) instalados no pavimento



Fonte: Blass (2011)

Tabela 2.5 - Modelos de temperaturas obtidos por Blass (2011)

Mês	Modelo	R ²
Janeiro	$T(z,t) = 0,00033t - 2,03z + 64,92$	0,918
Fevereiro	$T(z,t) = 0,00028t - 2,28z + 68,31$	0,922
Março	$T(z,t) = 0,00031t - 2,11z + 62,05$	0,945
Abril	$T(z,t) = 0,00021t - 1,85z + 53,51$	0,934
Mai	$T(z,t) = 0,00025t - 1,73z + 45,06$	0,923
Junho	$T(z,t) = 0,00033t - 1,51z + 37,20$	0,961
Julho	$T(z,t) = 0,00026t - 1,59z + 40,57$	0,943
Agosto	$T(z,t) = 0,00041t - 1,58z + 39,31$	0,913
Setembro	$T(z,t) = 0,00042t - 1,95z + 49,56$	0,941
Outubro	$T(z,t) = 0,00036t - 2,26z + 58,62$	0,946
Novembro	$T(z,t) = 0,00036t - 2,41z + 64,42$	0,964
Dezembro	$T(z,t) = 0,00039t - 2,32z + 58,62$	0,957

Fonte: Blass (2011)

Conforme mostra a Tabela 2.5, todos os modelos evidenciaram que a tendência da temperatura para todos os meses é de aumentar ao longo do tempo decorrido entre 13:00 e 16:00 e de diminuir à medida que a profundidade aumenta. Destaca-se também que todos os valores de R² foram superiores a 0,9.

Para recorrer a mais exemplos de medição e previsão de temperatura de pavimentos da região central do Rio Grande do Sul, pode-se pesquisar os trabalhos de Hellmann (2008), Killp (2004) e Tramontini (2007).

Também recomenda-se consultar trabalhos como de Islam *et al.* (2015), Lukanen *et al.* (2000) e Solaimanian e Kennedy (1993) como referências internacionais no assunto.

2.3.7 EICM

O *Enhanced Integrated Climatic Model* (EICM) é um modelo desenvolvido nos Estados Unidos e incorporado no método de dimensionamento empírico-mecanicista (MEPDG) de 2004 desenvolvido pela NCHRP para prever a temperatura, umidade, congelamento e performance de drenagem de pavimentos asfálticos e de concreto de cimento Portland (ONGEL e HARVEY, 2004).

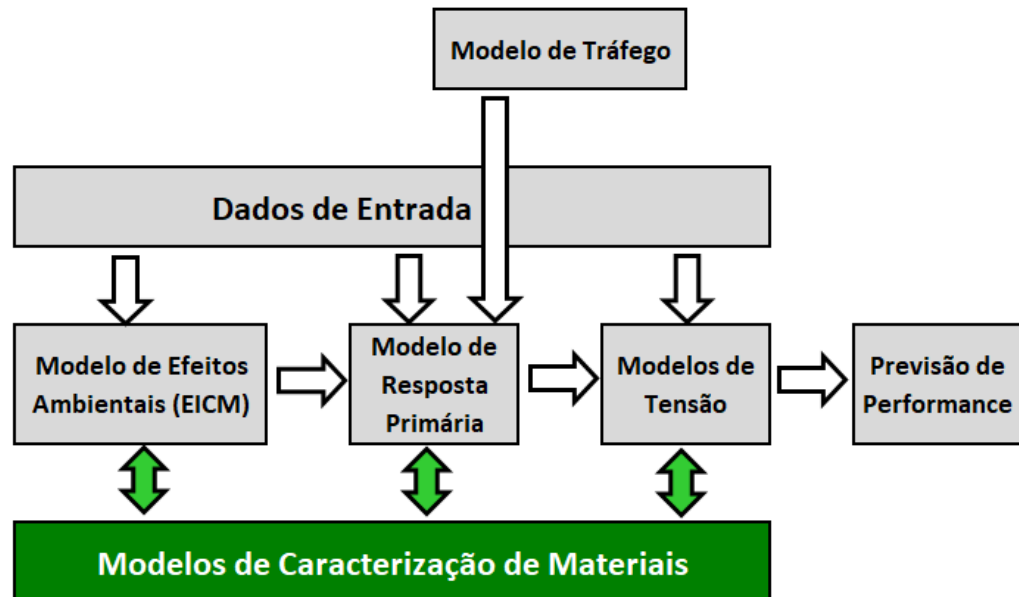
De acordo com NCHRP (2004a), o modelo utiliza, como dados de entrada para o cálculo de tais variáveis, a temperatura do ar, velocidade do vento, porcentagem de incidência da luz solar, precipitação e umidade relativa medidos a cada hora durante até 10 anos consecutivos.

A partir disso, os dados de saída são calculados, também, para cada hora e ao longo de diferentes profundidades do pavimento.

Observando o esquema da Figura 2.15, percebe-se que o EICM recebe os dados de entrada referentes ao clima anteriormente listados e, com isso, é gerada a resposta do pavimento (tensões, deformações e deslocamentos) com a correção de seus parâmetros mecânicos (como módulo de resiliência). Após isso, a previsão de performance correlaciona a fase mecanicista do modelo com as observações de patologias em campo, que é a etapa empírica do processo.

O modelo de transferência de calor, a partir do qual o EICM prevê a temperatura do pavimento, segundo NCHRP (2004a), está expresso na Equação (2.14).

Figura 2.15 - Resumo do esquema de funcionamento do EICM



Fonte: Adaptado de NCHRP (2004b)

$$Q_s + Q_l \pm Q_c \pm Q_h \pm Q_g = 0 \quad (2.14)$$

Em que:

Q_s = valor líquido de radiação de onda curta recebida;

Q_l = valor líquido de radiação de onda longa recebida;

Q_c = calor transferido por convecção;

Q_h = efeitos da transpiração, condensação, evaporação e sublimação;

Q_g = energia absorvida pelo solo.

Na Equação (2.14), os dois primeiros termos, Q_s e Q_l , podem ser calculados mediante a Equação (2.15) e a Equação (2.16), respectivamente.

$$Q_s = a_s R^* \left[A + B \frac{S_c}{100} \right] \quad (2.15)$$

$$Q_l = \sigma \left(T_{ar} \left(0,77 - \frac{0,28}{10^{0,074p}} \right) - \epsilon T_s^4 \right) \left[1 - \frac{N(100 - S_c)}{100} \right] \quad (2.16)$$

Em que:

a_s = absorptividade de onda curta da superfície do pavimento;

R^* = radiação extraterrestre incidente em uma superfície horizontal exterior à atmosfera, dada em função da latitude e da época do ano;

A, B = constantes que levam em conta a dispersão difusa e a adsorção de energia pela atmosfera;

S_c = percentagem de incidência de luz solar, dada em função da cobertura das nuvens;

σ = constante de Stefan-Boltzmann;

T_{ar} = temperatura do ar ($^{\circ}R$);

p = pressão de vapor do ar (mmHg);

ε = emissividade do pavimento;

T_s = temperatura da superfície do pavimento ($^{\circ}R$);

N = fator de correção com base na cobertura das nuvens.

O termo Q_c da Equação (2.14) pode ser obtido por meio da Equação (2.17). Quanto ao termo Q_h , sua influência pode ser negligenciada, segundo NCHRP (2004a) porque seus efeitos são irrelevantes no balanço final de energia. Por fim, a parcela de energia absorvida pelo solo (Q_g) é utilizada em aplicações relativas ao fenômeno de gelo e degelo do subleito.

$$Q_c = 122,93[0,00144T_m^{0,3}U^{0,7} + 0,00097(T_s - T_{ar})^{0,3}](T_{ar} - T_s) \quad (2.17)$$

Em que:

T_m = média da temperatura da superfície do pavimento e do ar ($^{\circ}K$);

U = velocidade média do vento (m/s);

T_s = temperatura da superfície do pavimento ($^{\circ}C$);

T_{ar} = temperatura do ar ($^{\circ}C$).

Os dados de temperatura obtidos pelo EICM foram utilizados na presente pesquisa para fazer extrapolações de medições realizadas na região de Santa Maria/RS, como especificado na seção 3.1.1.

2.4 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO COMPORTAMENTO MECÂNICO E DESEMPENHO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Nessa seção, será feita uma revisão de tópicos relevantes para a compreensão da influência da temperatura na resposta mecânica de pavimentos asfálticos e no processo de danificação por fadiga.

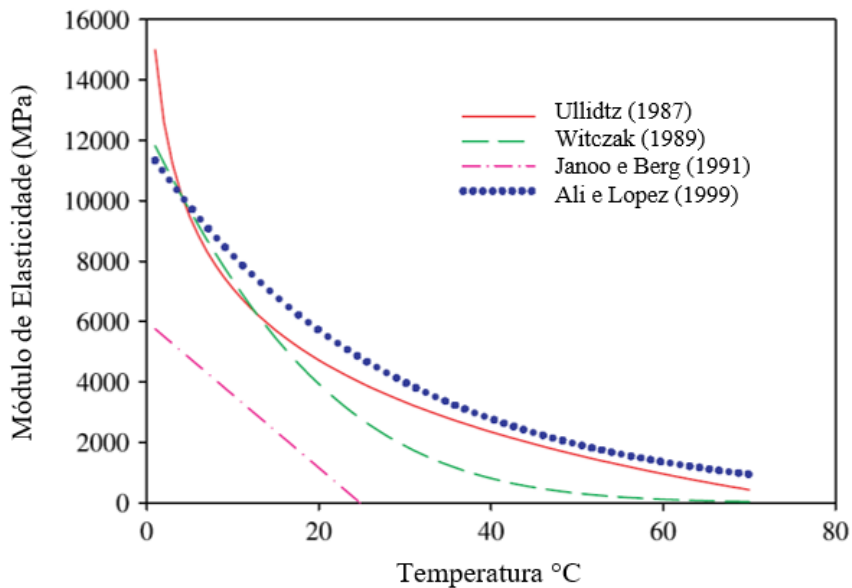
2.4.1 Rigidez de misturas asfálticas

Segundo Kim (2009), o período de vida de um pavimento asfáltico é menos influenciado por sua idade cronológica do que pela sua exposição às condições ambientais que o cercam, como o oxigênio atmosférico, radiação solar e aquecimento. Dessa forma, se dá o processo denominado envelhecimento e o material asfáltico se aproxima cada vez mais do fim de sua vida útil.

O cimento asfáltico de petróleo (CAP), o ligante utilizado na maioria dos pavimentos rodoviários do Brasil, é um material que tem comportamento viscoso. Devido a isso, pode-se dizer que ele é termossuscetível, ou seja, suas propriedades reológicas e mecânicas são extremamente influenciadas pela temperatura em que se encontra o material (BALBO, 2007; BODIN *et al.*, 2014).

Alkasawneh *et al.* (2007) resumem diversos modelos que relacionam o módulo de resiliência (chamado de módulo de elasticidade de forma genérica pelos autores) de concretos asfálticos com sua temperatura (Figura 2.16). Pode-se perceber que a rigidez de concretos asfálticos (o que se verifica em outros materiais asfálticos) diminui à medida que a temperatura aumenta, tendo em vista a natureza viscosa já citada desses materiais. Para a faixa de temperaturas entre 20 °C e 60 °C, que é frequentemente observada em pavimentos asfálticos em campo, pode-se ver que a rigidez do revestimento pode até triplicar conforme os modelos apresentados

Figura 2.16 - Correlações entre a temperatura e a rigidez de concretos asfálticos



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

Qiao et al. (2020a) analisaram a influência de diversos fatores climáticos, como temperatura, precipitação, cobertura de nuvens e velocidade do vento e destacam que a temperatura (especialmente os valores de pico) é o fator que exerce a maior importância na performance de pavimentos asfálticos.

Para maiores informações sobre a influência da temperatura no comportamento mecânico e no desempenho de pavimentos asfálticos, pode-se consultar os trabalhos de Silva et al. (2008), Lu et al. (2013), Underwood et al. (2017), Ktari et al. (2020) e Qiao et al. (2020b).

Ainda neste trabalho, será discorrido sobre a influência da temperatura a partir do modelo VECD, que combina os efeitos da viscoelasticidade com a danificação por fadiga, conforme consta na seção 2.4.3.

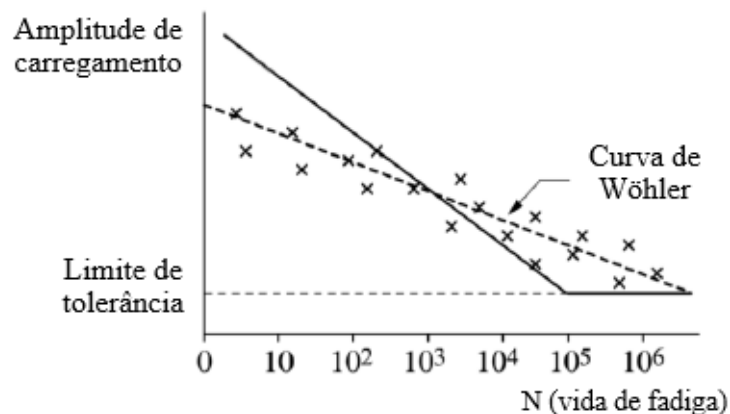
2.4.2 Fadiga em Misturas Asfálticas

Fadiga é o fenômeno de degradação de um material sob a ação repetitiva de esforços a níveis inferiores àqueles que a romperiam em estado de carregamento monotônico. Ou seja, a aplicação cíclica de cargas degrada paulatinamente o material através de fissuras microscópicas que, quando geram descontinuidades macroscópicas, levam à ruptura. (ASTM, 1979; BALBO, 2007; DI BENEDETTO e CORTÉ, 2005; NGUYEN, 2009).

Segundo Kim *et al.* (2003), a compreensão precisa da fadiga no comportamento de misturas asfálticas é um pré-requisito para a evolução nos projetos de pavimentos e, conseqüentemente, em seu desempenho.

A fadiga começou a ser estudada na Alemanha para entender o comportamento de correntes metálicas utilizadas em atividades de mineração. Uma das formas mais incipientes de entendimento da fadiga em misturas asfálticas foi através da chamada “curva de Wöhler”, proposta pelo autor de mesmo nome em 1870 (SCHÜTZ, 1996). Tal curva mostra a relação entre o número de ciclos aplicados até a ruptura por fadiga e a amplitude das cargas (Figura 2.17)

Figura 2.17 - Exemplo de curva de Wöhler



Fonte: Adaptado de Di Benedetto e Corté (2005)

A formulação geral elaborada por Wöhler é expressa conforme a Equação (2.18):

$$S = aN^{-b} \quad (2.18)$$

Em que:

S = intensidade da carga;

N = vida à fadiga;

a, b = constantes de regressão.

Analisando o gráfico da Figura 2.17, pode-se ver que, quanto maior o número de solicitações, menor será a amplitude de cargas que o material suportará. Ou seja, a vida à fadiga, que é o número de solicitações admissível segundo o critério de ruptura por fadiga, diminui quanto maior a intensidade dos esforços no concreto asfáltico.

É válido comentar que o conceito de vida à fadiga é usado também para descrever o fator de dano fadiga através da razão entre o número de ciclos aplicados e o número de ciclos que levam à falha por fadiga (N/N_f), conforme será mostrado na seção 2.5.1.

Conforme apresentado por Schuster (2018), a formulação de Wöhler não é suficiente para descrever a fadiga em pavimentos asfálticos devido à grande complexidade dos carregamentos rodoviários, tanto em amplitude como em frequência, além da influência da temperatura ambiente.

Segundo Mangiafico (2014), para levar em consideração a aplicação de cargas com diferentes intensidades, que é o que se verifica em pavimentos asfálticos, pode ser utilizada a Lei de Palmgren-Miner, cuja formulação é comumente usada na formulação do conceito de dano e é descrita pela Equação (2.19).

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.19)$$

Em que:

n_i = número de aplicações de carga;

N_i = número de solicitações admissível.

O significado da Equação (2.19) é que o acúmulo de dano ocorre de forma linear. Conforme Mangiafico (2014), tal formulação pode ser considerada como uma aproximação, pois não leva em consideração o histórico de carregamentos. Todavia, é usada amplamente devido à sua simplicidade.

Desde trabalhos como o de Hveem e Carmany (1948), os pesquisadores na área de Engenharia de Pavimentos têm correlacionado trincas nos revestimentos asfálticos de pavimentos ao fenômeno de fadiga.

Tal observação coloca o critério de resistência ao cisalhamento utilizado nos primeiros métodos de dimensionamento de pavimentos, como do *U. S. Army Corps of Engineers*

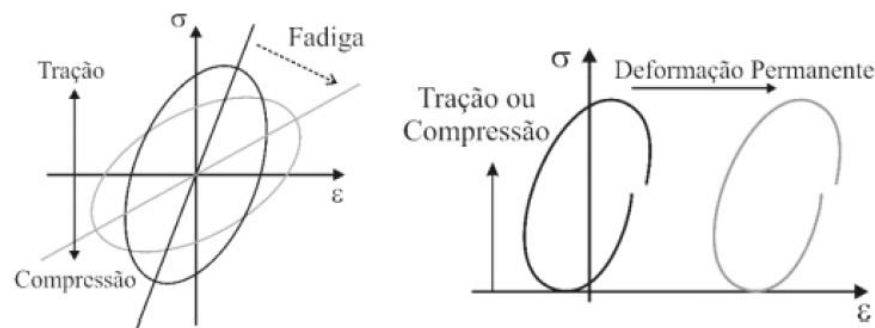
(USACE), em segundo plano, pois verifica-se que, com o aumento do volume de tráfego que ocorreu ao longo de todo o século XX e que continua no início do século XXI, o fenômeno de fadiga se destaca em pavimentos em todo o mundo (BERNUCCI *et al.*, 2008; NCHRP, 2011).

Além disso, é vasta a literatura que atesta que a fadiga é uma das principais formas de ruína de pavimentos asfálticos (BABADOPULOS *et al.*, 2017; DI BENEDETTO *et al.*, 2004; PINTO, 1991; SABOURI e KIM, 2014; SHAN *et al.*, 2010).

Conforme Di Benedetto *et al.* (2004), os pavimentos asfálticos são sujeitos a carregamentos cíclicos quando da passagem de veículos e, se ultrapassarem certo limite, o material perde sua rigidez de forma gradativa até sua ruptura, isto é, as deformações para um mesmo nível de tensão vão aumentando à medida que a degradação por fadiga toma lugar.

A Figura 2.17 ilustra a diferença entre as alterações causadas pela fadiga e pela deformação permanente no gráfico de tensão versus deformação de um material viscoelástico.

Figura 2.18 - Efeito da fadiga e da deformação permanente na rigidez de material viscoelástico

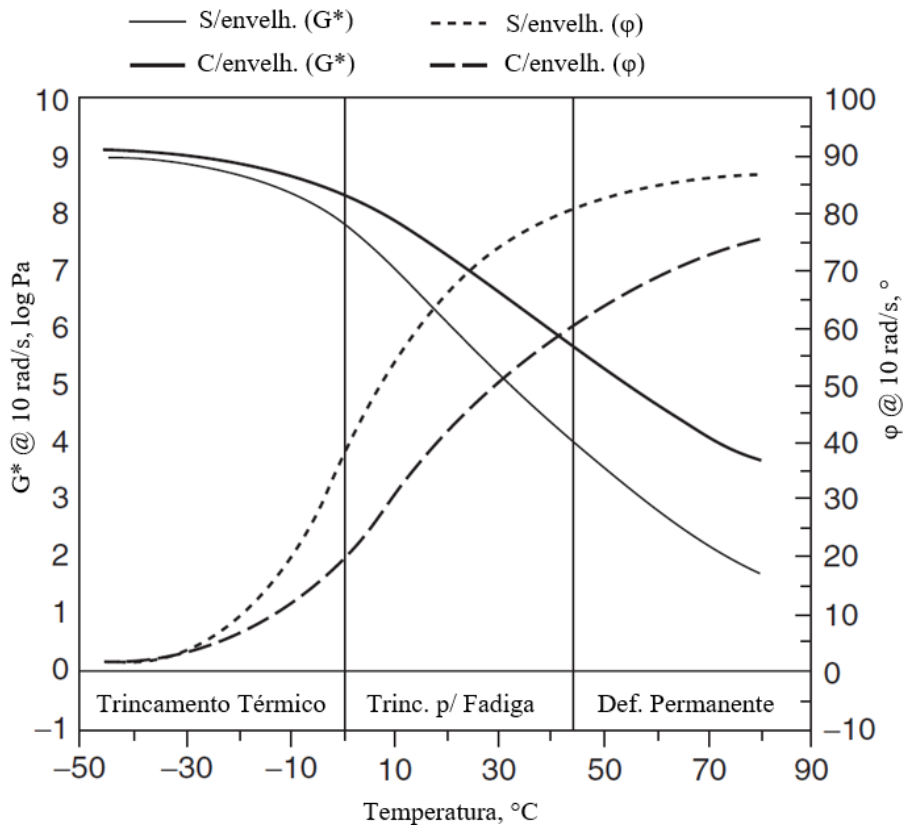


Fonte: Adaptado de Di Benedetto *et al.* (2004)

Di Benedetto *et al.* (2004) trazem uma explicação acerca dos dois momentos (fases) da evolução da fadiga. Na fase de iniciação, o material ainda apresenta continuidade e, dessa forma, a danificação ocorre uniformemente em toda a sua extensão através de trincas microscópicas. A partir da coalescência das microfissuras, surgem macro fissuras e o meio passa a ser descontínuo. A partir dessa fase de propagação, o material deve ser estudado a partir de outras leis, o que torna um modelo universal para a fadiga um tremendo desafio. Sabouri (2014) se refere à primeira e segunda fase como de pré-localização e pós-localização, respectivamente.

Conforme NCHRP (1990), além de variáveis relativas à composição das misturas asfálticas, como volume de vazios e teor de ligante, a temperatura também exerce influência sobre a fadiga em pavimentos asfálticos. A Figura 2.19 elucida a influência da temperatura sobre o trincamento por fadiga de ligantes asfálticos.

Figura 2.19 - Influência da temperatura sobre o módulo dinâmico e ângulo de fase de ligantes asfálticos

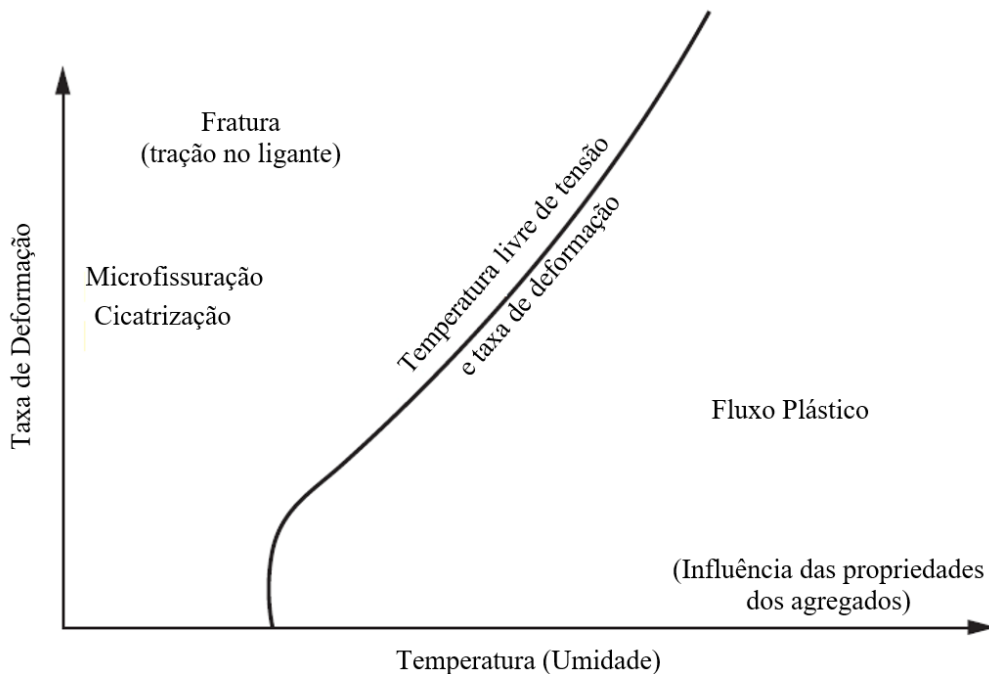


Fonte: Adaptado de Kim (2009)

A faixa entre 0 e 40 $^\circ\text{C}$, que é o intervalo onde se situam as médias de temperatura de pavimentos em clima subtropical, conforme será comentado na seção 3.1, é caracterizada pela predominância da fadiga como o mecanismo de ruptura em ensaios de ligantes.

Analisando a influência da temperatura sobre os mecanismos de danificação de concretos asfálticos, a Figura 2.20 traz o gráfico que correlaciona a temperatura (juntamente com a umidade) e a taxa de deformação com o tipo de danificação do material.

Figura 2.20 - Influência da temperatura e taxa de deformação na danificação de concretos asfálticos



Fonte: Adaptado de Kim (2009)

Conforme Kim (2009), para qualquer temperatura, o concreto asfáltico apresentará comportamento mais frágil para altas taxas de deformação e mais dúctil para baixas taxas de deformação. Da mesma forma, para cada taxa de deformação, haverá uma temperatura a partir da qual não haverá acúmulo significativo de tensões. À esquerda da curva que representa o estado livre de tensão na Figura 2.20, o concreto asfáltico tende a ser mais frágil e apresentar ruptura por fadiga, enquanto que, à direita da curva, ele tem respostas mecânicas mais dúcteis e tende a deformar plasticamente. Com isso, fica evidente que, a temperaturas menores, a fadiga tende a se manifestar com mais intensidade em pavimentos asfálticos.

Segundo Kuchiishi et al. (2019), a adoção arbitrária de temperaturas elevadas no processo de dimensionamento de um pavimento pode levar a previsões superestimadas de desempenho à fadiga. Por outro lado, temperaturas abaixo das reais podem subestimar tal previsão.

Outro fator preponderante na fadiga de misturas asfálticas é o tipo de ligante. Qabur (2018) destaca que a adição de polímeros como estireno-butadieno-estireno (SBS) têm uma menor taxa de propagação de microfissuras devido às propriedades elásticas do polímero, o que favorece o desempenho à fadiga.

O melhor desempenho à fadiga de misturas com asfalto borracha é atestado por Kuchiishi et al. (2019). Segundo os autores, o polímero forma uma rede contínua na estrutura da mistura que permite maiores deformações antes da ruptura por fadiga.

Quanto à adição de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), os resultados obtidos na literatura não apresentam um consenso. Pesquisas como a de Mannan et al. (2015) atestam uma diminuição da resistência à fadiga com a adição de 35% de RAP, ao passo que Xiao et al. (2011) não relatam diferenças significativas de desempenho à fadiga entre ligantes sem adição de RAP e com 30% de adição. Além disso, o desempenho de tais materiais depende de outros fatores, como o processo de adição de RAP e o uso de CAPs modificados.

Conforme Baek (2010) e NCHRP (2010), a fissuração por fadiga pode ser classificada em relação ao local em que ela se inicia quando se trata de uma camada de revestimento asfáltico. Quando ela inicia no fundo da camada e avança até a superfície, tem-se uma fissuração do tipo *bottom-up*. Quando a danificação tem início no topo da camada e se propaga até o fundo da camada, se trata de fissuração *top-down*.

Fissuras do tipo *bottom-up* são tradicionalmente associadas a tensões de tração que surgem na flexão devido à passagem dos veículos. Sua tendência, de modo geral, é intensificar-se com a diminuição da temperatura (BAEK, 2010; PARK, 2013; PARK e KIM, 2013).

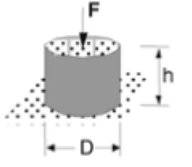
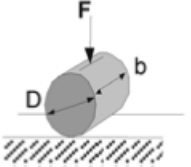
Quanto às fissuras *top-down*, sua ocorrência se deve a causas mais complexas do que no caso de fissuras que se iniciam no fundo da camada. É praticamente consensual na literatura que pavimentos com camadas de revestimento mais espessas têm uma maior propensão à fissuração *top-down*. Do ponto de vista mecanicista, as causas desse tipo de patologia têm sido associadas às tensões/deformações de cisalhamento e de tração oriundas de esforços tangenciais devidas à passagem dos veículos ou de mecanismos de flexão que podem causar tração na face superior da camada (CANESTRARI e INGRASSIA, 2020; NCHRP, 2018; PELLINEN *et al.*, 2004; SUN *et al.*, 2018).

Ainda sobre a fissuração *top-down*, Canestrari e Ingrassia (2020), assim como Baek (2010), verificaram, por meio da implementação do modelo VECD, que o dano tende a se acumular mais rapidamente em menores temperaturas.

Segundo Park e Kim (2013), a identificação do tipo de fissuração é de grande importância porque ela pode determinar qual é o tipo de restauração a ser adotado. No caso em que somente o topo do revestimento se encontra danificado, pode-se apenas fresar e substituir a parte superficial, o que consiste no fundamento dos chamados pavimentos perpétuos nos Estados Unidos. Caso toda a camada de revestimento se encontre degradada ou somente a parte inferior, deve-se cogitar outras técnicas.

Visto que nas análises deste trabalho, serão utilizados resultados de ensaios de fadiga homogêneos (no FlexPAVE™) e não-homogêneos (no MeDiNa), será feita uma distinção entre esses dois tipos de ensaio. Na Figura 2.21, estão representadas as geometrias de ensaio abordadas no presente estudo.

Figura 2.21 - Tipos de ensaio de fadiga

Geometria de Ensaio	Tipo de Carregamento	Geometria de Ensaio	Tipo de Carregamento
	Tração-Compressão "Homogêneo"		Tração indireta "Não-homogêneo"

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

Em cada uma das situações, as tensões se distribuem de forma distinta no interior do corpo de prova. No caso em que as tensões não são iguais em todos os pontos, faz-se necessário usar soluções estruturais para se obter a tensão em um determinado ponto de interesse, o que é chamado de situação não-homogênea e corresponde aos ensaios com base na tração por compressão diametral. Por outro lado, um ensaio que confere homogeneidade nas tensões no interior da amostra é o ensaio de uniaxial à tração-compressão. Nesse caso, tem-se uma avaliação mais direta com comportamento do material, sem a necessidade de formulação de hipóteses adicionais (TAPSOBA *et al.*, 2012).

O ensaio de fadiga uniaxial à tração-compressão, utilizado no protocolo S-VECD e de onde provêm a curva C vs S e a relação entre G^R e N_f (explicadas na seção 2.4.4.), está descrito com detalhes em AASHTO (2018).

Para maiores informações sobre os protocolos de ensaio de fadiga aqui citados, pode-se consultar AASHTO (2018), Baaj *et al.* (2005), Babadopulos *et al.* (2017), Boeira (2018), Di Benedetto *et al.* (2004), Kim *et al.* (2003), Mangiafico (2014), Norouzi (2015), Schuster (2018) e Reese (1997).

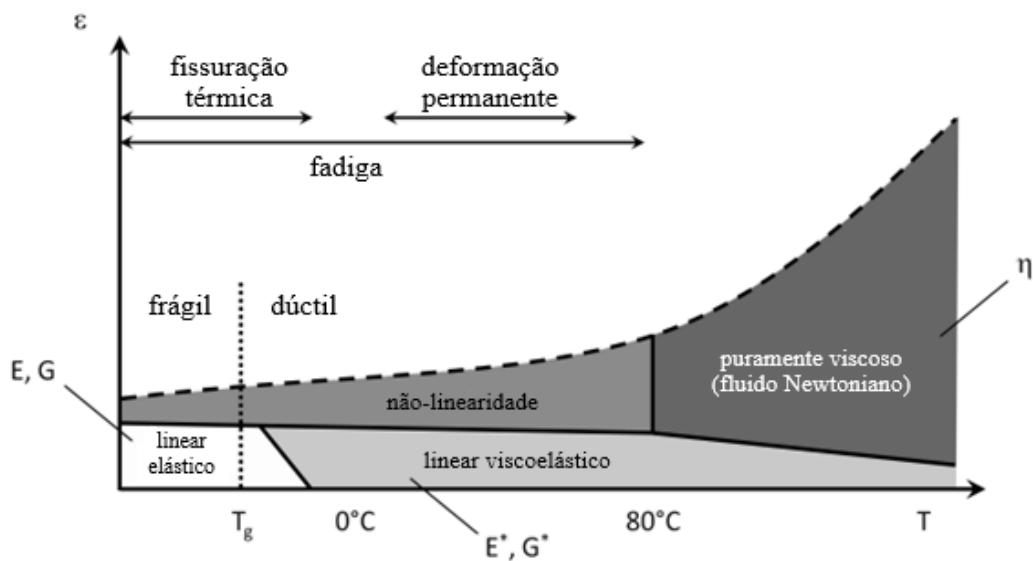
2.4.3 Análise Viscoelástica de Pavimentos

Conforme cita Kim (2009), o comportamento de ligantes asfálticos deve, para cada condição de temperatura e frequência de carregamento, caracterizar a resistência à deformação e identificar as parcelas elástica e viscosa da sua resposta mecânica. Ou seja, para materiais com comportamento viscoelástico, como é o caso de ligantes e, por extensão, de misturas asfálticas, não é suficiente saber a relação entre tensão e deformação. É necessário descrever o atraso entre a aplicação da carga e a deformação (comportamento viscoso).

Dito de outra maneira, a tensão em materiais viscosos é função, conforme Pagliosa (2004) tanto de sua deformação (como um sólido elástico) quanto da taxa de aplicação das deformações (como um líquido newtoniano).

Isso pode ser percebido no gráfico da Figura 2.22, que mostra que a resposta mecânica do ligante asfáltico pode ser aproximada como sendo linear elástica apenas para temperaturas muito baixas (próximas à temperatura de transição vítrea) e pequenas amplitudes de deformação, o que é bem distinto do que se observa nas condições de usinagem e utilização em campo.

Figura 2.22 - Domínios de comportamento mecânico em relação à temperatura e deformações



Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014)

Um material é considerado como viscoelástico linear, segundo Mangiafico (2014), quando a relação entre sua tensão e deformação (ambas dependentes do tempo) é uma transformação linear, ou seja, obedece ao princípio da superposição de Boltzmann (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 - Princípio de Superposição de Boltzmann

Ação		Resposta
$\varepsilon_1(t)$	→	$\sigma_1(t)$
$\varepsilon_2(t)$	→	$\sigma_2(t)$
$\lambda\varepsilon_1(t) + \mu\varepsilon_2(t)$	→	$\lambda\sigma_1(t) + \mu\sigma_2(t)$

Fonte: Adaptado de Mangiafico (2014)

Conforme mostra a Tabela 2.6, a resposta resultante da superposição de duas ações corresponde à superposição das respostas individuais a cada uma das ações. Ou seja, a tensão é diretamente proporcional à deformação.

Vale destacar que o concreto asfáltico, especialmente com granulometria densa, pode apresentar não-linearidade viscoelástica, o que é atribuído às próprias propriedades do ligante asfáltico e sua interação com os agregados e vazios da estrutura. Nesse caso, é necessário um tratamento distinto do que é aqui descrito (UNDERWOOD e KIM, 2013).

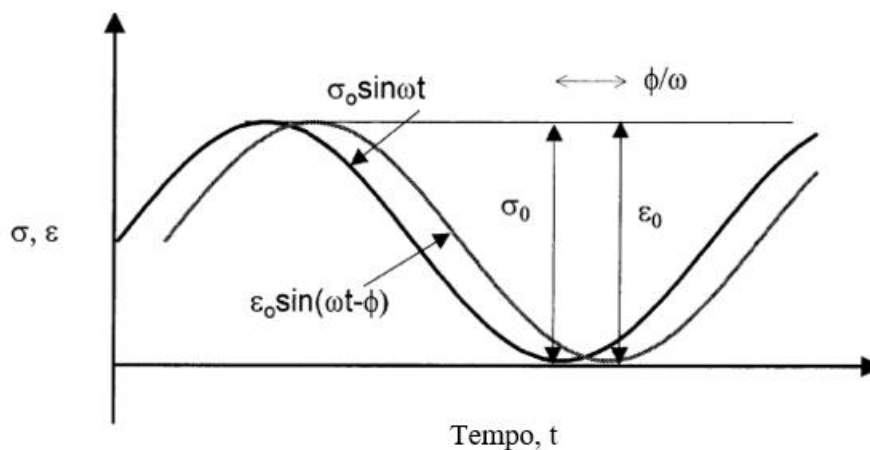
As abordagens que descrevem a viscoelasticidade de materiais podem ser executadas com aplicação de tensão constante e deformação variável (ensaio conhecido como *creep*), com a imposição de uma deformação constante e tensão variável (para obter o módulo de relaxação) ou com a realização de carregamento oscilatório, ocasionando tensões e deformações senoidais (ensaio do módulo complexo).

O FlexPAVE™, que é o *software* utilizado nessa pesquisa, leva em consideração os resultados dos ensaios do segundo grupo (com carregamento oscilatório). Portanto, serão abordada essa modalidade de ensaios.

2.4.3.1 Módulo Complexo

Considerando a aplicação senoidal de um carregamento em um corpo de prova de material viscoelástico, pode-se sempre verificar que a tensão e a deformação do material apresentam uma defasagem devido à sua parcela viscosa (Figura 2.23). A esse atraso, quando multiplicado pela frequência angular da onda de carregamento, dá-se o nome de ângulo de fase (φ). O módulo dinâmico ($|E^*|$) é obtido pela razão entre o pico de tensão e o pico de deformação (MANGIAFICO, 2014).

Figura 2.23 - Gráfico da tensão e deformação senoidais em um corpo de comportamento viscoelástico



Fonte: Adaptado de Witczak *et al.* (2002)

A partir do módulo dinâmico e ângulo de fase, pode-se obter as componentes real (*storage modulus*) e imaginária (*loss modulus*) do módulo complexo (Equação (2.20)). Tais componentes correspondem, respectivamente, à parcela elástica (representando a energia que se mantém armazenada no material ao longo dos ciclos de carregamento) e à parcela viscosa (representando a energia que é dissipada devido às forças internas de atrito) da resposta mecânica do material.

$$E^* = E_1 + iE_2 \quad (2.20)$$

Em que:

E^* = módulo complexo;

E_1 = componente elástica do módulo complexo (*storage modulus*);

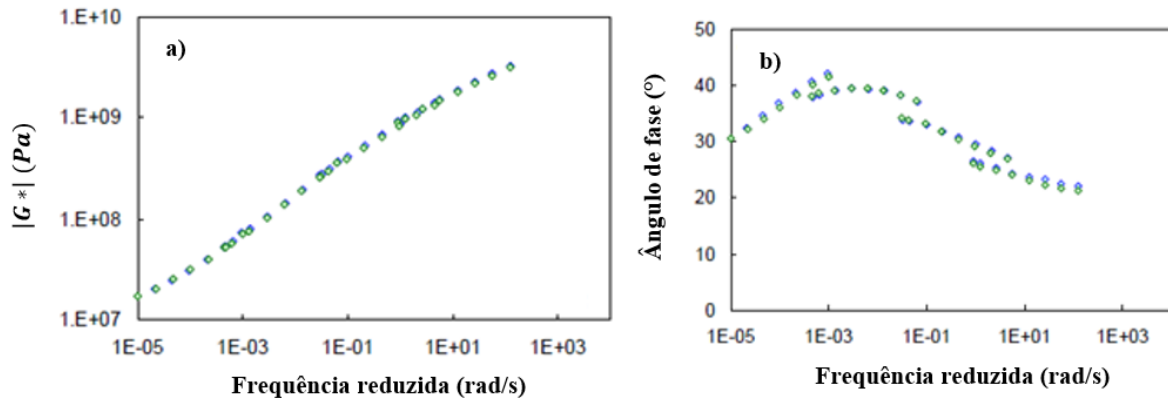
E_2 = componente viscosa do módulo complexo (*loss modulus*).

Segundo Kim (2009), uma das ferramentas utilizadas para descrever e analisar os resultados do ensaio de módulo complexo é a curva mestra. Tal abordagem consiste em reunir todos os resultados do módulo dinâmico (ou do ângulo de fase) para todas as temperaturas e frequências em uma única curva. No caso de materiais termorreologicamente simples, como o concreto asfáltico, é possível modelar todos os resultados por meio de uma curva suave e contínua.

Para tal, conforme Ferry (1980), é necessário deslocar os resultados do ensaio para cada temperatura multiplicando-se suas frequências por um fator de deslocamento (ou *shift factor*) denominado a_T , de forma a que todos os resultados se agrupem em uma curva que seja a mais contínua e suave possível (Figura 2.24). Para isso, adota-se uma temperatura como sendo o padrão (para a qual a_T será 1). Tal translação só tem sentido físico devido ao princípio de superposição tempo-temperatura, que atesta que a temperatura e a frequência de carregamento podem ser convertidas em uma única grandeza, a frequência reduzida. A explicação para isso é que o aumento da frequência de carregamento produz a mesma resposta mecânica que diminuir a temperatura. Quando os fatores de deslocamento são determinados, adota-se um modelo para obter-se os fatores para outras temperaturas e frequências além daquelas usadas no ensaio. Um modelo de larga utilização é o de Arrhenius, expresso conforme a Equação (2.21).

Na Figura 2.25, tem-se um exemplo de uma curva mestra antes e após o ajuste do fator de deslocamento para cada temperatura de ensaio.

Figura 2.24 - Exemplo de curva mestra de a) módulo dinâmico e b) ângulo de fase em ligante asfáltico



Fonte: Adaptado de Underwood (2011)

$$\log(a_T) = a_1 T^2 + a_2 T + a_3 \quad (2.21)$$

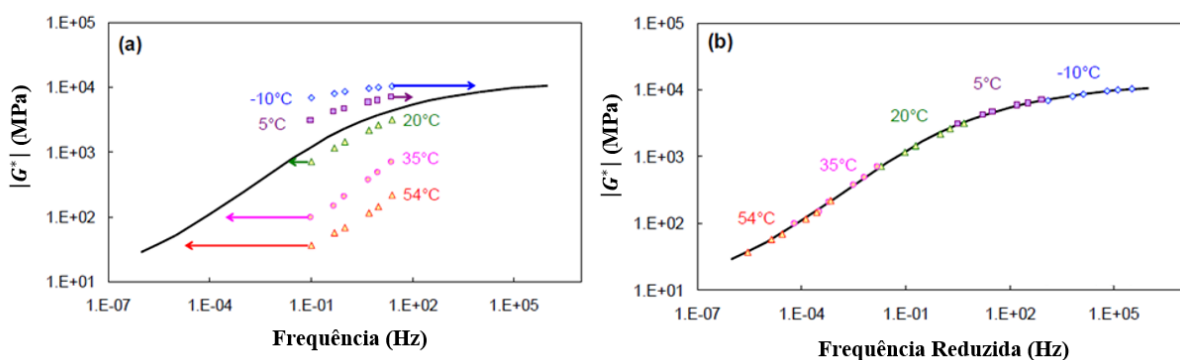
Em que:

a_T = fator de deslocamento;

T = temperatura para a qual a curva é deslocada ($^{\circ}\text{C}$);

a_1, a_2, a_3 = constantes do modelo.

Figura 2.25 - Curva mestra antes e após aplicação do fator de deslocamento



Fonte: Adaptado de Underwood (2011)

Para mais detalhes acerca do protocolo de ensaio de módulo complexo no Brasil, pode-se recorrer a DNIT (2019).

A curva mestra pode ser modelada tanto a partir de ajustes matemáticos como de analogias de caráter reológico. No primeiro grupo, será citada a função obtida e desenvolvida

por Pellinen (2001) e Pellinen *et al.* (2002) com caráter sigmoidal e, no segundo grupo, será feito um breve comentário acerca dos modelos analógicos de espectro discreto e contínuo.

A função conhecida como sigmoidal (da letra grega sigma, que faz referência ao formato semelhante a um “S”) proposta por Pellinen (2001) é descrita mediante a Equação (2.22).

$$\log(|E^*|) = a + \frac{b}{1 + \frac{1}{e^{d+g \cdot \log(f_R)}}} \quad (2.22)$$

Em que:

$|E^*|$ = módulo dinâmico;

f_R = frequência reduzida;

a = valor mínimo de módulo;

b = intervalo de valores de módulo;

d, g = parâmetros de forma.

Outra forma de modelar os resultados do ensaio de módulo complexo é mediante analogias com sistemas compostos por elementos mecânicos cujas propriedades e cuja disposição, tanto em paralelo como em série, modela a viscoelasticidade do material. Dito de outra maneira, usa-se molas (*springs*) para descrever o comportamento elástico, amortecedores (*dashpots*) para a parcela viscosa e, ainda, amortecedores parabólicos (*parabolic dashpots*), que se comportam de forma intermediária entre os dois anteriores (OLARD e DI BEDENETTO, 2003).

Sendo assim, conforme Woldekidan (2011), foram desenvolvidos modelos generalizados com associações em série ou em paralelo entre esses elementos. De forma genérica, tais associações recebem o nome de Séries de Prony e, mediante a obtenção de seus coeficientes (Equação (2.23)), é possível modelar o comportamento de ligantes e misturas asfálticas.

$$E(t) = E_\infty + \sum_{i=1}^N E_m e^{-\frac{t}{\rho_m}} \quad (2.23)$$

Em que:

$E(t)$ = módulo de relaxação (MPa);

E_∞ = módulo de equilíbrio a longo prazo (MPa);

E_m = módulo do m-ésimo termo da série de Prony (MPa);

ρ_m = tempo de relaxação do m-ésimo termo da série de Prony (s);

N = número de termos da série de Prony.

Ou, ainda, é possível obter o módulo dinâmico e ângulo de fase por meio das Equações (2.24) e (2.29), que representam os parâmetros no domínio da frequência.

$$E' = E_\infty + \sum_{m=1}^N \frac{E_m \omega_R^2 \rho_m^2}{\omega_R^2 \rho_m^2 + 1} \quad (2.24)$$

$$E'' = \sum_{m=1}^N \frac{E_m \omega_R \rho_m}{\omega_R^2 \rho_m^2 + 1} \quad (2.25)$$

Em que:

E' = componente elástica do módulo complexo (*storage modulus*) (MPa);

E'' = componente viscosa do módulo complexo (*loss modulus*) (MPa);

ω_R = frequência angular reduzida (rad/s), dada pela Equação (2.26):

$$\omega_R = 2\pi f \times a_T \quad (2.26)$$

Em que:

f = frequência de carregamento (Hz);

a_T = fator de deslocamento, conforme Equação (2.21).

Tais séries serão retomadas posteriormente quando da descrição dos inputs para o modelo VECD usado nas simulações computacionais, na seção 3.4.3.

Para maiores informações sobre modelos analógicos, consultar Ferry (1980), Mangiafico (2014), Olard e Di Benedetto (2003) e Roylance (2001),

2.4.4 Modelo viscoelástico de dano contínuo (VECD)

O *Viscoelastic Continuum Damage* (VECD) é a combinação da análise viscoelástica com uma teoria de danificação baseada nas premissas até aqui apresentadas, ou seja, na acumulação linear do dano e da consideração desse processo por meio da alteração na rigidez do material (UNDERWOOD, 2011).

O histórico das pesquisas nesse tema pode ser encontrado através de diversos trabalhos, como de Hou (2009), Underwood *et al.* (2010), Sabouri e Kim (2014) e Nascimento (2015).

De forma sumária, pode-se datar alguns marcos importantes:

- a) Schapery (1981): utilizou o VECD com modelo de dano contínuo para o estudo de compósitos;
- b) Kim e Little (1990): aplicaram o modelo para asfalto areia;
- c) Lee e Kim (1998a): demonstraram a aplicação do VECD para concretos asfálticos tanto em ensaios de tensão controlada como de deformação controlada;
- d) Daniel e Kim (2002): mostraram que o dano pode ser tratado como uma propriedade fundamental do material e propuseram metodologias simplificadas para os ensaios;
- e) Chebab *et al.* (2002): demonstraram a aplicação do princípio superposição tempo-temperatura a materiais em estado danificado, o que possibilitou otimizar consideravelmente a realização de ensaios de laboratório;
- f) Eslaminia *et al.* (2012): desenvolveram o LVECD (apresentado na seção 2.5), *software* que utiliza o modelo VECD. combinado com transformadas de Fourier no domínio da frequência. Por meio dessas análises, o custo computacional das simulações foi reduzido significativamente;
- g) Sabouri e Kim (2014): utilizando o *Simplified Viscoelastic Continuum Damage* (S-VECD), uma versão do VECD aplicável a ensaios com carregamento cíclico, obtiveram um critério de ruptura por fadiga que é independente do tipo de carregamento e tipologia de ensaio a partir da taxa de liberação de energia de pseudodeformação (G^R);
- h) Nascimento (2015): validou a aplicação do S-VECD para misturas asfálticas de uso corrente em diversas localidades do Brasil.

- i) Wang *et al.* (2018) apresentaram um aprimoramento do critério de falha G^R , que foi designado como D^R , o qual é definido como a taxa de variação entre o somatório da perda de pseudorrigidez até a falha e N_f , a vida à fadiga.

A seguir, serão apresentados os princípios que fundamentam a teoria do VECD.

2.4.4.1 Princípio da correspondência elástico-viscoelástico

Se o comportamento de um material perfeitamente elástico pode ser facilmente descrito por meio de uma relação linear entre tensão e deformação, o mesmo pode ocorrer com materiais com comportamento linear viscoelástico (LVE) por meio da utilização de pseudovariáveis. Ou seja, obtém-se uma pseudorrigidez e uma pseudodeformação que não correspondem à rigidez e à deformação medidas no material, mas que permitem equacionar os fenômenos de forma análoga ao caso mais simples do material elástico (KIM, 2009).

A partir da Equação (2.27), obtém-se a pseudodeformação para materiais LVE.

$$\varepsilon^R = \frac{1}{E_R} \int_0^\xi E(\xi - \tau) \frac{d\varepsilon}{d\tau} d\tau \quad (2.27)$$

Em que:

ε^R = pseudodeformação axial;

E_R = módulo de referência;

ξ = tempo reduzido;

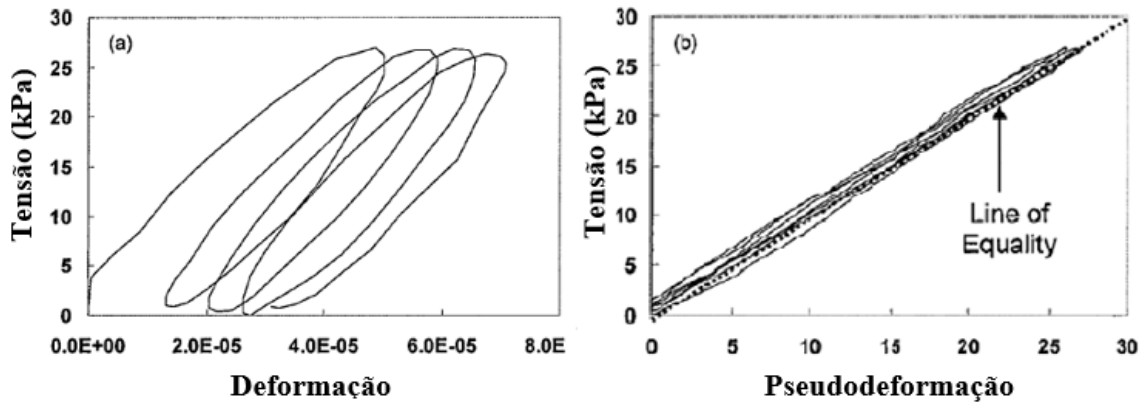
$E(t)$ = módulo de relaxação;

ε = deformação física;

τ = variável de integração.

Aplicando-se essa transformação, o gráfico de tensão versus deformação fica linearizado e é convertido em tensão versus pseudodeformação (Figura 2.26).

Figura 2.26 - Gráfico de tensão versus deformação e tensão versus pseudodeformação para material LVE



Fonte: Adaptado de Kim (2009)

Conforme Kim (2009), a integral de convolução apresentada na Equação (2.27) captura a influência de todo o histórico de carregamento, o que permite tal correspondência. Desse modo, a histerese observada no primeiro gráfico, que é devida apenas ao comportamento LVE, é eliminada no segundo, ficando visível a variação da pseudorrigidez apenas devido à danificação da amostra.

Devido à complexidade de implementar a Equação (2.27), é sugerido por Kim (2009) a utilização de uma rotina mais simplificada, conforme mostra a Equação (2.28).

$$\varepsilon^{R(n+1)} = \frac{1}{E_R} \left[\eta_0^{n+1} + \sum_{i=1}^m \eta_i^{n+1} \right] \quad (2.28)$$

Em que:

$\varepsilon^{R(n+1)}$ = pseudodeformação no ciclo $n + 1$;

E_R = módulo de referência;

η_0 e η_1 = variáveis de estado obtidas por meio de séries de Prony.

A Lei de Hooke adaptada para materiais LVE, usando o princípio de correspondência aqui apresentado e sem ainda a consideração da danificação fica representada tal como na Equação (2.29).

$$\sigma = E_R \varepsilon^R \quad (2.29)$$

Em que:

σ = tensão;

E_R = módulo de referência;

ε^R = pseudodeformação.

2.4.4.2 Teoria do Trabalho Potencial

Segundo Kim (2009), a forma como a pseudorrigidez é modificada ao longo da danificação é explicada através de uma variável de natureza termodinâmica que corresponde ao trabalho exercido sobre o material e que não é convertido em deformação, mas sim em dano irreversível. A evolução dessa variável (S), que corresponde ao estado interno da amostra ensaiada, é dada pela Equação (2.30)

$$\dot{S}_m = \left(\frac{\partial W^R}{\partial S_m} \right)^{\alpha_m} \quad (2.30)$$

Em que:

\dot{S}_m = taxa de evolução do dano;

W^R = função de densidade de energia de pseudodeformação;

α_m = constante de ajuste característica do material.

A relação entre tensão e deformação, usando-se a linguagem de variáveis de estado interno, fica representada na Equação (2.31).

$$\sigma = \frac{\partial W^R}{\partial \varepsilon^R} \quad (2.31)$$

Em que:

σ = tensão;

W^R = função de densidade de energia de pseudodeformação;

ε^R = pseudodeformação.

Conforme Kim (2009), como W^R é uma medida de trabalho, pode ser obtido pela área sob a curva de tensão versus pseudodeformação para o caso uniaxial (Equação (2.32)).

$$W^R = \frac{1}{2} C(S) (\varepsilon^R)^2 \quad (2.32)$$

Em que:

$C(S)$ = pseudorrigidez.

Para a obtenção da variável S , pode-se usar o processo iterativo apresentado por Lee e Kim (1998a, 1998b) na Equação (2.33).

$$S_{i+1} = S_i + \left[-\frac{1}{2} (C_i - C_{i-1}) (\varepsilon_i^R)^2 \right]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \Delta t^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (2.33)$$

Em que:

S_i = variável interna de danificação no ciclo i ;

α = constante do material relativa à sua viscoelasticidade.

Combinando os dois princípios até aqui expostos, a relação tensão-deformação passa a ser escrita conforme a Equação (2.34).

$$\sigma = C(S) E_R \varepsilon^R \quad (2.34)$$

Sobre a Equação (2.34), Kim (2009) destaca que a pseudorrigidez C descreve o estado de danificação do material (sendo igual a 1 para o estado não-danificado e assumindo valores entre 0 e 1 quando ocorre o dano) e a pseudodeformação ε^R carrega o caráter LVE do material.

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

O S-VECD é o desenvolvimento da teoria de comportamento LVE apresentada até aqui e, conforme dissertam Norouzi (2015) e Wang *et al.* (2015), o modelo é capaz de descrever o comportamento à fadiga sob diversas condições ambientais e de carregamento.

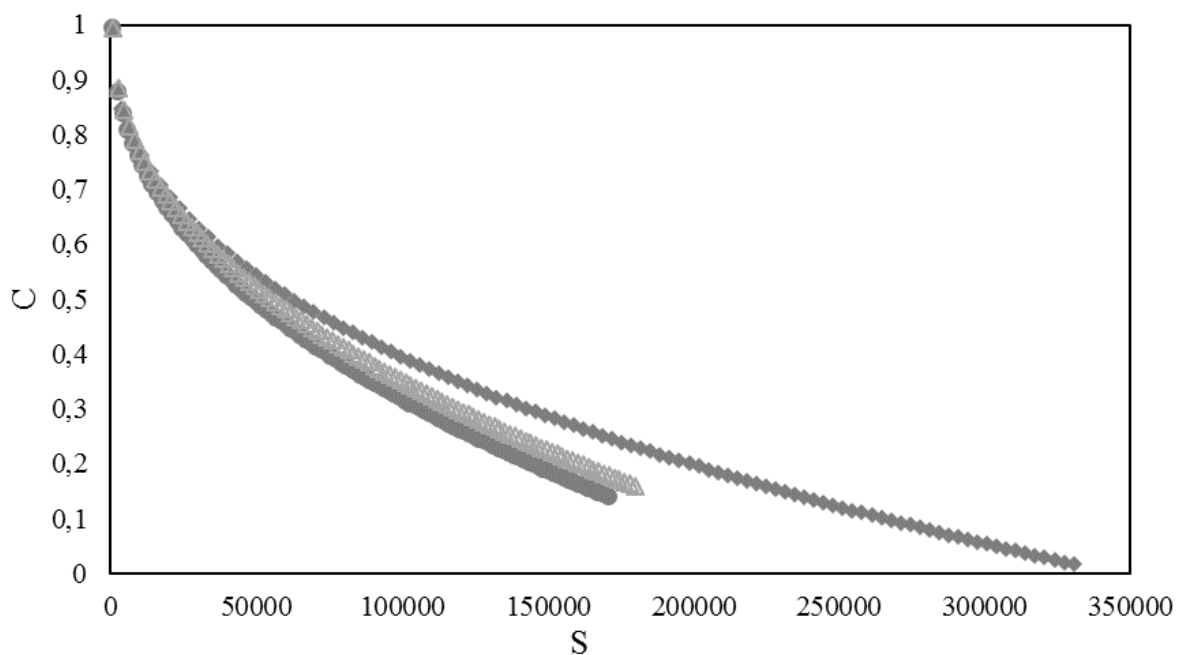
Segundo Underwood (2011), o S-VECD é resultado da combinação entre precisão e simplicidade. Isso ocorre através de uma divisão entre fase transitória (primeiro ciclo de carga) e fase cíclica (demais ciclos). Tal divisão é realizada, segundo Underwood *et al.* (2010), porque o dano possui uma maior taxa de evolução no início do ensaio e, portanto, extrapolar os resultados do primeiro ciclo para os demais pode incorrer em erros.

Os dois principais resultados do protocolo S-VECD são a relação entre C e S (curva característica de dano do material) e a vida à fadiga, dada pelo critério proposto por Sabouri e Kim (2014) a partir da relação entre G^R e N_f .

Conforme Underwood (2011), o ajuste da curva característica (Figura 2.27) pode ser feito por meio de uma função exponencial (Equação (2.35)) ou de uma lei de potência (Equação (2.36)), dependendo das características de cada material.

O número de ciclos até a ruptura (N_f) é obtido pelo critério do pico do ângulo de fase proposto por Reese (1997). Tal abordagem apresenta precisão e é consistente com o ensaio (NOROUZI, 2015).

Figura 2.27 – Exemplos de curvas características



Fonte: Adaptado de Schuster (2018)

$$C(S) = e^{aS^b} \quad (2.35)$$

$$C(S) = 1 - C_{11}S^{C_{12}} \quad (2.36)$$

Em que:

a, b, C_{11} , C_{12} = parâmetros de ajuste.

A taxa de dissipação média de energia de pseudodeformação por ciclo (G^R) é obtida via Equação (2.37).

$$G^R = \frac{\overline{W^R}}{N_f} = \frac{\int_0^{N_f} W^R}{N_f^2} \quad (2.37)$$

Em que:

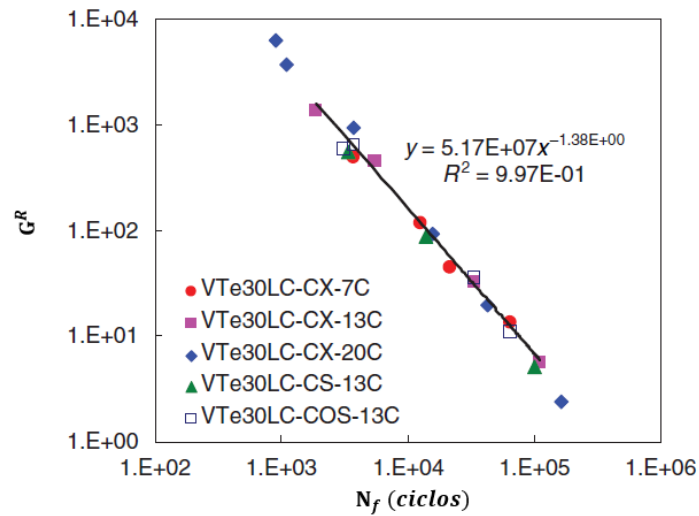
G^R = taxa de liberação da energia de pseudodeformação;

W^R = função de densidade de energia de pseudodeformação;

N_f = vida à fadiga determinada com o critério do pico do ângulo de fase.

Conforme Sabouri e Kim (2014) demonstraram, existe uma correlação lógica entre G^R e N_f , visto que o primeiro carrega o histórico de danificação da amostra. A partir da realização de ensaios a diferentes condições, verificou-se uma correlação entre ambos os parâmetros com R^2 superior a 0,99 (Figura 2.28) e que essa correlação (chamada de envoltória de ruptura) independe da forma de carregamento. Assim, pode-se executar o ensaio de fadiga a apenas uma temperatura e modo de carregamento, com diferentes amplitudes de deformação.

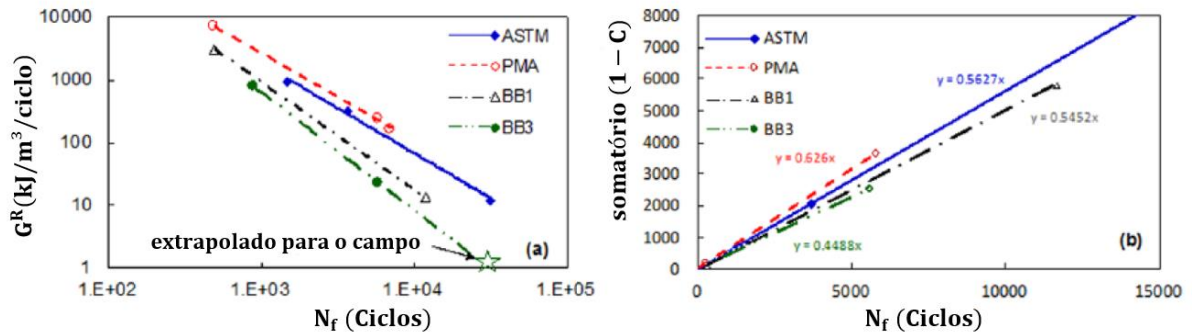
Figura 2.28 – Exemplo de envoltória de ruptura a partir dos parâmetros N_f e G^R



Fonte: Adaptado de Sabouri e Kim (2014)

Como já comentado no início da sessão 2.4.4, o critério D^R já foi apresentado como uma evolução do critério G^R . Conforme Wang *et al.* (2018), devido à diferença de grandeza entre as deformações impostas em laboratório e aquelas observadas em campo, é necessário fazer extrapolações ao utilizar-se modelos de previsão de desempenho (como aqueles existentes no FlexPAVE™). Como a extrapolação a partir do critério G^R é feita em escala logarítmica, se torna maior a possibilidade de erros devido à variabilidade dos materiais. No caso do critério D^R , essa extrapolação é feita em escala aritmética, o que, conforme as observações dos autores, minimiza os erros nesse processo. Além disso, também é salientado que o D^R é baseado apenas em um parâmetro, que é a taxa de variação entre $(1 - C)$ e N_f , enquanto o critério anterior é baseado na correlação entre G^R e N_f como dois parâmetros distintos. A Figura 2.29 mostra, de maneira gráfica, a diferença entre essas duas abordagens.

Figura 2.29 - Diferença entre os critérios de falha (a) G^R e (b) D^R



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2018)

Na abordagem deste trabalho, foi utilizado o critério de falha G^R visto que a caracterização dos materiais na interface do FlexPAVE™ é feita segundo o critério de falha G^R , foi este o método utilizado para as análises.

2.5 FLEXPAVE™

O *Layered Viscoelastic Pavement Analysis for Critical Distresses* (LVECD) é um *software* produzido na NCSU em Raleigh, nos Estados Unidos sob fomento da *Federal Highway Administration* (FHWA). O programa também é apresentado como *Layered Viscoelastic Continuum Damage* por Eslaminia *et al.* (2012) e é a partir dele que foi desenvolvido o FlexPAVE™. As informações apresentadas ao longo deste trabalho são referentes à versão 1.1 Beta do programa.

De acordo com o exposto por Eslaminia *et al.* (2012), o *software* tem como objetivo o processamento de dados de entrada relacionados à estrutura do pavimento, propriedades viscoelásticas e elásticas dos materiais de pavimentação, dados de temperatura e de tráfego e, a partir disso, prever a resposta mecânica (tensões, deformações e deslocamentos) e o desempenho à fadiga (também são inclusos recursos relativos à deformação permanente mas que não serão abordados aqui).

Conforme os mesmos autores, o FlexPAVE™ consiste na evolução do *Layered Viscoelastic Moving Load Analysis* (LVEMA), que implementa a análise viscoelástica e considera o movimento das cargas. Desse modo, é reduzido significativamente o tempo de

análise através da aplicação de transformadas de Fourier, que diminui o número de dimensões das operações vetoriais envolvidas.

O novo passo que é dado em relação à análise do LVEMA é que, através do modelo VECD, é obtido o dano e a redistribuição de esforços é feita a partir do estado danificado da estrutura.

Os pressupostos incluídos no *software* são:

- a) As propriedades dos materiais, assim como a temperatura, variam apenas em relação à profundidade, visto que as outras duas dimensões são muito grandes em relação a ela;
- b) O perfil de temperatura ao longo da profundidade do pavimento é considerado como sendo um ciclo anual. Assim, as variações de temperatura ao longo de diferentes anos não são levadas em conta;
- c) A precisão de inserção de dados de temperatura é de hora em hora;
- d) A carga devida ao tráfego é considerada como sendo cíclica e de forma (contato pneu-pavimento) e velocidade constante;
- e) O carregamento do tráfego varia em segundos;
- f) Os materiais das camadas de base, sub-base e subleito são aproximados como sendo elásticos lineares;

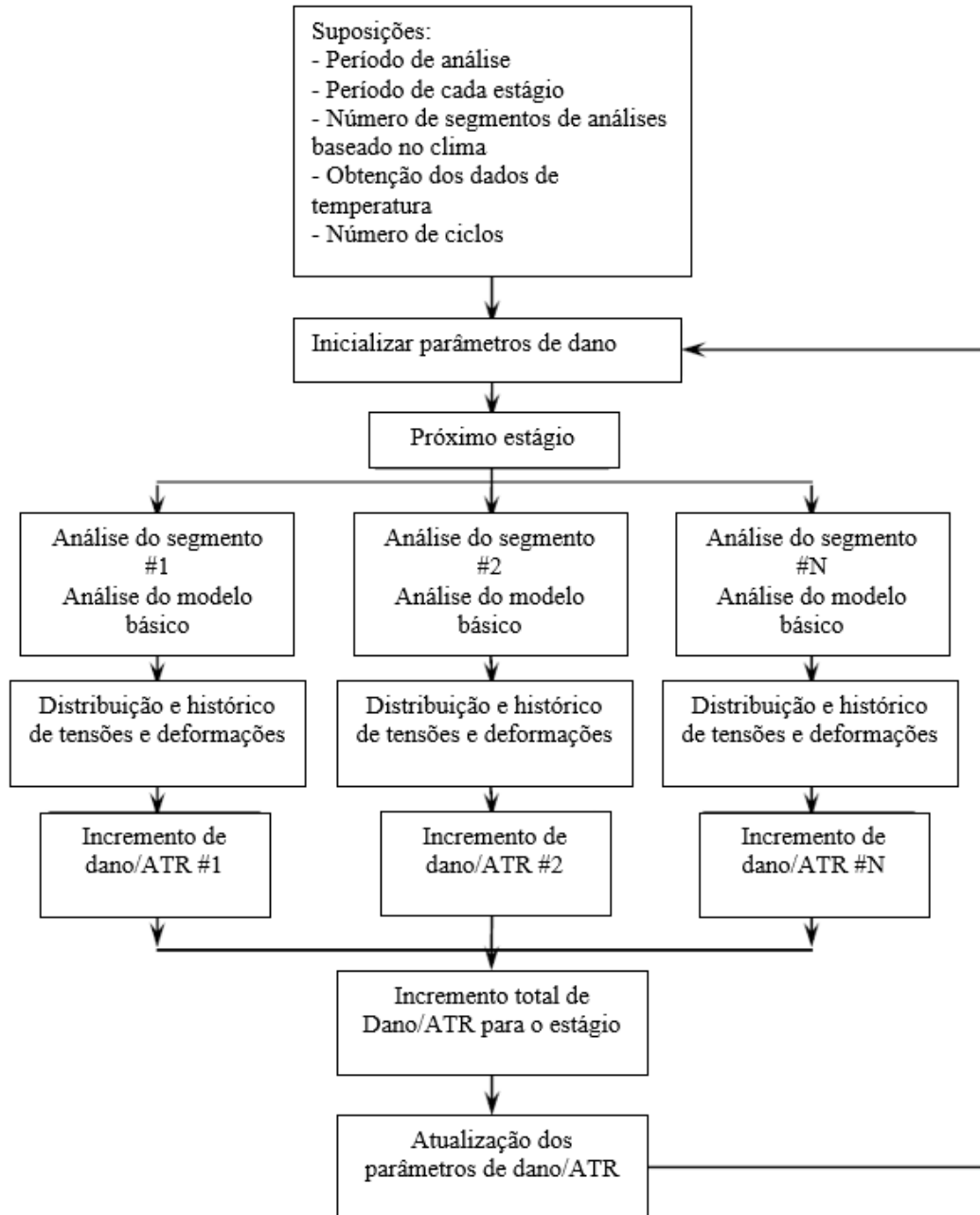
Com base nessas simplificações, ciclos de carga da ordem de milhões são avaliados em análises independentes em números da ordem de centenas.

Vale destacar ainda que a primeira fase de análise, que é a resposta mecânica do pavimento, é obtida para o primeiro ano e repetida para os demais, visto que a temperatura varia em ciclos anuais.

Além disso, o período de análise é dividido em estágios (*life stages*), cuja extensão varia entre duas semanas e alguns meses, dependendo da precisão requerida. Nesses estágios, são levadas em conta a variabilidade mensal ou sazonal de temperatura. Cada estágio, por sua vez, é seccionado em segmentos (*segments*), de duração de poucas horas, também em função da acurácia e das variações de temperatura e tráfego. Isso explica a redução do tempo de processamento em simulações com temperatura constante ao longo de todo o tempo e em todas as profundidades.

Na Figura 2.30, está o fluxograma das análises do *software*.

Figura 2.30 - Esquema das análises feitas no FlexPAVE™



Fonte: Adaptado de Eslaminia *et al.* (2012)

Conforme Eslaminia *et al.* (2012), o sistema de coordenadas é disposto com o eixo x no sentido transversal da via, eixo y apontando no sentido do tráfego e eixo z ao longo da profundidade, variando de 0 (na superfície) até $z_{máx}$ (no subleito).

Os resultados de dano por fadiga gerados pelo programa têm a vantagem de não necessitarem de pressupostos *a priori* do local de iniciação da fissuração, ao contrário de

softwares anteriores que possuíam essa característica. Ou seja, são as leis constitutivas dos materiais que irão determinar se as fissuras por fadiga. Dessa forma, é possível prever, com o FlexPAVE™, se o revestimento do pavimento apresentará fissuras *top-down* ou *bottom-up* (PARK *et al.*, 2014).

O fator de dano por fadiga fornecido a cada ciclo i é dado pelo somatório do quociente do número N de solicitações até o respectivo ciclo e N_f , a vida à fadiga do material obtido por meio da envoltória de ruptura do material (Equação (2.38)).

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{N_i}{N_{fi}} \quad (2.38)$$

Em que:

D = fator de dano por fadiga;

N_i = tráfego acumulado até o ciclo i ;

N_{fi} = vida à fadiga obtida a partir das condições no ciclo i .

Na apresentação e análise dos resultados dessa pesquisa, ao se fazer referência simplesmente a “dano”, se trata do fator de dano apresentado na Equação (2.38).

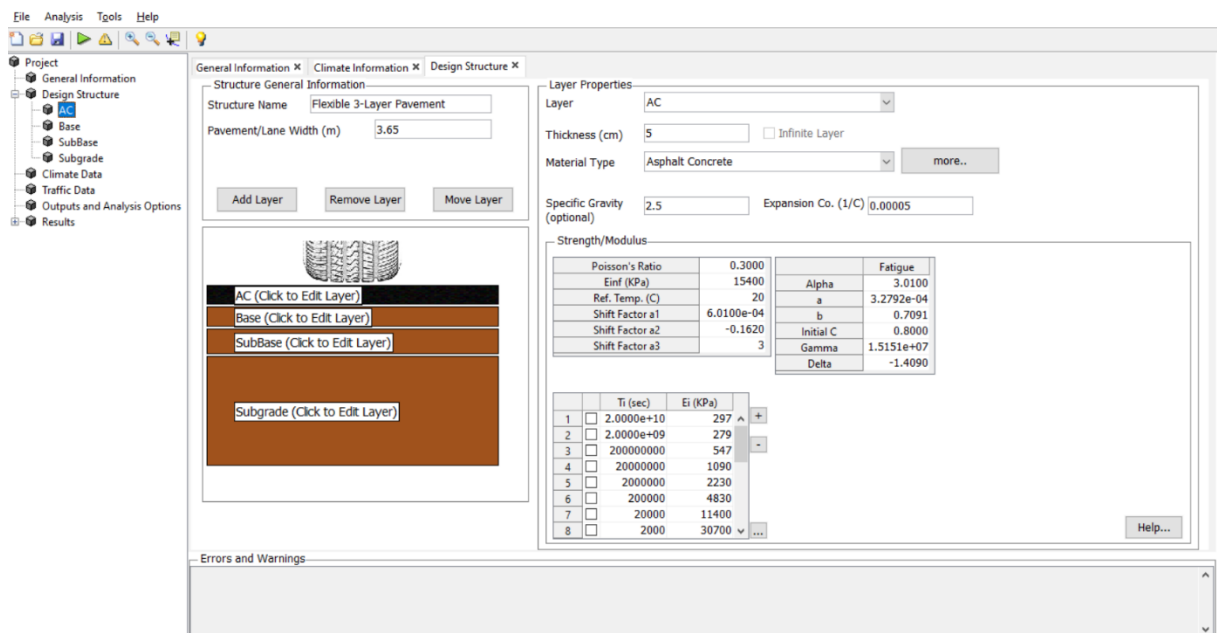
2.5.1 Interface Gráfica

O FlexPAVE™ possui uma *graphical user interface* (GUI) com as seguintes abas:

- a) Informações gerais (*General Information*): são informados o nome e autor do projeto, tipo de análise (somente resposta mecânica ou com cálculo do dano), período de projeto, opções de fadiga e de deformação permanente;
- b) Estrutura de projeto (*Design Structure*): aqui, são informados o nome da estrutura, largura da faixa e são informadas as camadas que a constituem. Para cada camada, informa-se a espessura, tipo de material, peso específico e coeficiente de expansão. No caso de concretos asfálticos, pode-se considerá-lo tanto como um material elástico linear como viscoelástico com ou sem danificação. Nesse último caso, opta-se por inserir os dados de entrada de viscoelasticidade através dos resultados diretos do ensaio de módulo

complexo, da modelagem sigmoidal da curva-mestra ou por coeficientes das séries de Prony (que foi o caso desse estudo). Na Figura 2.31, está representada a aba *Design Structure* para concretos asfálticos.

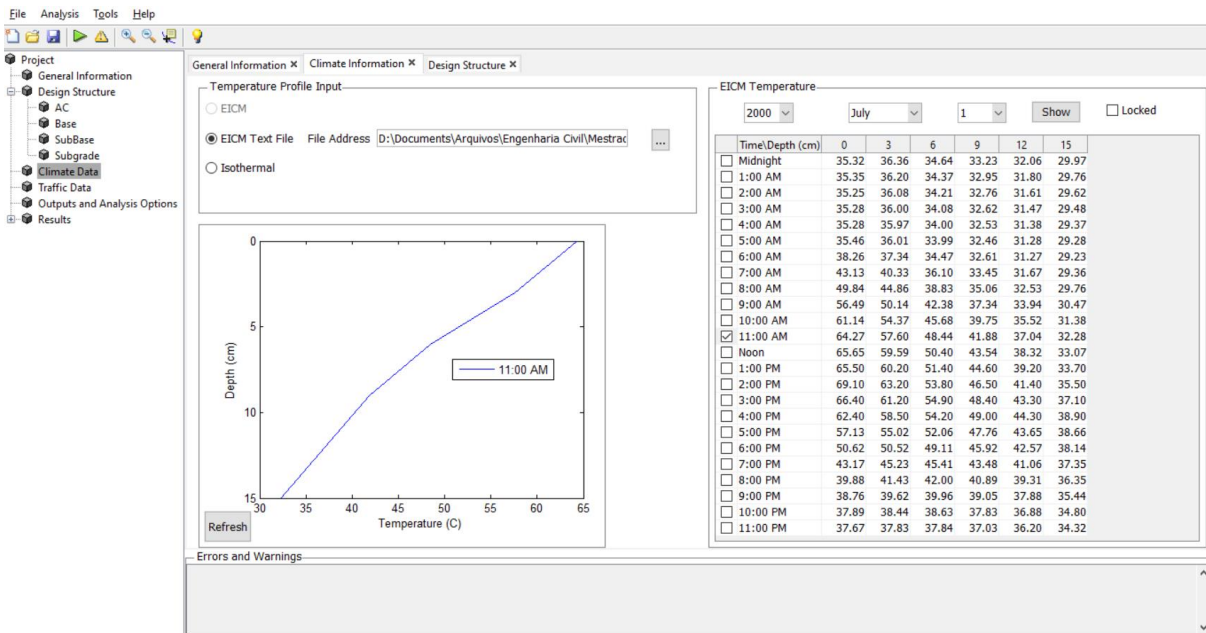
Figura 2.31 - Aba *Design Structure* para concretos asfálticos



Fonte: Autor

No caso dos materiais das outras camadas, são consideradas as categorias de base asfáltica, base tratada com cimento, base granular e subleito. Fora a base asfáltica (que tem os mesmos dados de entrada que o concreto asfáltico) as demais opções podem ser consideradas como materiais elásticos lineares (opção escolhida nessa pesquisa), elásticos não-lineares, ou elásticos anisotrópicos;

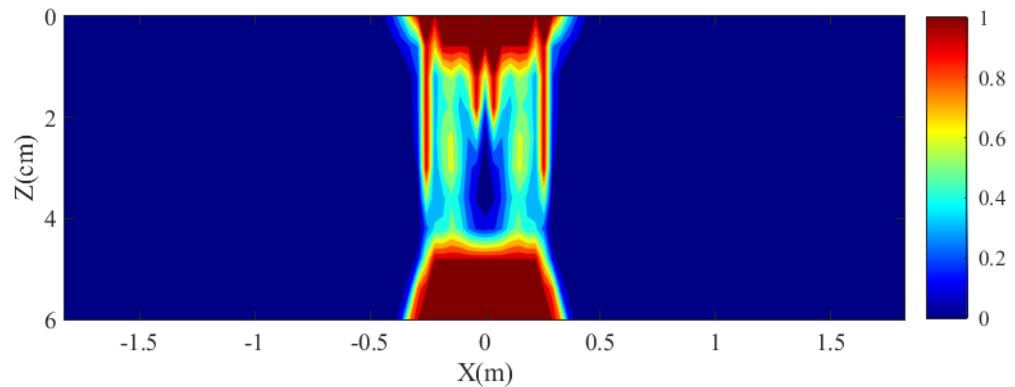
- c) Dados Climáticos (*Climate Data*): os dados de temperatura do pavimento podem ser inseridos a diferentes profundidades e a cada hora (formato usado no EICM) ou pode-se adotar temperatura constante. Ainda, é possível verificar o perfil de temperatura para determinada hora e dia do ano (Figura 2.32).

Figura 2.32 - Aba *Climate Data*

Fonte: Autor

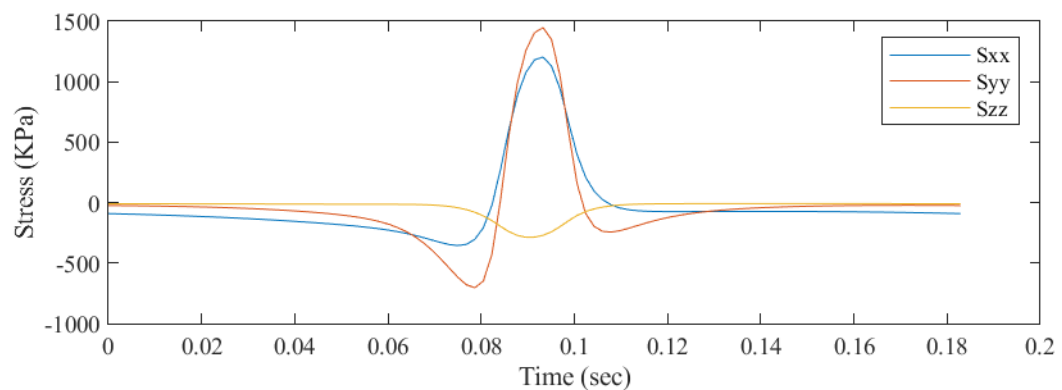
- d) Dados de Tráfego (*Traffic Data*): são informadas as características do veículo de projeto, velocidade de projeto, número de solicitações diárias em AADTT (*Average Annual Daily Truck Traffic*), crescimento do tráfego e sua distribuição ao longo do dia e do ano;
- e) Dados de saída e opções de análise (*Outputs and Analysis Options*): é escolhido o tipo de dados de saída que se deseja obter da simulação e é determinada a malha de pontos de análise no plano XZ (seção transversal do pavimento);
- f) Resultados (*Results*): o programa exibe resultados relacionados à primeira fase de análise (tensões, deformações e deslocamentos) e à análise de fadiga (pseudorrigidez e dano). Esses resultados são disponibilizados em forma de tabelas no formato .xls, arquivos no formato .mat, por meio de gráficos de contorno (Figura 2.33) ou de evolução temporal (Figura 2.34). Vale destacar, também, que a malha de pontos para cálculo do dano pode ser alterada entre as opções *coarse* (6 elementos finitos por camada), *medium* (10 elementos finitos por camada) ou *fine* (15 elementos finitos por camada).

Figura 2.33 - Exemplo de gráfico de contorno de dano gerado pelo FlexPAVE™



Fonte: Autor

Figura 2.34 - Exemplo de gráfico de evolução temporal das tensões S_{xx} , S_{yy} e S_{zz} gerado pelo FlexPAVE™



Fonte: Autor

2.6 MEDINA

Tendo em vista que na presente pesquisa é feita uma comparação entre a previsão de desempenho à fadiga por meio do FlexPAVE™ e do MeDiNa, essa seção será voltada para a revisão deste último. A versão do programa adotada nessa pesquisa é a 1.1.3.0 e as informações aqui mostradas podem ser consultadas em Franco e Motta (2018).

O Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos (MeDiNa), resultado do aprimoramento do programa SisPav, proposto por Franco (2007), é a proposta atual para uma

abordagem empírico-mecanicista de dimensionamento de pavimentos asfálticos no Brasil. Seu desenvolvimento é iniciativa do Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR), da Rede Temática de Asfalto, do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ) e do Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES), além da contribuição de dados de trechos monitorados de diversos centros de pesquisa espalhados pelo Brasil. Seu nome é alusivo ao professor Jacques de Medina, que lecionou como professor na COPPE e foi um dos precursores da engenharia rodoviária no Brasil.

O sistema, desenvolvido em Visual C++, utiliza a ferramenta denominada Análise Elástica de Múltiplas camadas (AEMC) para calcular tensões e deformações no pavimento a, a partir de abordagens empíricas, correlacionar obter o desempenho do pavimento frente aos principais mecanismos de degradação. Assim, o MeDiNa pode ser usado tanto para dimensionamento de pavimentos como para verificar se uma determinada configuração de camadas com materiais conhecidos irá atender a condições específicas de tráfego. A versão do sistema utilizada nesta pesquisa é a 1.1.3.0.

As hipóteses adotadas no MeDiNa, disponíveis na aba de ajuda do mesmo, são as seguintes:

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

Além dos itens enumerados, ressalta-se também que o método considera as camadas do pavimento como não aderidas (com exceção de camadas asfálticas sobrepostas), diferentemente do FlexPAVE™.

Os dados referentes ao tráfego (Figura 2.35) incluem o volume diário médio (VDM) de veículos, fator de veículo (com base nas diferentes configurações de eixos), porcentagem de

veículos na faixa de projeto, período do projeto e taxa de crescimento do tráfego. A partir disso, é calculado o número N de solicitações do eixo padrão.

Figura 2.35 - Dados de entrada do tráfego no MeDiNa

EIXO PADRÃO RODOVIÁRIO	
DADOS DO TRÁFEGO	
Tipo de Via:	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano):	1370
FV:	1.000
N anual (1º ano):	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 Total:	5,00e+06

Fonte: Autor

Para as camadas granulares, deve-se informar os parâmetros de rigidez, informações referentes à curva de compactação, abrasão dos agregados e parâmetros do modelo de deformação permanente (Figura 2.36).

Quanto aos dados referentes ao concreto asfáltico, o sistema requer informações relativas ao comportamento elástico do material, parâmetros volumétricos e de fadiga (Figura 2.37). O programa não requer dados relativos à deformação permanente, mas exige que um valor mínimo de *Flow Number* seja atingido para cada classe de misturas asfálticas.

A curva de fadiga de materiais asfálticos é obtida a partir do ensaio de fadiga à compressão diametral (DNIT, 2018a). Conforme o padrão normativo, o ensaio é realizado à temperatura constante de 25 °C e a vida à fadiga é expressa pela Equação (2.39).

Figura 2.36 - Dados de entrada de materiais granulares no MeDiNa

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	
Descrição do Material	Brita Graduada
Massa específica (g/cm³)	2,223
Umidade Ótima (%)	5,0
Energia Compactação	Modificada
Abrasão Los Angeles (%)	43,0
Norma ou Especificação	DNIT ES 141
Deformação Permanente	
Modelo:	$ep = psi1.(s3^{psi2}).(sd^{psi3}).(N^{psi4})$
Coefficiente de Regressão (k1 ou p...)	0,0868
Coefficiente de Regressão (k2 ou p...)	-0,2801
Coefficiente de Regressão (k3 ou p...)	0,8929
Coefficiente de Regressão (k4 ou p...)	0,0961

Fonte: Autor

Figura 2.37 - Dados de entrada do concreto asfáltico no MeDiNa

CONCRETO ASFÁLTICO	
Material	RJ CAP 30/45 #12,5mm Sepetiba
Parâmetros	
Espessura (cm)	10,0
Coefficiente de Poisson	0,30
Contato	Não Aderido
Módulo (MPa)	
Modelo Constituinte	Resiliente Linear
Módulo (MPa)	9000
Características	
Tipo de CAP	CAP 30/45 - PG 70-16
Massa específica (g/cm³)	2,4
Resistência à tração (MPa)	2,08
Teor de asfalto (%)	6,0
Volume de vazios (%)	5,0
Faixa Granulométrica	#12,5mm
Abrasão Los Angeles (%)	40,0
Norma ou Especificação	DNIT ES 31
Curva de Fadiga	
Modelo:	$k1 .(et^{k2})$
Coefficiente de Regressão (k1):	5,0e-14
Coefficiente de Regressão (k2):	-3,992
Classe de Fadiga:	2
FFM (100µ a 250µ):	0,75

Fonte: Autor

$$N_{\text{fad}} = k_1 \varepsilon_t^{k_2} \quad (2.39)$$

Em que:

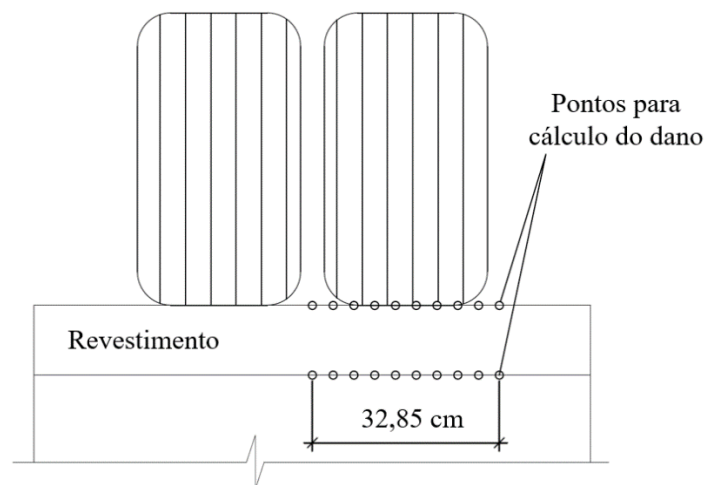
N_{fad} = número de ciclos até a ruptura por fadiga;

ε_t = deformação resiliente de tração;

k_1, k_2 = coeficientes de regressão.

Para o cálculo do dano médio por fadiga, o sistema utiliza 20 pontos de análise distribuídos em duas linhas (Figura 2.38). A primeira linha de pontos, localizada na superfície da camada de revestimento, possui 10 pontos igualmente distribuídos entre a origem do sistema de coordenadas (no ponto de aplicação da carga) até uma distância de 32,85 cm da origem. A segunda linha de pontos fica situada na face inferior da camada de revestimento e possui também 10 pontos posicionados da mesma forma.

Figura 2.38 - Pontos utilizados no MeDiNa para o cálculo do dano por fadiga



Fonte: Autor

O dano médio de cada ponto é calculado pela relação entre uma aplicação do eixo padrão rodoviário pelo número N admissível de aplicações do eixo padrão, como mostra a Equação (2.40).

$$D_{\text{médio}} = \frac{N_i}{N_{\text{fad}}} \quad (2.40)$$

Em que:

$D_{\text{médio}}$ = dano médio por fadiga em cada um dos 20 pontos;

N_i = número admissível de solicitações do eixo padrão em cada ponto;

A partir do dano médio, é calculado um fator de deslocamento fS , por meio da função de deslocamento descrita na Equação (2.41).

$$fS = C1(D_{\text{médio}})^{C2} \quad (2.41)$$

Em que:

fS = fator de deslocamento;

$C1, C2$ = fatores de calibração.

Na Equação (2.41), os valores dos fatores de calibração que resultaram no melhor ajuste foram de 1993,7 para $C1$ e de 0,3737 para $C2$. Com o fator de deslocamento, é obtido o número N ajustado (denominado N') por meio da Equação (2.42).

$$N' = (N \times fS) \times 10^{-10} \quad (2.42)$$

Em que:

N' = número de solicitações N após aplicação do fator de deslocamento.

O programa calcula a porcentagem de área trincada do pavimento a partir da função de transferência proposta por Fritzen (2016). A função é sigmoïdal e pode ser expressa pela Equação (2.43).

$$AT(\%) = \frac{e^{-A} \cdot e^{-B}}{1 - e^{-B}} \quad (2.43)$$

Sendo que:

$$A = \left(\frac{N' - 1}{Z - 1} \right)^n \quad (2.44)$$

$$B = \left(\frac{-1}{Z - 1} \right)^n \quad (2.45)$$

Em que:

AT(%) = percentual de área trincada;

Z, n = parâmetros da função sigmoïdal;

O MeDiNa não possui dados de entrada referentes ao clima do local de a rodovia será construída (no caso de um projeto novo) ou será submetida a manutenção (projeto de reforço). Desse modo, a temperatura constante a partir do qual é feita toda a análise do sistema (em relação à fadiga) é 25 °C, que é o padrão previsto em DNIT (2018a) para o ensaio de fadiga à compressão diametral e em DNIT (2018b) para o ensaio de módulo de resiliência.

2.7 PREVISÃO DA ÁREA TRINCADA

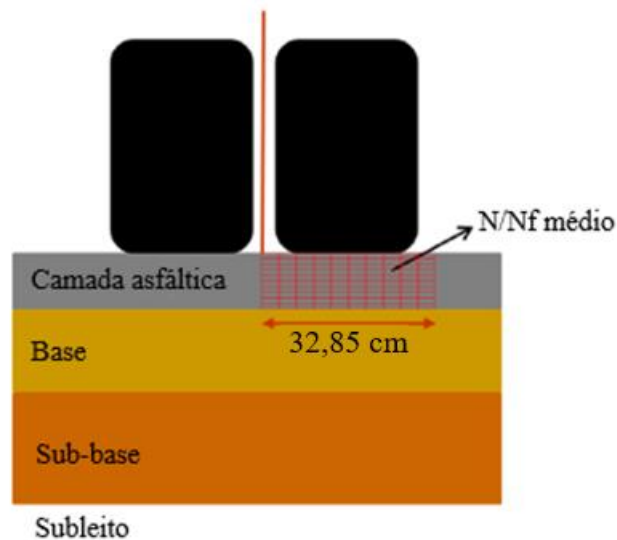
O dano por fadiga é uma propriedade mecanicista e, portanto, representa a própria natureza do material. Contudo, não é possível medir tal danificação em campo. Por isso, torna-se necessário relacionar essas grandezas mecanicistas com uma grandeza observável em campo, o que constitui a parcela empírica de métodos de dimensionamento empírico-mecanicistas, (AASHTO, 2008).

Conforme cita Nascimento (2015), visto que o dano por fadiga traz informações referentes à estrutura do pavimento, tráfego e clima, é razoável que essa grandeza se correlacione com o percentual de área trincada (AT) observado em campo. Sendo assim, em sua tese, o autor propôs uma abordagem para correlacionar os resultados de simulações realizadas no FlexPAVE™ com o desempenho à fadiga, utilizando o protocolo S-VECD, de trechos experimentais localizados em vários locais do Brasil.

Salienta-se que os dados climáticos utilizados por Nascimento (2015) nas simulações de pavimentos brasileiros no FlexPAVE™ foram advindos do EICM. Para os pavimentos localizados na região sul do Brasil, foram utilizadas as temperaturas de San Diego, no estado da Califórnia e, para pavimentos na região sudeste do Brasil, o autor optou por utilizar dados da cidade de Miami, no estado da Flórida, devido à semelhança entre as características climáticas entre essas diferentes cidades e as respectivas características dos trechos brasileiros estudados.

Para o cálculo do dano, usa-se uma malha de 110 pontos dispostos logo abaixo de um dos pneumáticos de um semieixo simples de rodas duplas (Figura 2.39). A malha é composta por 10 colunas, espaçadas 3,65 cm entre si, e de 11 linhas, com espaçamento igual a 1/10 da espessura da camada de revestimento, de modo a captar a danificação em toda a profundidade da camada asfáltica.

Figura 2.39 - Malha de pontos utilizada para o cálculo do dano médio no FlexPAVE™



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

Comparando o dano (expresso em N/N_f) com a AT medida em campo, não foi possível chegar a uma relação unívoca entre ambos. Entretanto, observou-se que quanto mais danificado estava o trecho (maiores valores de N/N_f) no momento em que a AT começou a crescer, maior foi a taxa média de crescimento do dano.

A partir disso, optou-se por aplicar um fator de deslocamento (*shift factor*) às curvas de dano de modo a correlacionar o dano a 10% de AT com alguma característica dessas mesmas

curvas. Desse modo, multiplicando-se o dano por um fator S , é obtido o dano reduzido (Equação (2.46)).

$$N/N_f \text{ red}_S = N/N_f \times S \quad (2.46)$$

Em que:

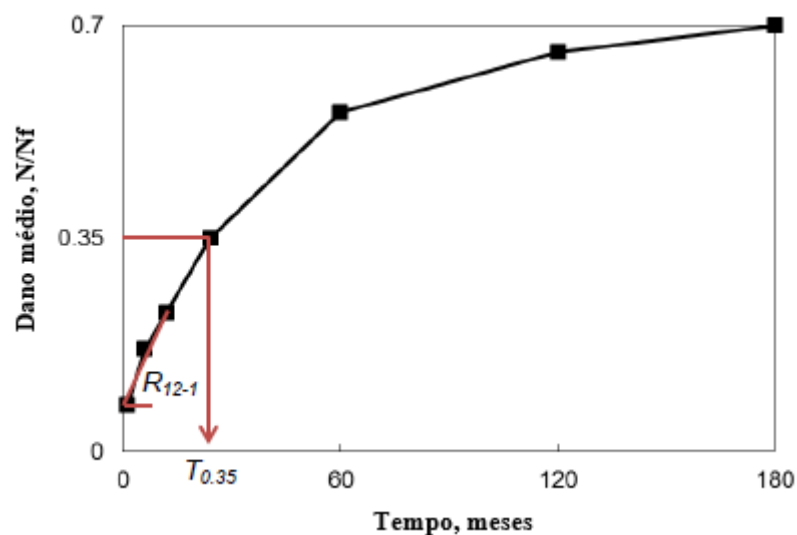
$N/N_f \text{ red}_S$ = dano por fadiga reduzido;

N/N_f = dano por fadiga;

S = fator de deslocamento.

Foram propostos fatores de deslocamento com base no parâmetro $T_{0,35}$ (tempo, em meses, em que o dano chega a 0,35) e R_{12-1} (a taxa secante de danificação entre 12 meses e 1 mês, em dano por mês). A Figura 2.40 exibe graficamente a obtenção dos dois parâmetros.

Figura 2.40 - Parâmetros usados para o cálculo dos fatores de deslocamento

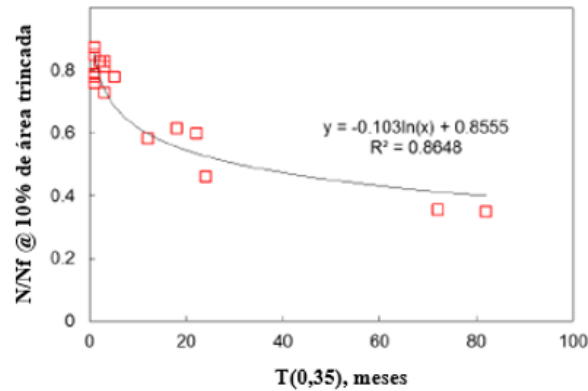


Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

Para este trabalho, foi utilizada somente a função de transferência baseada no parâmetro $T_{0,35}$, visto que ele tem sido o mais utilizado em outros estudos, como o de Bueno *et al.* (2020), por exemplo.

Na Figura 2.41, estão os gráficos correlacionando o parâmetro $T_{0,35}$ com o dano correspondente a uma AT de 10%.

Figura 2.41 - Gráfico de $T_{0,35}$ versus dano média para AT a 10%

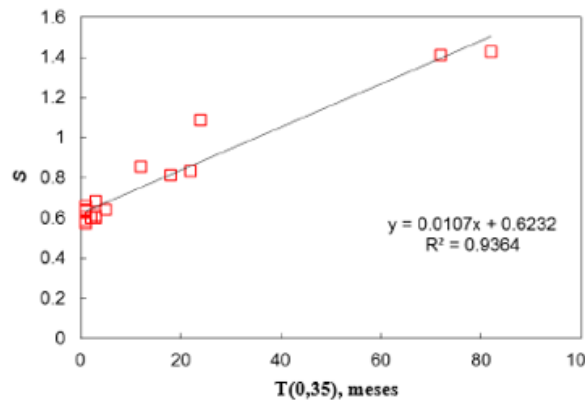


Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

Visto que a danificação para AT de 10% tende a se estabilizar após 80 meses, como representado na Figura 2.41, adota-se o valor máximo de 80 para $T_{0,35}$.

A Figura 2.42 representa relação entre o fator de deslocamento S e o parâmetro $T_{0,35}$.

Figura 2.42 - Gráfico do fator de deslocamento versus $T_{0,35}$



Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

Assim, foi proposto um modelo linear para $T_{0,35}$, conforme apresentado na Equação (2.47).

$$S_{T_{0,35}} = A \times T_{0,35} + B \quad (2.47)$$

Em que:

$S_{T_{0,35}}$ = fator de deslocamento;

A, B = coeficientes de regressão;

$T_{0,35}$ = tempo em que é atingido o dano de 0,35 (meses).

Após a translação aplicada no gráfico de dano, mediante a multiplicação pelo fator de deslocamento, foi utilizada a função de potência segundo a Equação (2.48) para relacionar o dano reduzido à AT.

$$AT = C_1 \times \left(\frac{N}{N_f} \text{red}_S \right)^{C_2} \quad (2.48)$$

Em que:

AT = área trincada (%);

C_1, C_2 = coeficientes de ajuste da função de potência;

$\frac{N}{N_f} \text{red}_S$ = dano reduzido.

Os resultados médios para os coeficientes das funções de deslocamento e para a função de potência correlacionando o dano reduzido com a AT, de acordo com Nascimento (2015), estão na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Coeficientes de deslocamento e de ajuste da função de transferência

Coeficientes de deslocamento	A	0,008274
	B	0,635237
Coeficientes da função	C1	7272,68
	C2	8,6629

Fonte: Adaptado de Nascimento (2015)

A função de transferência proposta apresentou um R^2 de 0,72. O resultado é considerado satisfatório se comparado com a função de transferência utilizada no método de dimensionamento da AASHTO para fissuras do tipo couro de jacaré, com R^2 de 0,275, conforme Pierce e McGovern (2014).

Bueno *et al.* (2020) aplicaram a função de transferência de Nascimento (2015) nos trechos monitorados em Santa Maria/RS. Como resultado, houve previsões satisfatórias de AT em comparação com as medições feitas em campo.

A AT obtida pela Equação (2.48) ainda não apresenta análise de confiabilidade (ou seja, a AT obtida em campo tem 50% de chance de ultrapassar a AT prevista). Devido a isso, Nascimento (2015) propõe a Equação (2.49), que aplica o critério de confiabilidade a partir de uma distribuição normal de AT, e a Equação (2.50), que correlaciona o erro padrão com o dano reduzido por meio de um modelo sigmoidal.

$$AT_{\text{conf}} = AT_{\text{prev}} + Se_{(N/N_f \text{ red}_s)} \times Z_p \quad (2.49)$$

$$Se_{(N/N_f \text{ red}_s)} = a + \frac{b}{\left(1 + e^{c-d \times \log(100 \times N/N_f \text{ red}_s)}\right)} \quad (2.50)$$

Em que:

AT_{conf} = área trincada no nível de confiabilidade P (%);

AT_{prev} = área trincada obtida com dados médios de entrada (obtida pela Equação (2.48));

$Se_{(N/N_f \text{ red}_s)}$ = erro padrão obtido pela calibração de campo;

Z_p = desvio padrão médio dado em função da confiabilidade desejada;

$N/N_f \text{ red}_s$ = dano reduzido obtido com o fator de deslocamento $S_{T_{0,35}}$;

a, b, c e d = fatores de ajuste iguais a 0,1557; 5,7948; 51,4881 e 30,6332, respectivamente.

2.8 CUSTOS DIRETOS DE CONSTRUÇÃO RODOVIÁRIA

As composições de custos utilizadas para a orçamentação na presente pesquisa se basearam no Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO). Portanto, a presente seção apresenta uma resumida revisão sobre ele.

O SICRO é o sistema elaborado pelo DNIT (e extinto DNER) para a composição dos preços de obras rodoviárias no Brasil. Ele é o resultado de uma série de inovações na engenharia rodoviária no Brasil desde a década de 1970, quando a orçamentação por meio de composições de custos começou a ser utilizada. Tendo em vista a constante atualização dos preços dos insumos e serviços, além da extensão do território nacional, os relatórios de composições passaram a ser divulgados trimestralmente para cada estado. Desde 2017, tais relatórios têm sido disponibilizados em forma de planilha eletrônica (DNIT, 2017).

Os relatórios de custos contêm o resumo de todo o conhecimento técnico adquirido quanto à composição de preços de materiais, equipamentos e mão de obra, além de correções realizadas a partir de fatores que influenciam uma obra rodoviária, como o Fator de Influência de Chuvas (FIC) e o Fator de Influência do Tráfego (FIT) (DNIT, 2017).

Cada serviço apresenta um custo unitário, que é definido por DNIT (2017) como a soma dos custos dos insumos (mão de obra, materiais e equipamentos) necessários para que seja executada uma unidade referente ao serviço (como massa, área ou volume, por exemplo). Tais custos têm como referência parâmetros locais de preços e levam em consideração fatores de correção (FIC e FIT) e serviços de terceiros. A partir dos custos unitários, o custo total é obtido pelo produto entre o custo unitário e o quantitativo do item de serviço

As composições de custos, que são definidas como descrições dos insumos necessários à execução de um serviço, podem ser expressas de forma horária ou unitária. A composição horária de um serviço contém a sua descrição, quantidades, produção, custos de mão de obra, utilizações produtivas e improdutivas dos equipamentos e custos dos materiais envolvidos na execução do serviço em uma unidade de tempo, normalmente em uma hora. A composição unitária é a descrição do serviço e dos custos a ele relacionados para a execução de uma unidade relativa ao serviço (DNIT, 2017).

O SICRO adota as duas metodologias para as suas composições de custo. No que diz respeito aos equipamentos e mão de obra, a composição de custos é expressa em forma horária

e, em relação a materiais, serviços auxiliares e transportes, os valores são expressos em formato unitário.

Os itens que compõem cada uma das composições do SICRO, segundo DNIT (2017), são:

- A. Equipamentos: o custo horário de um equipamento é dividido em produtivo (referente à execução efetiva do serviço) e improdutivo (referente ao tempo em que está parado e em espera para operar). Para a determinação do custo do equipamento, são considerados:
 - a. Custo de propriedade: leva em consideração a depreciação do equipamento (em virtude do desgaste e obsolescência), oportunidade de capital, seguros e impostos;
 - b. Custo de manutenção: engloba manutenções preventivas, corretivas, reparos, substituição de peças, perda de produção em virtude de paralisação para manutenção e mão de obra especializada em manutenção;
 - c. Custo de operação: inclui custos com combustível, filtros, lubrificantes e mão de obra de operação.
- B. Mão de obra: os custos com mão de obra são a soma das seguintes parcelas:
 - a. Salários: calculados mensalmente com base no salário nominal de mercados do Cadastro Geral de Empregados e Desempregados (CAGED);
 - b. Encargos sociais: são as contribuições pagas pelo empregador e que incidem diretamente sobre os salários. Pode-se citar os gastos com previdência social, Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS), Seguro Contra Risco de Acidente de Trabalho;
 - c. Encargos complementares: são contribuições relativas à alimentação, transporte, ferramentas manuais, equipamento de proteção individual (EPI), e exames periódicos;
 - d. Encargos adicionais: contemplam serviços como seguro de vida, auxílio funeral, cesta básica e assistência médica e odontológica.
- C. Materiais: os preços dos materiais, segundo o Manual de Custos do DNIT, devem ser relativos a condições de pagamento à vista, que englobem a carga tributária que sobre eles incide, frete e preferencialmente pesquisados com atacadistas, produtores e representantes comerciais, desde que atendam às especificações de materiais do DNIT;

- D. Atividades auxiliares: são aquelas que são essenciais à execução do serviço em questão. Por exemplo, a usinagem de concreto asfáltico é um serviço auxiliar na composição de custos da execução de concreto asfáltico;
- E. Tempo fixo: é custo causado pelo tempo demandado pelas operações de carga, descarga e manobra de um equipamento;
- F. Momento de Transporte: é calculado pelo produto entre a distância de transporte e a massa transportada. Leva em consideração três condições de rodagem: rodovia pavimentada (P), revestimento primário (RP) e leito natural (LN).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

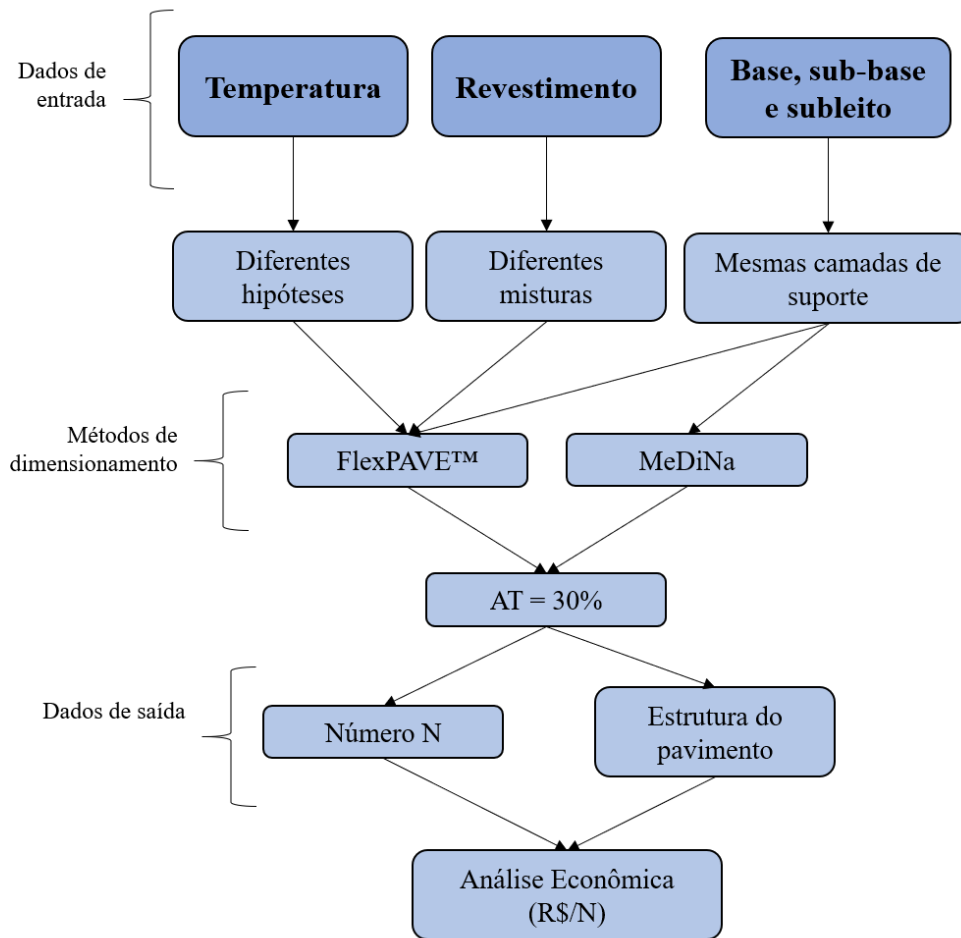
No presente capítulo, são explicitados todos os passos da presente pesquisa desde a obtenção de temperaturas, dos materiais e do tráfego que foram usados como dados de entrada das análises numéricas até a obtenção de parâmetros econômicos realizada a partir da relação entre custo e vida útil do pavimento.

A Figura 3.1 contém o fluxograma das análises realizadas neste estudo. Como adendo, ressalta-se que o FlexPAVE™ não possui uma função específica de dimensionamento, mas sim de análise de esforços e de previsão de desempenho. Contudo, a sua utilização nessa pesquisa foi realizada de modo que, com a aplicação de uma função de transferência e adoção de um critério de ruptura, fosse possível obter um número de solicitações para cada estrutura de pavimento simulada.

Primeiramente, serão apresentados os procedimentos para a construção das hipóteses de temperatura utilizadas nas simulações do FlexPAVE™. Em sequência, são expostos os resultados de outras pesquisas que serviram como dados de entrada nas simulações de desempenho, tanto no que diz respeito aos materiais como ao tráfego.

Subsequentemente, são apresentadas as simulações realizadas no FlexPAVE™, além das equações utilizadas para correlacionar a temperatura com propriedades viscoelásticas dos materiais. Em sequência, trata-se da aplicação da função de transferência de dano para área trincada proposta por Nascimento (2015), das simulações realizadas no MeDiNa e, por fim, da análise econômica a partir dos resultados de vida à fadiga obtidos.

Figura 3.1 - Fluxograma de análises da pesquisa



Fonte: Autor

3.1 DADOS CLIMÁTICOS

Como já foi comentado, o FlexPAVE™ admite dados de temperatura do pavimento medidos a cada hora para o período de um ano e ao longo de diferentes profundidades do pavimento. Portanto, para que fosse efetuada a comparação entre dados de temperatura com variações espaciais e temporais e a hipótese de temperatura constante quanto ao seu efeito na danificação e nas patologias do pavimento, era necessário que fossem obtidos tais dados.

Vale ressaltar que, apesar da disponibilidade de dados de temperatura atmosférica por meio de órgãos como INMET para Santa Maria/RS, não foi realizada na região uma medição de temperatura no pavimento a diferentes horas e profundidades.

Por causa disso, recorreu-se às 6 hipóteses de temperatura que foram consideradas nas previsões de desempenho realizadas nesse estudo, a saber: ISD, DNIT, SHELL, SAN, CHE e PHO.

3.1.1 Hipótese ISD

A pesquisa mais próxima de Santa Maria que foi voltada à medição de temperatura em pavimentos asfálticos foi a de Blass (2011), na cidade de Ijuí/RS, a 178 km de Santa Maria. Conforme comentado na seção 2.3, as temperaturas medidas pelo autor foram utilizadas como base para a construção de uma hipótese de temperaturas que representasse os pavimentos asfálticos de Santa Maria.

As medições de Blass (2011), de acordo com o que foi exposto na seção 2.3, foram realizadas entre as 13:00 e as 16:00, com o objetivo de estimar a temperatura máxima a que o revestimento asfáltico chegaria em cada dia.

Contudo, era necessário estimar as temperaturas do pavimento para as demais horas do dia, para que pudessem ser feitas previsões de desempenho no FlexPAVE™ que simulassem o desempenho de um pavimento asfáltico na região central do Rio Grande do Sul à fadiga.

Para preencher os demais horários, recorreu-se a dados gerados pelo EICM para a cidade americana de San Diego. Conforme comentado na seção 2.3.7, o EICM é o modelo usado no método de dimensionamento empírico-mecanicista para modelar o comportamento térmico de pavimentos asfálticos com base em dados meteorológicos. Assim, são calculadas as temperaturas de revestimentos asfálticos em diferentes profundidades, para cada hora do dia e para todo o ano.

A cidade de San Diego foi a mais apropriada para a presente pesquisa tendo em vista que Nascimento (2015) utilizou os dados dessa localidade para realizar as simulações no FlexPAVE™ com trechos da região Sul do Brasil (incluindo trechos localizados em Santa Maria) na validação da função de transferência de AT por ele proposta.

Os dados provenientes do EICM para a cidade de San Diego fornecidos para o GEPPASV contêm temperaturas nas seguintes profundidades: 0 (superfície); 2,0; 4,1; 6,1; 8,1; 10,2; 12,2; 14,2; 16,3; 18,3 e 20,3 cm.

Com base nesses dados de San Diego, foram preenchidos os horários faltantes nas medições realizadas na cidade de Ijuí. Para isso, foram obtidas, por interpolação linear, as temperaturas de San Diego nas mesmas profundidades em que foram feitas as medições por Blass (2011) em Ijuí. Por exemplo, as temperaturas a 3 cm de profundidade em San Diego foram calculadas interpolando as temperaturas a 2 e a 4,1 cm. A partir desse processo, foram obtidas as temperaturas para as demais profundidades (0, 3, 6, 9, 12 e 15 cm), que foram aquelas utilizadas Blass (2011).

Conforme citado na seção 2.3, as medições de temperatura realizadas pelo autor não ocorreram em todos os dias, mas sim naqueles em que houve maior insolação em cada mês. Como resultado, Blass (2011) divulgou temperaturas das 13:00 às 16:00 para um único dia representativo de cada mês.

Tendo em vista as características do processo de medição de temperaturas em Ijuí, não foi considerado razoável utilizar tais temperaturas como sendo estimativas das médias para cada mês. Por isso, antes de se realizar o processo de interpolação para as demais horas do dia, viu-se a necessidade de minorar as temperaturas medidas por Blass (2011).

Para isso, foram utilizadas as relações entre temperaturas médias e máximas de San Diego para cada mês do ano. Para fins de exemplificação estão, na Tabela 3.1, as temperaturas do mês de janeiro na superfície do pavimento das 13:00 às 16:00.

Tabela 3.1 - Processo de minoração das temperaturas de Ijuí no mês de janeiro na superfície do pavimento

Hora	San Diego			Ijuí	
	(A) T. Média (°C)	(B) T. Máxima (°C)	(C) Média/máxima	(D) T. Original (°C)	(E) T. Minorada (°C)
13:00	36,53	41,80	0,87	65,50	57,24
14:00	36,05	41,70	0,86	69,10	59,73
15:00	34,97	41,00	0,85	66,40	56,64
16:00	32,83	38,60	0,85	62,40	53,07

Fonte: Autor

Na Tabela 3.1, as colunas A e B contêm, respectivamente, as temperaturas médias e máximas de San Diego no mês em questão para os mesmos horários e à mesma profundidade. Dividindo-se os valores da coluna A por B, obtém-se a relação entre as temperaturas médias e máximas (coluna C).

As temperaturas medidas por Blass (2011) em Ijuí, na coluna D, representam aproximações das temperaturas máximas do pavimento, conforme a metodologia apresentada pelo autor em sua pesquisa. Ao se multiplicar os valores da coluna C pelos valores da coluna D, são obtidas as temperaturas de Ijuí minoradas (coluna E), que são estimativas das temperaturas médias nessa localidade.

A partir das temperaturas minoradas, foram utilizadas as mesmas proporções observadas nos dados de San Diego para extrapolar os dados de Ijuí para as demais horas do dia. Ou seja, para se obter a temperatura do pavimento das 0:00 até 12:00 (horários em que não houve medições de temperatura em Ijuí), foi observada a relação que as temperaturas entre 0:00 e 12:00 em San Diego têm com a temperatura às 13:00 na mesma localidade. No exemplo da Tabela 3.2, estão as temperaturas em San Diego das 0:00 até 13:00 para julho na superfície do revestimento.

Tabela 3.2 – Processo de extrapolação das temperaturas de Ijuí no mês de julho na superfície do revestimento entre 0:00 e 12:00

	(A)	(B)	(C)
Hora	T. Média em San Diego (°C)	Proporções	T. Estimada em Ijuí (°C)
00:00	12,9	0,534	18,5
01:00	12,4	0,514	17,8
02:00	12,2	0,504	17,5
03:00	11,9	0,493	17,1
04:00	11,7	0,482	16,7
05:00	11,4	0,469	16,2
06:00	11,5	0,476	16,5
07:00	12,2	0,502	17,4
08:00	14,5	0,599	20,7
09:00	18,0	0,745	25,8
10:00	21,2	0,876	30,3
11:00	23,3	0,961	33,3
12:00	24,1	0,996	34,5
13:00	24,2	1,000	34,6

Fonte: Autor

Nas colunas A e B, respectivamente, estão as temperaturas médias de San Diego para o mês e a profundidade em questão e as proporções das temperaturas das 0:00 às 12:00 em relação à temperatura às 13:00. Na coluna C, essas proporções são multiplicadas pela temperatura

minorada em Ijuí às 13:00 e, com isso, são obtidas temperaturas extrapoladas das 0:00 às 12:00 que simulam a temperatura média mensal do revestimento asfáltico em Ijuí nesse período do dia.

De forma análoga, foi feito o mesmo processo de extrapolação mostrado na Tabela 3.2 para as temperaturas das 17:00 às 23:00. Conforme mostra a Tabela 3.3, foram calculadas as proporções entre a temperatura em San Diego às 16:00 e as temperaturas das 17:00 às 23:00. A temperatura minorada em Ijuí às 16:00 foi multiplicada por cada uma dessas proporções e foram, com isso, simuladas as temperaturas em Ijuí das 17:00 às 23:00.

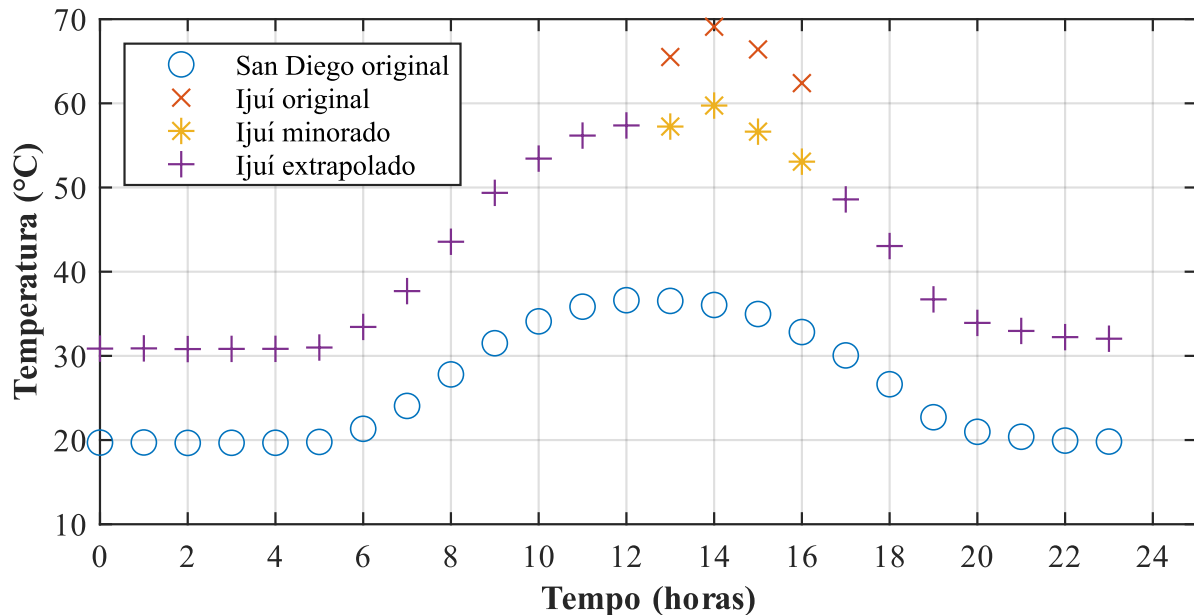
Tabela 3.3 – Processo de extrapolação das temperaturas de Ijuí no mês de julho na superfície do revestimento entre 17:00 e 23:00

	(A)	(B)	(C)
Hora	T. Média em San Diego (°C)	Proporções	T. Estimada em Ijuí (°C)
16:00	20,2	1,000	32,2
17:00	17,2	0,853	27,4
18:00	15,8	0,783	25,2
19:00	15,0	0,744	23,9
20:00	14,6	0,722	23,2
21:00	14,0	0,694	22,3
22:00	13,6	0,675	21,7
23:00	13,1	0,648	20,8

Fonte: Autor

A partir desse processo, manteve-se as temperaturas minoradas de Ijuí das 13:00 às 16:00 e utilizou-se os dados de San Diego para se obter as temperaturas para os demais horários. Na Figura 3.2, para exemplificação, estão as temperaturas médias do mês de janeiro na superfície correspondentes às medições de Blass (2011), aos dados do EICM para San Diego, juntamente com as temperaturas de Ijuí após o processo de minoração e extrapolação para o respectivo período.

Figura 3.2 – Média das temperaturas no mês de janeiro na superfície do pavimento de Ijuí, San Diego e resultado da extrapolação dos dados de Ijuí



Fonte: Autor

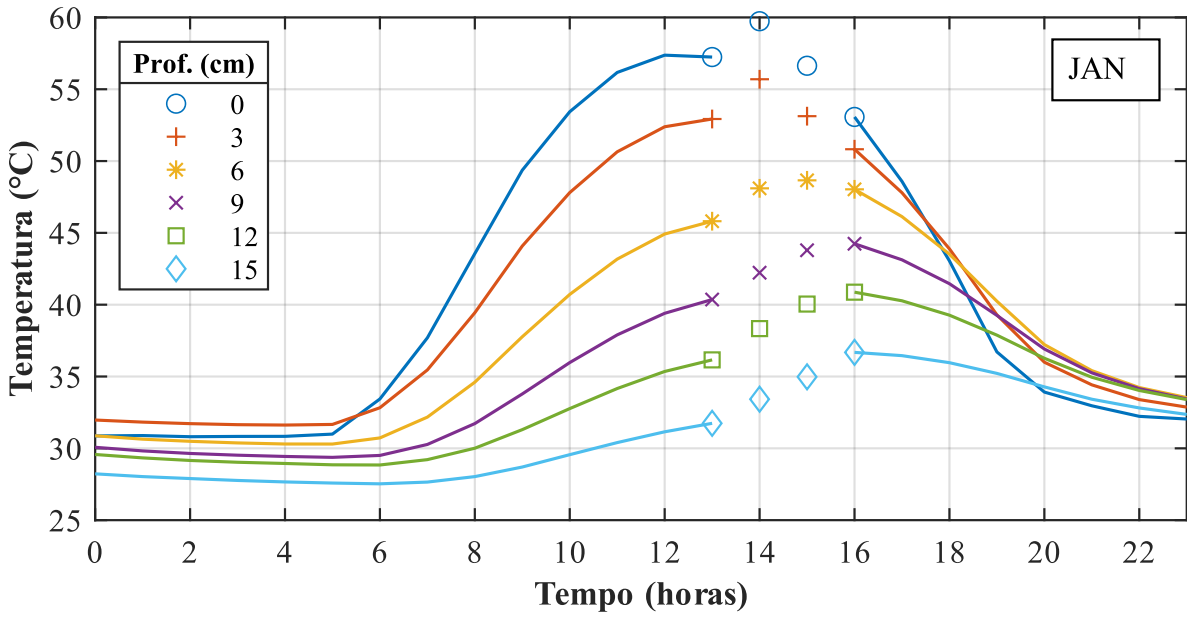
Na Figura 3.2, os pontos em azul representam as temperaturas médias de San Diego ao longo do ano para cada hora, os pontos vermelhos representam as temperaturas medidas por Blass (2011) em Ijuí, os pontos amarelos representam as temperaturas em Ijuí após o processo de minoração já comentado e, por fim, os pontos roxos representam a extrapolação feita para as demais horas do dia.

Com a combinação dos dados medidos em Ijuí e dos dados extrapolados por meio do EICM para a cidade de San Diego, foi preparado um arquivo com variações diárias, sazonais e espaciais de temperatura na camada de revestimento, que recebeu o nome de ISD (Ijuí e San Diego).

Como a entrada de dados no FlexPAVE™ comporta 30 dias para cada mês, foi excluído o 31º dia dos meses de janeiro, março, maio, julho, agosto, outubro e dezembro e o 29º dia de fevereiro (visto que era ano bissexto) foi duplicado.

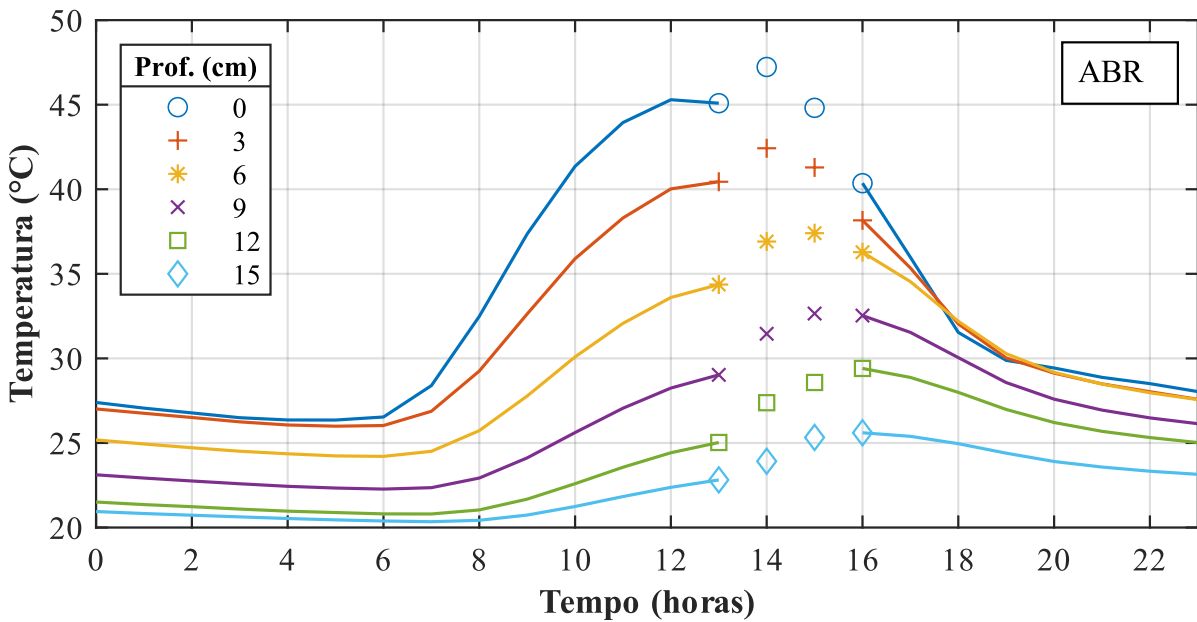
Da Figura 3.3 à Figura 3.6, estão os resultados obtidos para meses representativos das quatro estações do ano, a saber: janeiro (verão), abril (outono), julho (inverno) e outubro (primavera). Os marcadores indicam as temperaturas medidas por Blass (2011) minoradas e a linha corresponde à extrapolação.

Figura 3.3 - Temperaturas médias de janeiro da hipótese ISD



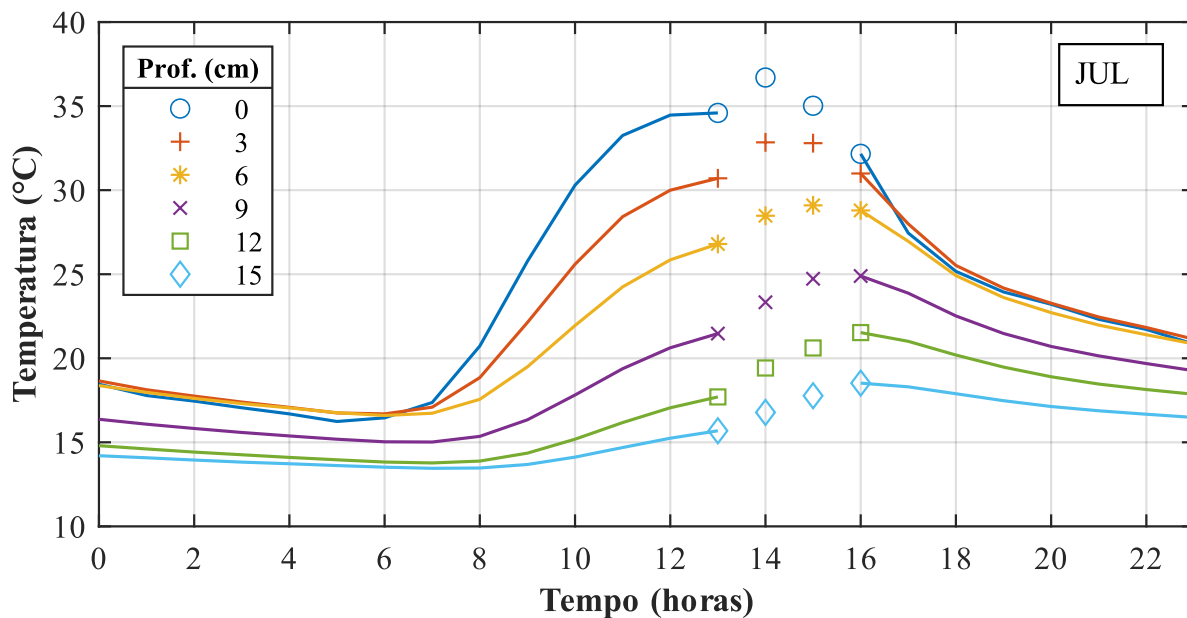
Fonte: Autor

Figura 3.4 - Temperaturas médias de abril da hipótese ISD



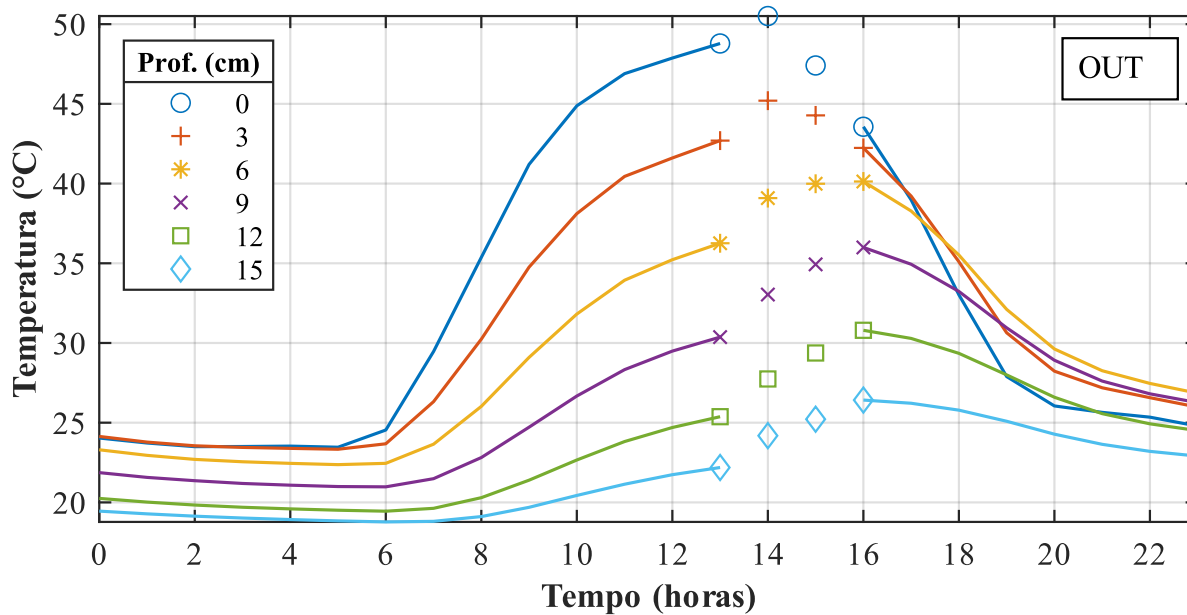
Fonte: Autor

Figura 3.5 - Temperaturas médias de julho da hipótese ISD



Fonte: Autor

Figura 3.6 - Temperaturas médias de outubro da hipótese ISD



Fonte: Autor

É perceptível que, à medida que a profundidade aumenta, a variação da temperatura ao longo do tempo é amortecida e o pico ocorre de forma defasada em relação à superfície, o que é condizente com a teoria da transferência de calor e de modelos como o de Barber (1957).

3.1.2 Hipótese SHELL

Além da hipótese baseada nas temperaturas combinadas de Ijuí e San Diego, também se utilizou o método para obter a temperatura média do pavimento baseado no *Pavement Design Manual* publicado pela Shell (SHELL, 1978). Tal abordagem foi utilizada com vistas a se obter uma estimativa de temperatura média de pavimentos asfálticos na região central do Rio Grande do Sul.

Primeiramente, são obtidas as temperaturas máximas e mínimas do ar de cada mês a partir de séries históricas. Com a média dessas duas temperaturas para cada mês, são calculados os fatores de ponderação (*Weight Factors*) para cada mês (Equação (3.1)). Posteriormente, utiliza-se a média dos 12 fatores obtidos para todo o ano e pode-se obter a temperatura média ponderada para o ar (Equação (3.2)) e para o pavimento (Equação (3.3)).

$$WF = 10^{(-1,224 + 0,06508T_{ar} - 0,000145T_{ar}^2)} \quad (3.1)$$

$$WMAAT = 19,66 + 16,91 \times \log(WF) + 0,3117 \times [\log(WF)]^2 \quad (3.2)$$

$$WMAPT = -12,4 + \frac{6,32 \times WMAAT}{\ln(WMAAT)} \quad (3.3)$$

Em que:

WF = fator de ponderação;

T_{ar} = média das temperaturas máxima e mínima do respectivo mês (°C);

WMAAT = a temperatura média ponderada do ar (°C);

WMAPT = a temperatura média ponderada do pavimento (°C).

Visto que o INMET não possui dados de temperatura para a cidade de Ijuí, foram utilizadas as temperaturas da estação meteorológica mais próxima, que está localizada em Cruz

Alta/RS, a 46 km de Ijuí. Portanto, as equações (3.1) a (3.3) foram aplicadas às temperaturas dessa cidade referentes à série de 1961 a 2019, que apresentava dados para 90% dos meses do período. Os resultados dos fatores de ponderação para Cruz Alta estão na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Fatores de ponderação para as temperaturas médias mensais de Cruz Alta

	T. Máx. (°C)	T. Mín. (°C)	Média mensal (°C)	WF
Janeiro	29,6	18,5	24,0	1,8046
Fevereiro	28,9	18,4	23,7	1,7169
Março	27,8	17,1	22,4	1,4543
Abril	25,0	14,4	19,7	1,0078
Mai	21,4	11,7	16,5	0,646
Junho	19,2	9,6	14,4	0,4814
Julho	19,0	9,0	14,0	0,4534
Agosto	21,0	10,4	15,7	0,5775
Setembro	22,0	11,6	16,8	0,6719
Outubro	24,9	13,8	19,3	0,9549
Novembro	27,4	15,7	21,5	1,2845
Dezembro	29,1	17,8	23,4	1,6591
			Média dos WF	1,0594

Fonte: Autor

Como resultado, a temperatura média ponderada do ar resultou em 20,1 °C e, do pavimento, 29,9 °C. Assim, foi elaborada a hipótese SHELL, que considera uma temperatura constante de 29,9 °C para o pavimento ao longo de todas as profundidades e para todo o ano.

3.1.3 Hipótese DNIT

Como foi apresentado na seção 2.6, a temperatura padronizada para o ensaio de fadiga à compressão diametral no Brasil é de 25 °C (DNIT, 2018a). Além disso é a temperatura prevista pelo DNIT para o ensaio de módulo de resiliência de misturas asfálticas (DNIT, 2018b)

Devido a isso, foi levada em consideração a hipótese DNIT, que considera uma temperatura de 25 °C para o pavimento e que não altera em função da sazonalidade, do horário e nem da profundidade.

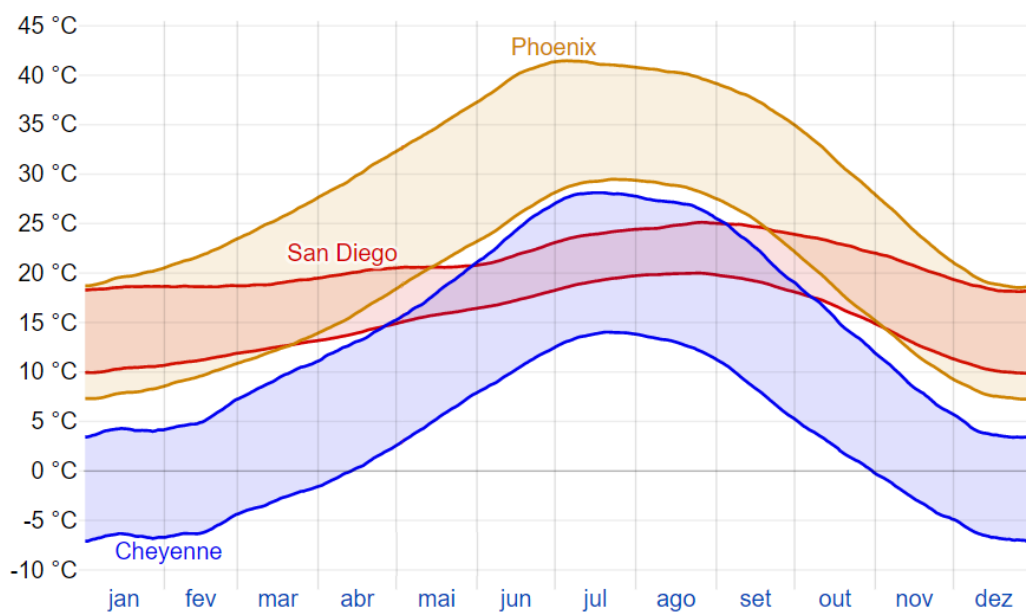
3.1.4 Hipóteses SAN, CHE e PHO

Além das hipóteses já citadas, também foram realizadas simulações no FlexPAVE™ utilizando as temperaturas originais do EICM para as cidades americanas de San Diego, Cheyenne e Phoenix.

A cidade de San Diego foi escolhida por ter sido utilizada na elaboração da função de transferência de Nascimento (2015) representando os trechos monitorados do sul do Brasil. A essa hipótese de temperatura deu-se o nome de SAN.

Para efeito de comparação, foram escolhidas ainda as cidades americanas de Cheyenne, no estado do Wyoming, representando um clima com menores médias térmicas (constituindo a hipótese CHE), e Phoenix, localizada no estado do Arizona, representando um clima com maiores temperaturas ao longo do ano (hipótese PHO). A Figura 3.7 exibe e comparação das temperaturas máximas e mínimas médias entre San Diego, Cheyenne e Phoenix ao longo do ano.

Figura 3.7 - Comparação entre as temperaturas máximas e mínimas médias das cidades de San Diego, Cheyenne e Phoenix



Fonte: Weather Spark (2021b)

É necessário comentar, no caso da hipótese CHE, que apresenta temperaturas negativas, que não foi levada em consideração a influência que os ciclos de gelo e degelo têm sobre o desempenho do pavimento.

3.1.5 Resumo das hipóteses

Segue, na Tabela 3.5, o resumo das temperaturas de cada hipótese para diferentes profundidades e estações do ano.

Tabela 3.5 - Resumo das hipóteses de temperatura

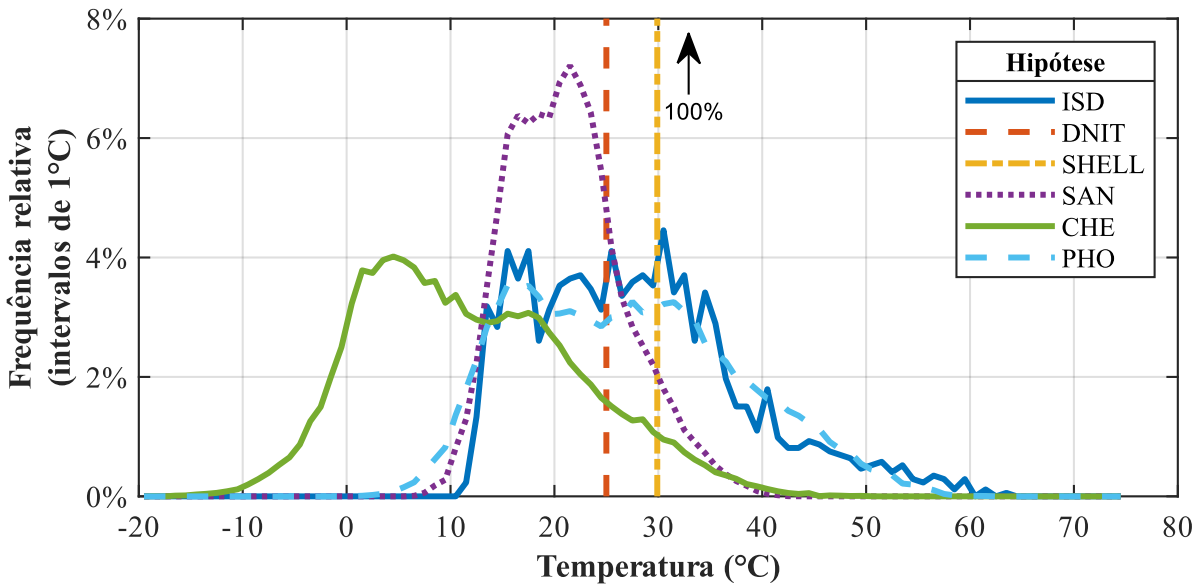
Hipótese	Prof. (cm)	Temperaturas médias (°C)			
		Verão	Outono	Inverno	Primavera
ISD	0 – 5	41,5	26,4	23,9	38,1
	5 – 10	36,7	22,6	20,2	32,7
	10 – 15	31,5	18,6	16,9	26,3
SHELL	0 – 5	29,9	29,9	29,9	29,9
	5 – 10	29,9	29,9	29,9	29,9
	10 – 15	29,9	29,9	29,9	29,9
DNIT	0 – 5	25	25	25	25
	5 – 10	25	25	25	25
	10 – 15	25	25	25	25
SAN	0 – 5	26,1	18,2	17,2	23,3
	5 – 10	26,0	18,3	17,2	23,1
	10 – 15	25,9	18,4	17,1	23,0
CHE	0 – 5	23,0	11,3	2,0	10,8
	5 – 10	22,9	11,8	2,2	10,8
	10 – 15	22,9	12,2	2,4	10,8
PHO	0 – 5	37,6	20,9	18,3	32,1
	5 – 10	37,0	21,2	18,4	31,4
	10 – 15	36,4	21,6	18,5	30,7

Fonte: Autor

Na Figura 3.8 e na Figura 3.9, respectivamente, se encontram o polígono de frequências relativas e de frequências relativas acumuladas de temperatura para todas as hipóteses levando em consideração as temperaturas para profundidades inferiores a 15 cm. Os gráficos referentes

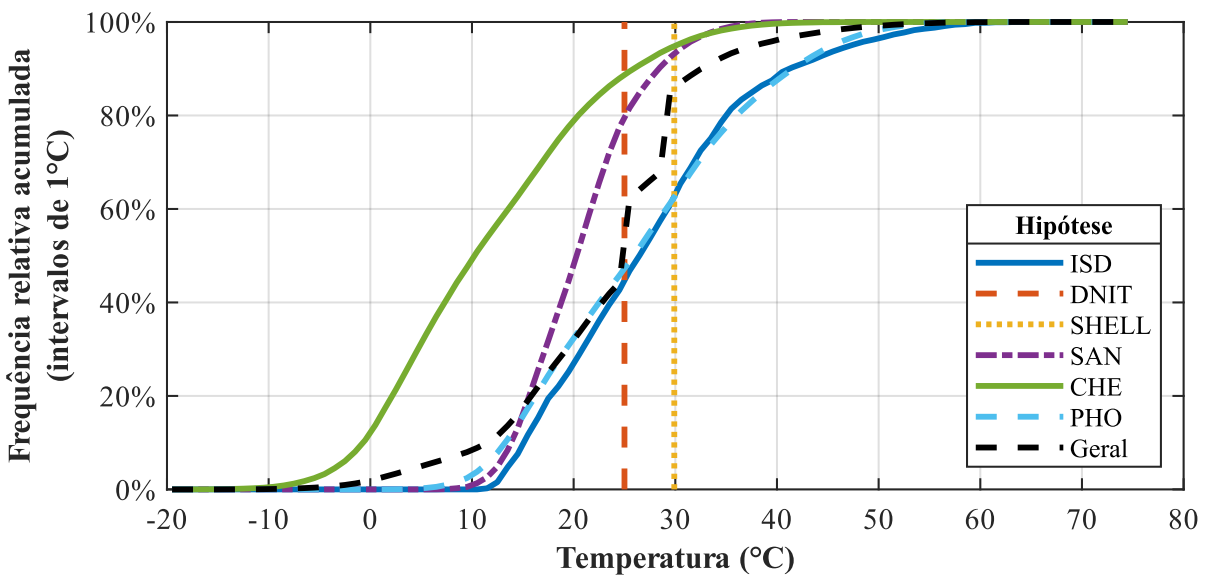
às hipóteses DNIT e SHELL, dado que apresentam temperatura constante, são linhas verticais que se estendem até a ordenada de 100%.

Figura 3.8 – Polígonos de frequências relativas de temperatura para as hipóteses ISD, SAN, CHE e PHO



Fonte: Autor

Figura 3.9 – Polígonos de frequências relativas acumuladas de temperatura para as hipóteses ISD, SAN, CHE e PHO



Fonte: Autor

Comenta-se, a título de informação, que, além das hipóteses de temperatura apresentadas, foi aplicado o modelo de Barber (1957) na tentativa de se obter mais uma estimativa da temperatura de pavimentos asfálticos na região central do estado do Rio Grande do Sul utilizando temperaturas da cidade de Cruz Alta. Porém, as estimativas resultaram em valores implausíveis, como por exemplo temperaturas negativas durante a noite em meses do verão.

3.2 MATERIAIS DE PAVIMENTAÇÃO PARA AS SIMULAÇÕES

Foram utilizados, nas simulações no FlexPAVE™, dados obtidos em pesquisas realizadas pelo GEPPASV da Universidade Federal de Santa Maria em parceria com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e a Petróleo Brasileiro S. A. (PETROBRAS).

Para averiguar a influência da temperatura sobre a previsão de desempenho de diferentes misturas asfálticas, optou-se por manter uma estrutura fixa para as camadas de subleito, sub-base e base e variar somente as propriedades da camada de revestimento asfáltico.

Para as camadas de subleito, sub-base e base, foram considerados os materiais e espessuras presentes no trecho monitorado da Av. Hélio Basso, localizada em Santa Maria/RS, que será abreviado neste trabalho como HB. O tráfego do trecho foi liberado em 18/05/2013 e apresenta 300 m de extensão. Seu monitoramento é realizado pelos membros do GEPPASV em parceria com a Rede de Tecnologia em Asfaltos da ANP/PETROBRAS. Para mais informações sobre o trecho, podem ser consultados os trabalhos de Rossato (2015), Santos (2015), Bueno (2016), Bueno (2019) e Bordin (2020).

A escolha do trecho HB se deu pelo fato de ser o único dos trechos monitorados pelo GEPPASV cuja camada de revestimento já havia sido caracterizada, até o momento, à fadiga tanto pelo protocolo exigido pelo FlexPAVE™ (S-VECD) quanto pelo protocolo exigido pelo MeDiNa (ensaio à compressão diametral).

Na Figura 3.10, está o mapa do estado do Rio Grande do Sul com destaque para as cidades de Santa Maria, onde está localizado o trecho HB, Ijuí, que é onde foram medidas as temperaturas por Blass (2011) e a cidade de Cruz Alta, cujas temperaturas foram utilizadas na hipótese SHELL, como comentado na seção 3.1.2. Conforme colocado na seção 2.1, toda a

região central e a região noroeste do estado do Rio Grande do Sul (onde se localizam as 3 cidades em questão) apresenta características climáticas semelhantes e tem a mesma classificação climática (subtropical úmido com clima oceânico com verão quente).

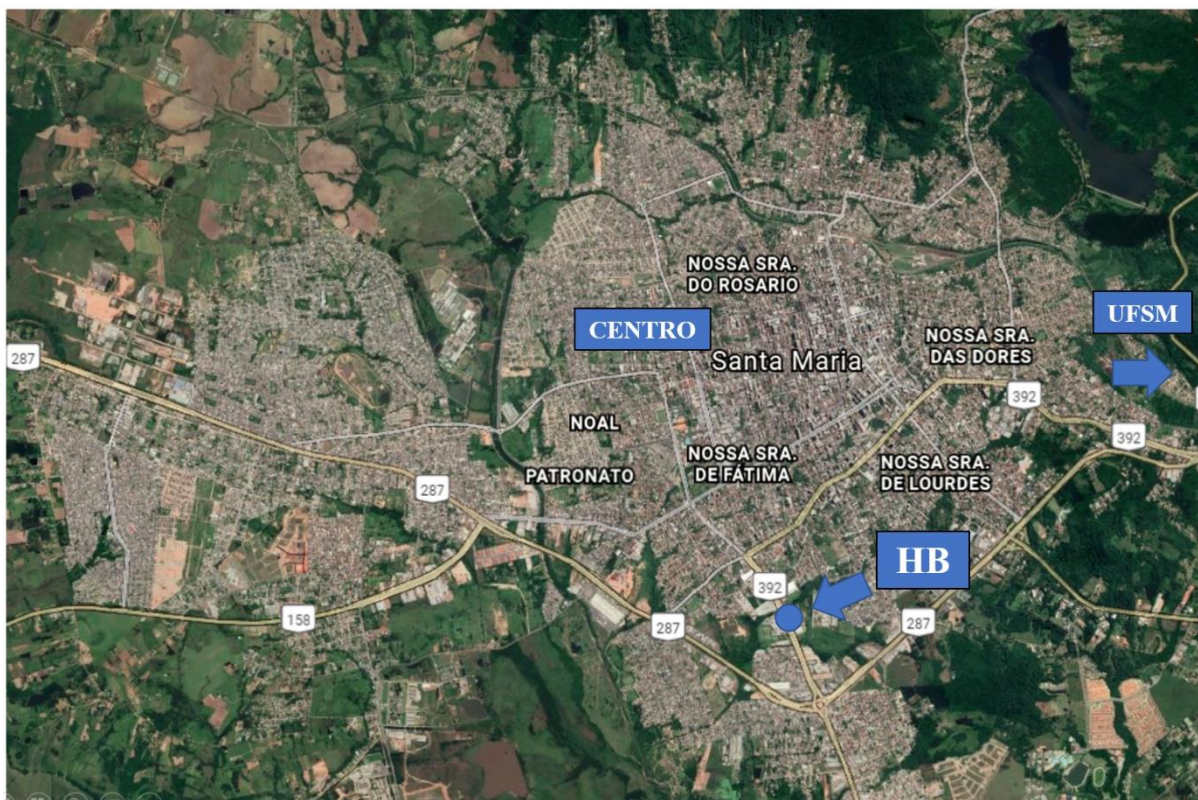
Figura 3.10 - Mapa do Rio Grande do Sul com destaque nas cidades de Santa Maria, Ijuí e Cruz Alta



Fonte: Autor

Na Figura 3.11, está representada a localização do trecho HB na cidade de Santa Maria, na Figura 3.12, há uma foto da Av. Hέλvio Basso e, na Figura 3.13, está esquematizada a estrutura do pavimento do trecho.

Figura 3.11 - Localização do trecho HB na região central de Santa Maria



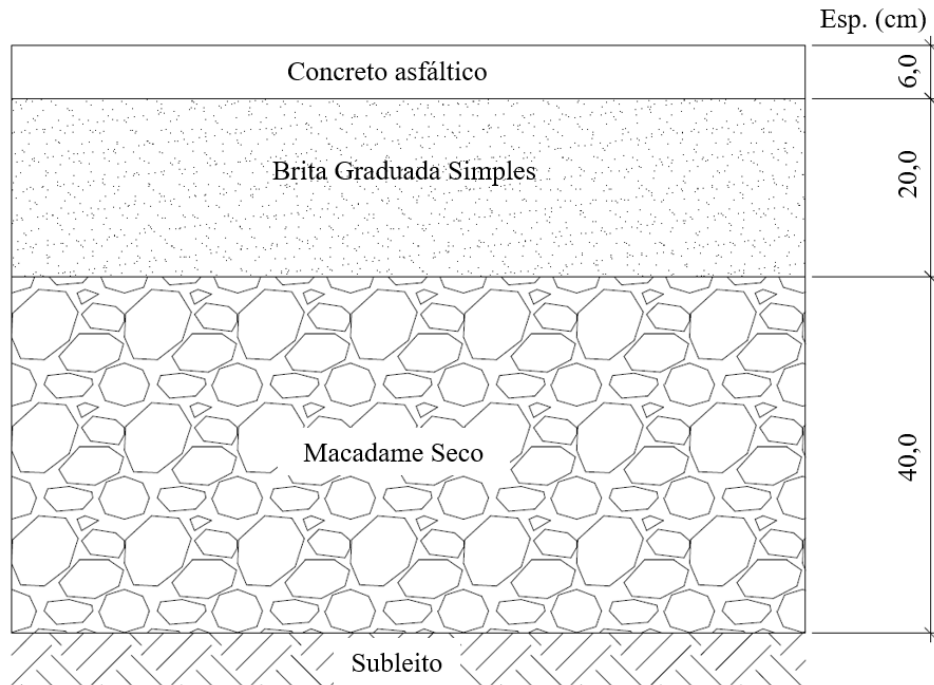
Fonte: Autor

Figura 3.12 – Foto da Av. Hέλvio Basso



Fonte: Autor

Figura 3.13 – Estrutura original do pavimento do trecho HB



Fonte: Autor

A medição em campo da AT nos trechos monitorados pela UFSM foi realizada por meio da divisão da faixa em retângulos de comprimento de 1 ou 2 metros por 1/3 da largura da faixa (Figura 3.14). Caso houvesse alguma trinca ou fissura de fadiga no retângulo (tanto isoladas como interligadas, transversais ou longitudinais), considera-se a área como totalmente trincada. Assim, a AT (em percentual) é obtida pela razão entre o número de retângulos onde foi observada alguma trinca ou fissura e o número total de retângulos no trecho conforme o procedimento citado. A descrição detalhada da quantificação da AT está em DNIT (2020).

Figura 3.14 - Procedimento de medição em campo de AT



Fonte: Bueno (2019)

Na Tabela 3.6, são apresentadas as medições de campo de AT do trecho HB na faixa 1 e na faixa 2.

Tabela 3.6 - AT medida em campo no trecho HB

Tempo (meses)	AT (%)	
	Faixa 1	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

Fonte: Bueno (2019)

No caso da camada de revestimento, além do concreto asfáltico utilizado no próprio trecho HB, foram escolhidas 5 misturas asfálticas estudadas por Faccin (2018) e Schuster (2018) e 1 mistura estudada por Correa (2020), conforme será mostrado na seção 3.2.4.

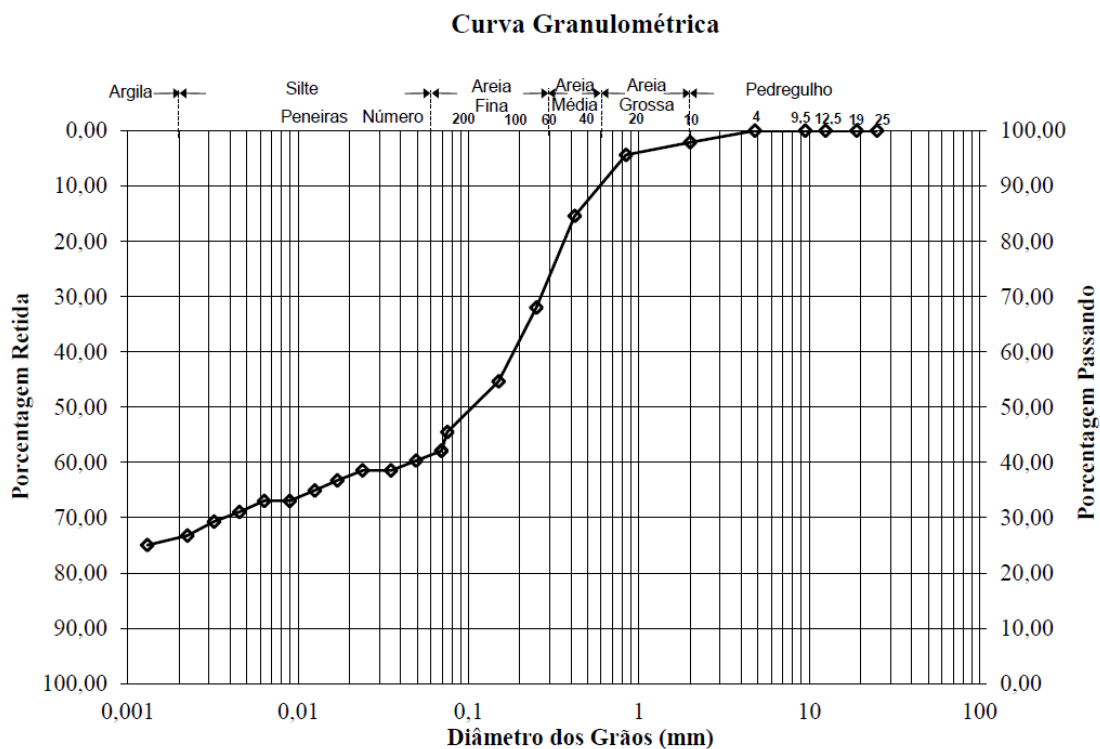
Nas próximas seções, serão expostas as caracterizações dos materiais considerados para cada camada do pavimento nas previsões de desempenho desta pesquisa.

3.2.1 Subleito

O subleito do trecho HB foi caracterizado por Santos (2015) como sendo do tipo areia argilosa (SC) segundo o Sistema de Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e, segundo o Sistema Rodoviário de Classificação, foi classificado como A-6. Conforme Bueno (2019), a rigidez característica da camada, obtida por meio de retroanálise, é de 160 MPa para a faixa 2.

Na Figura 3.15, está a curva granulométrica do material e, na Tabela 3.7, os resultados dos ensaios de índices físicos, limites de Atterberg, compactação e CBR.

Figura 3.15 - Curva granulométrica do material do subleito do trecho HB



Fonte: Santos (2015)

Tabela 3.7 - Caracterização do subleito do trecho HB

Densidade real (g/cm³)	2,598
Limite de Plasticidade (%)	18,0
Índice de Plasticidade (%)	18,7
Massa esp. apar. máx (g/cm³)	1,894
Umidade ótima (%)	13,6
CBR (%)	7,00
Expansão (%)	0,17

Fonte: Santos (2015)

3.2.2 Sub-base

A sub-base foi executada em macadame seco. Conforme Santos (2015), o material graúdo ficou situado no intervalo entre 2 e 5 polegadas e o material de enchimento foi pó de pedra. A rigidez característica da camada, conforme Bueno (2019), é de 189 MPa para a faixa 2. A Figura 3.16 mostra a camada de sub-base na fase de execução.

Figura 3.16 - Sub-base do trecho HB em fase de execução

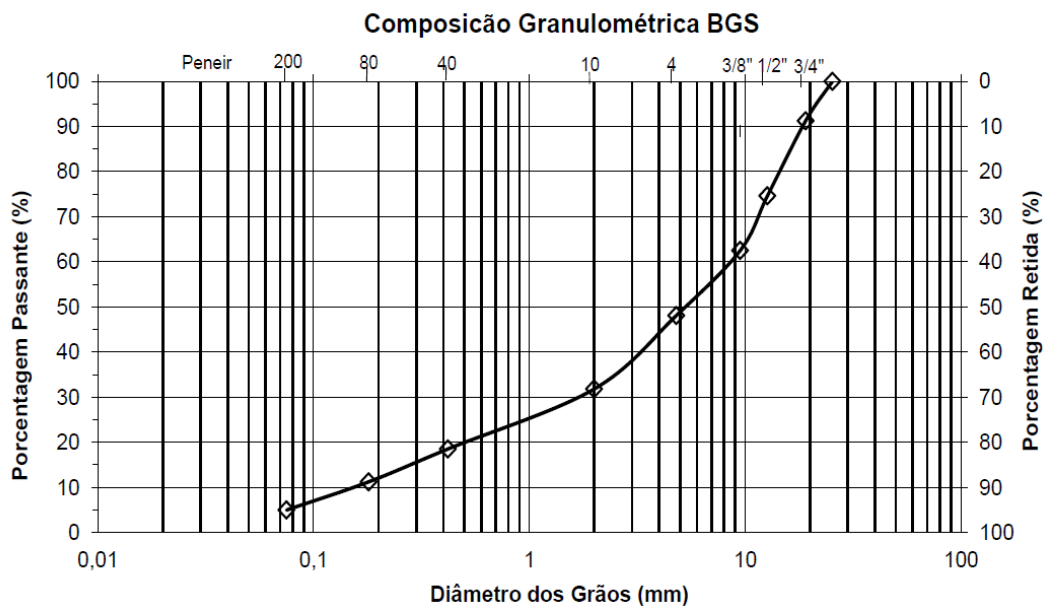


Fonte: Santos (2015)

3.2.3 Base

A base do trecho HB foi executada com brita graduada simples. A Figura 3.17 contém a curva granulométrica determinada por Santos (2015) para o material, que foi classificado na faixa A do DNIT. De acordo com Bueno (2019), a rigidez característica obtida para a camada por meio de retroanálise é de 569 MPa para a faixa 2. Os resultados dos ensaios de Abrasão Los Angeles, compactação e CBR estão na Tabela 3.8.

Figura 3.17 - Curva granulométrica do material da base do trecho HB



Fonte: Santos (2015)

Tabela 3.8 - Caracterização da base do trecho HB

Perda por abrasão (%)	15
Massa esp. apar. máx (g/cm³)	2,294
Umidade ótima (%)	8,2
CBR (%)	108
Expansão (%)	0

Fonte: Santos (2015)

3.2.4 Revestimento

Para a camada de revestimento, foram consideradas, além da mistura asfáltica original do trecho HB (chamada nessa pesquisa de CA-50/70-HB), 6 outras misturas, sendo 5 delas caracterizadas por Faccin (2018) e Schuster (2018) e uma por Correa (2020).

Dentre aquelas abordadas por Faccin (2018) e Schuster (2018), foram escolhidas 2 misturas com ligante convencional, 2 com ligante modificado por polímero SBS e 1 mistura com adição de borracha, sendo provenientes de 5 diferentes usinas de asfalto no estado do Rio Grande do Sul. Tais misturas foram escolhidas com o objetivo de abranger diferentes tipos de materiais que sejam usuais e que resultam em desempenhos em campo distintos.

As misturas de Schuster (2018) selecionadas para essa pesquisa foram aquelas que apresentaram comportamento mediano nas simulações realizadas pelo autor no FlexPAVE™ para cada tipo de ligante e estão destacadas em azul na Tabela 3.9.

Da pesquisa de Correa (2020), foi escolhida uma mistura usinada em laboratório com ligante convencional e adição de 30% de RAP, proveniente da fresagem da RS-400 no trecho entre os municípios de Candelária e Sobradinho. A Figura 3.18 mostra a localização das usinas de asfalto de onde foram obtidas as misturas de Faccin (2018) e Schuster (2018) e do trecho da RS-400, de onde foi obtido o material fresado que foi abordado por Correa (2020).

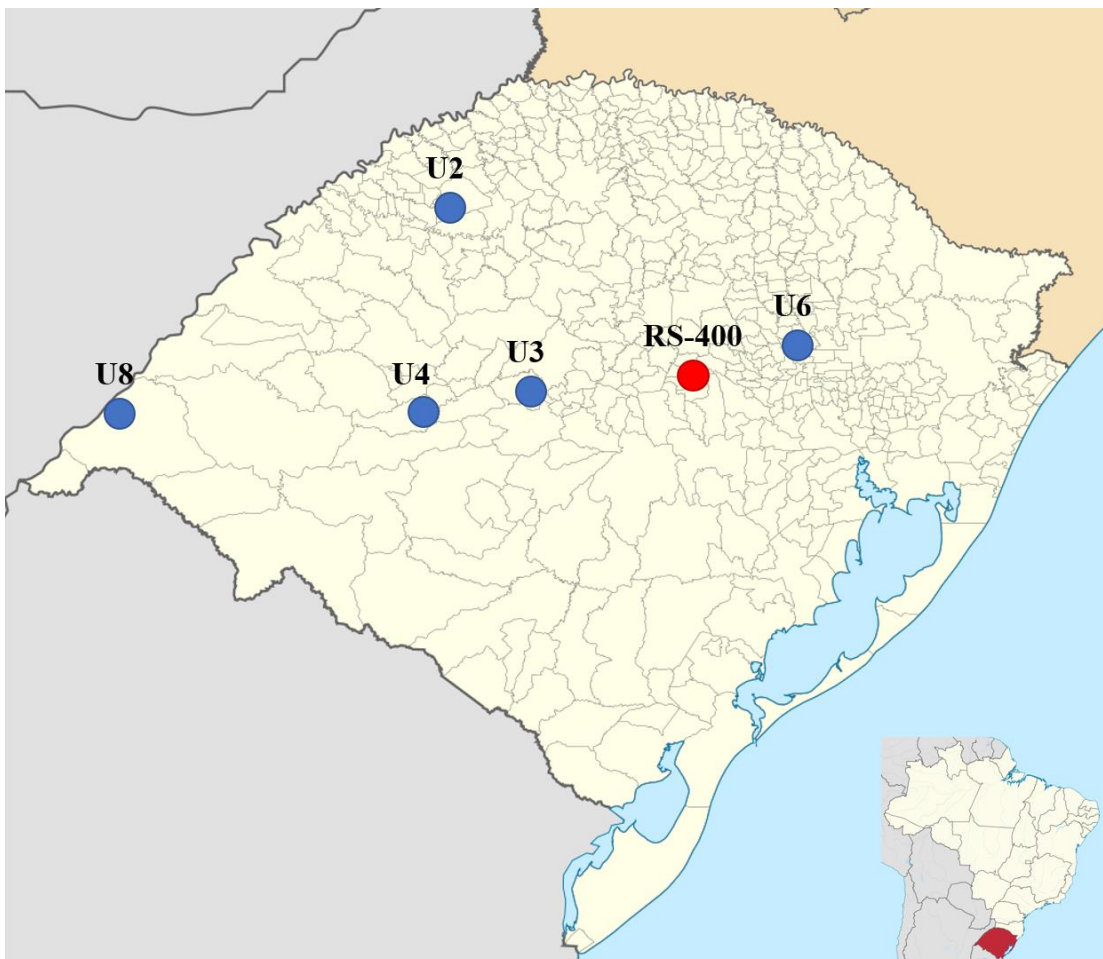
Tabela 3.9 - *Ranking* do dano por fadiga das misturas de Schuster (2018)

Ligante	Mistura	<i>Ranking</i> Dano @ 120 meses
	U1-DAER-FXA-50/70	8
	U2-DAER-FXB-50/70	1
	U4-DNIT-FXC-50/70	6
	U4-DNIT-FXB-50/70	5
	U8-DNIT-FXB-50/70	4
50/70	U8-DNIT-FXC-50/70	7
	U10-DNIT-FXC-50/70	9
	U11-DAER-FXA-50/70	2
	U13-DNIT-FXB-50/70	11
	U14-DNIT-FXC-50/70	3
	U14-DNIT-FXB-50/70	10
SBS	U2-DNIT-FXC-65/90	6

Ligante	Mistura	Ranking Dano @ 120 meses
	U2-DNIT-FXC-60/85	7
	U5-DNIT-FXB-60/85	4
	U6-DNIT-FXC-60/85	5
	U7-DNIT-FXC-60/85	9
	U9-DNIT-FXC-60/85	3
	U12-DAER-FXB-60/85	2
	U12-DAER-FXC-60/85	1
	U14-DNIT-FXC-60/85	8
	U3-DAER-FXB-ECO	2
BOR	U5-DNIT-FXB-ECO	3
	U5-DAER-FXB-ECO	1
TLA	U9-DNIT-FXC-TLAF	1

Fonte: Adaptado de Schuster (2018)

Figura 3.18 - Localização das usinas de asfalto U2, U3, U4 e U6 e do trecho da RS-400 de onde foi obtido o material fresado



Fonte: Adaptado de Schuster (2018) e Correa (2020)

A nomenclatura das misturas adotada nessa pesquisa e suas informações de origem, suas respectivas usinas, o município onde foram usinadas e o tipo do ligante asfáltico estão na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Dados das misturas asfálticas

Nomenclatura adotada por Schuster (2018)	Nomenclatura adotada nesta pesquisa	Usina de asfalto	Município de localização da usina	Tipo de ligante asfáltico
U4-DNIT-FXC-50/70	CA-50/70-U4	U4	Dilermando de Aguiar	50/70
U8-DNIT-FXC-50/70	CA-50/70-U8	U8	Uruguaiiana	50/70
U2-DNIT-FXC-65/90	CA-SBS-U2	U2	Santo Ângelo	AMP 65/90
U6-DNIT-FXC-60/85	CA-SBS-U6	U6	Veranópolis	AMP 60/85
U3-DAER-FXB-ECO	CA-BOR	U3	Itaara	ECOFLEX AB-8
Nomenclatura adotada por Correa (2020)	Nomenclatura adotada nesta pesquisa	Fonte do material reciclado	Tipo de ligante asfáltico	
30% RAP	CA-RAP30	RS-400	50/70 + 30% RAP	

Fonte: Adaptado de Schuster (2018) e Correa (2020)

Vale destacar que os ligantes 50/70, AMP e ECOFLEX AB-8 correspondem, respectivamente, ao ligante convencional, ao ligante modificado por SBS e o ligante com adição de borracha.

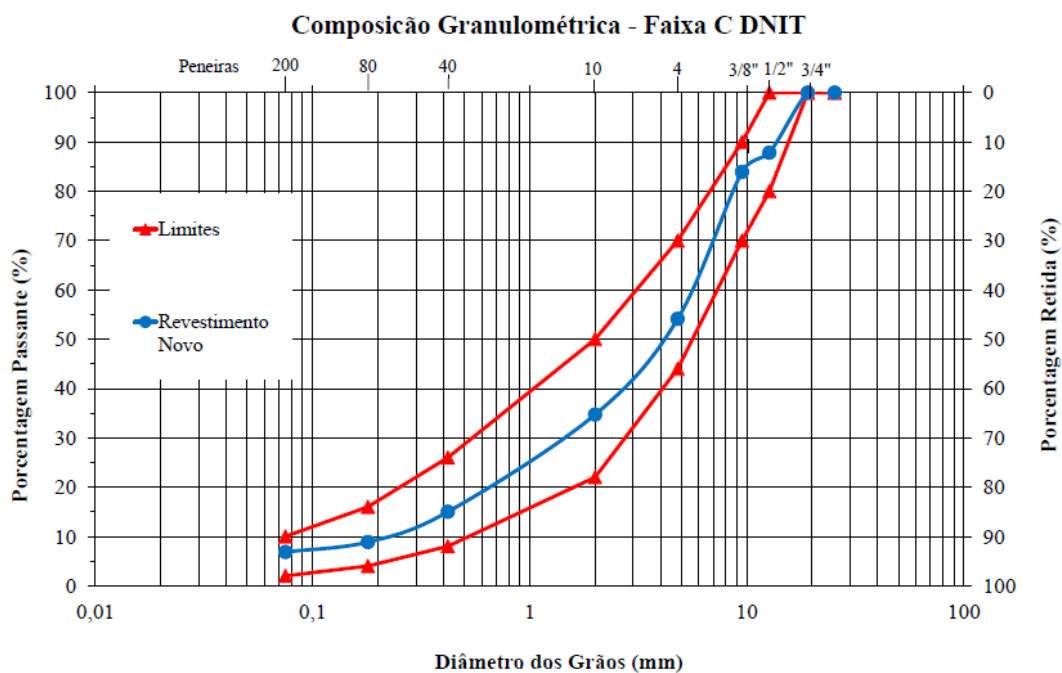
Também se comenta que, no presente estudo, não foram levadas em consideração as diferentes propriedades térmicas (condutividade térmica e coeficiente de convecção, por exemplo) para os diferentes tipos de misturas asfálticas, sendo utilizadas as mesmas propriedades de condutividade para todas as misturas asfálticas nas simulações.

A caracterização das misturas asfálticas utilizadas neste trabalho será exposta da seção 3.2.4.1 à seção 3.2.4.7.

3.2.4.1 Mistura CA-50/70-HB

O concreto asfáltico original do trecho HB foi caracterizado por Santos (2015). Na Figura 3.19, está a curva granulométrica do material, que foi enquadrada na Faixa C do DNIT, e na Tabela 3.11, estão os resultados dos demais ensaios realizados com os agregados.

Figura 3.19 - Curva granulométrica da mistura CA-50/70-HB



Fonte: Santos (2015)

Tabela 3.11 – Características de CA-50/70-HB relativas aos agregados

Abrasão (%)	10,82
Equivalente de areia (%)	85,44
Sanidade (%)	0,757
Absorção (%)	2,458

Fonte: Santos (2015)

Os resultados dos ensaios relacionados aos parâmetros volumétricos da mistura asfáltica estão na Tabela 3.12.

Tabela 3.12 – Parâmetros volumétricos da mistura CA-50/70-HB

Teor de ligante (%)	5,9
Volume de vazios (%)	4,00
VAM (%)	17,98
Dens. ap. (g/cm³)	2,21
DMT RICE (g/cm³)	2,355

Fonte: Santos (2015)

Na Tabela 3.13, estão as informações relativas ao modelo de Arrhenius que, conforme mostrado na seção 2.4.3, são usados para a montagem da curva mestra, além das informações referentes ao modelo S-VECD, incluindo os parâmetros da curva C versus S e do parâmetro de falha G^R , conforme comentado na seção 2.4.4.

Tabela 3.13 - Parâmetros da modelagem da curva mestra e do modelo S-VECD referentes à mistura CA-50/70-HB

Arrhenius		Modelo Sigmoidal		S-VECD			
T ref. (°C)	20	a	0,947	C × S		G^R × N_f	
a1	6,01E-04	b	3,396	C10	1	Gama	1,52E+07
a2	-1,62E-01	d	1,263	C11	1,41E-03	Delta	-1,41
a3	3,00E+00	g	0,602	C12	0,5431		

Fonte: Bueno (2019)

Na Tabela 3.14, estão os coeficientes da série de Prony da mistura CA-50/70-HB que, conforme explicado na seção 2.4.3, são usados para a modelagem do comportamento viscoelástico do material. A série dessa mistura possui 21 elementos e não 35, ao contrário das misturas estudadas por Faccin (2018) e Schuster (2018) pelo fato de que o ensaio de módulo complexo da mesma se deu nas instalações do CENPES. O uso de mais elementos na modelagem em séries de Prony foi implementado no GEPPASV a partir das pesquisas de Boeira (2018) e Schuster (2018), conforme recomendações encontradas na pesquisa de Babadopulos (2013).

Tabela 3.14 - Coeficientes da série de Prony para a mistura CA-50/70-HB

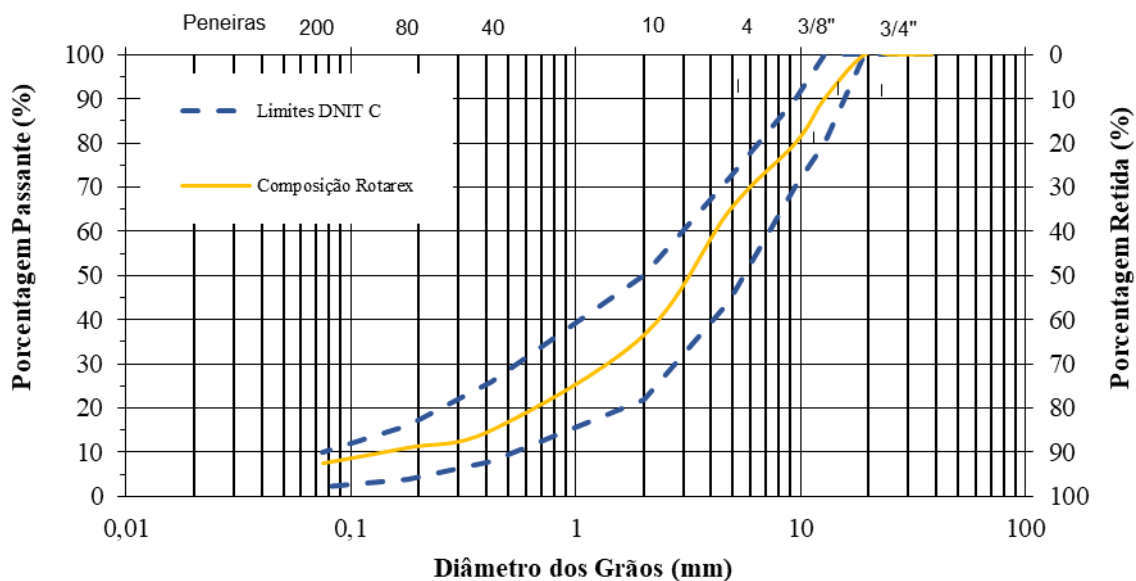
Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)
2,00E+10	297	2,00E-01	2800000
2,00E+09	279	2,00E-02	4090000
2,00E+08	547	2,00E-03	4590000
2,00E+07	1090	2,00E-04	4010000
2,00E+06	2230	2,00E-05	3010000
2,00E+05	4830	2,00E-06	2040000
2,00E+04	11400	2,00E-07	1310000
2,00E+03	30700	2,00E-08	806000
2,00E+02	97700	2,00E-09	487000
2,00E+01	351000	2,00E-10	662000
2,00E+00	1180000		

Fonte: Bueno (2019)

3.2.4.2 Mistura CA-50/70-U4

A curva granulométrica da mistura CA-50/70-U4, de conformidade com o que é apresentado por Schuster (2018), está na Figura 3.20. A mistura se enquadra na Faixa C do DNIT e, na Tabela 3.15, estão os demais resultados dos ensaios relativos aos agregados, realizados por Faccin (2018).

Figura 3.20 - Curva granulométrica da mistura CA-50/70-U4



Fonte: Schuster (2018)

Tabela 3.15 - Características de CA-50/70-U4 relativas aos agregados

Abrasão (%)	11,0
Equivalente de areia (%)	57,7
Sanidade (%)	1,9
Absorção (%)	1,5

Fonte: Faccin (2018)

Na Tabela 3.16, estão os parâmetros volumétricos da mistura CA-50/70-U4 obtidos por Faccin (2018).

Tabela 3.16 - Parâmetros volumétricos da mistura CA-50/70-U4

Teor de ligante (%)	5,10
Volume de vazios (%)	3,70
VAM (%)	16,50
DMM (g/cm³)	2,635

Fonte: Faccin (2018).

Na Tabela 3.17, estão os valores dos coeficientes do modelo 2S2P1D, os coeficientes do modelo WLF e de Arrhenius, da curva C versus S e do critério de falha G^R , de acordo com Schuster (2018), para a mistura CA-50/70-U4

Tabela 3.17 - Parâmetros dos modelos WLF, Arrhenius, 2S2P1D e do S-VECD para a mistura CA-50/70-U4

WLF		2S2P1D		S-VECD	
T ref. (°C)	21	E₀₀ (MPa)	50	C × S	
C1	19,54	E₀ (MPa)	32200	C10	1
C2	152,17	K	0,220	C11	4,00E-04
Arrhenius		h	0,605	C12	0,6219
T ref. (°C)	21	δ	2,40	G^R × N_f	
a1	3,00E-04	τ_E (s)	0,095	Gama	6,16E+07
a2	-1,50E-01	β	20000	Delta	-1,45
a3	2,99E+00				

Fonte: Schuster (2018)

Na Tabela 3.18, estão os coeficientes da série de Prony da mistura CA-50/70-U4, conforme Schuster (2018).

Tabela 3.18 - Coeficientes da série de Prony para a mistura CA-50/70-U4

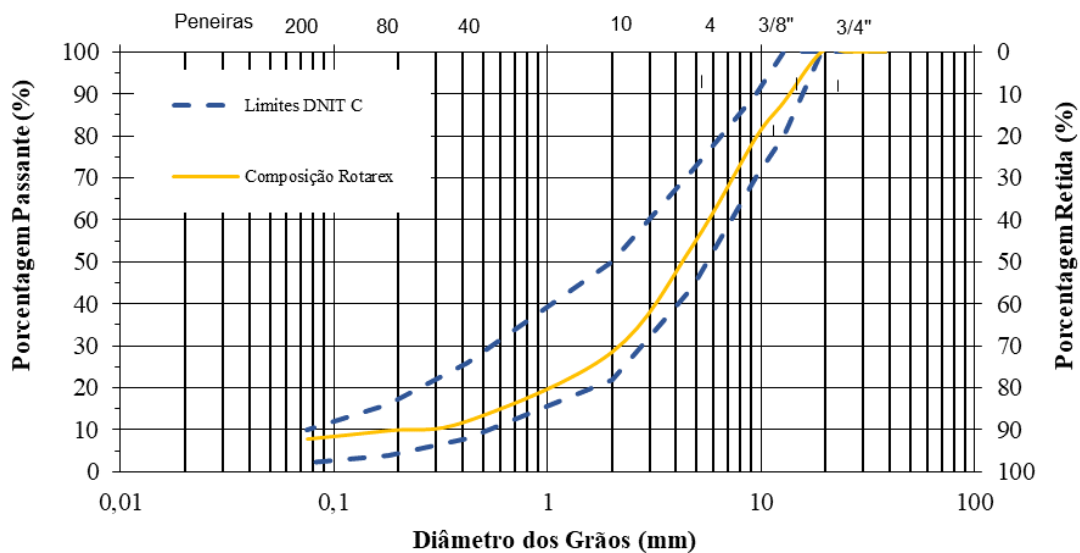
Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)
5,48E-15	8,52E+04	1,53E-08	6,00E+05	3,38E-02	2,52E+06
1,89E-14	4,81E+04	5,26E-08	7,21E+05	1,09E-01	2,28E+06
6,52E-14	5,50E+04	1,80E-07	9,35E+05	3,49E-01	1,86E+06
2,25E-13	4,39E+04	6,16E-07	1,12E+06	1,11E+00	1,32E+06
7,76E-13	8,75E+04	2,10E-06	1,39E+06	3,58E+00	8,19E+05
2,68E-12	8,33E+04	7,16E-06	1,61E+06	1,18E+01	4,54E+05
9,22E-12	1,40E+05	2,43E-05	1,90E+06	3,97E+01	2,35E+05
3,18E-11	1,51E+05	8,23E-05	2,12E+06	1,39E+02	1,19E+05
1,09E-10	2,29E+05	2,78E-04	2,35E+06	5,09E+02	5,97E+04
3,77E-10	2,62E+05	9,34E-04	2,49E+06	1,99E+03	3,02E+04
1,30E-09	3,72E+05	3,10E-03	2,60E+06	7,25E+03	1,69E+04
4,46E-09	4,43E+05	1,03E-02	2,61E+06		

Fonte: Schuster (2018)

3.2.4.3 Mistura CA-50/70-U8

A curva granulométrica da mistura CA-50/70-U8, segundo Schuster (2018), está na Figura 3.21. A mistura se enquadra na Faixa C do DNIT e, na Tabela 3.19, estão as demais caracterizações dos agregados, realizadas por Faccin (2018).

Figura 3.21 - Curva granulométrica da mistura CA-50/70-U8



Fonte: Schuster (2018)

Tabela 3.19 - Características de CA-50/70-U8 relativas aos agregados

Abrasão (%)	12,5
Equivalente de areia (%)	61,7
Sanidade (%)	4,7
Absorção (%)	2,6

Fonte: Faccin (2018)

Na Tabela 3.20, estão os parâmetros volumétricos da mistura CA-50/70-U8 obtidos por Faccin (2018).

Tabela 3.20 - Parâmetros volumétricos da mistura CA-50/70-U8

Teor de ligante (%)	5,00
Volume de vazios (%)	4,05
VAM (%)	16,30
DMM (g/cm³)	2,568

Fonte: Faccin (2018)

Na Tabela 3.21, estão os valores dos coeficientes dos modelos WLF e de Arrhenius, do modelo 2S2PID, e os coeficientes da curva C versus S e do critério de falha G^R , conforme Schuster (2018), para a mistura CA-50/70-U8.

Tabela 3.21 - Parâmetros dos modelos WLF, Arrhenius, 2S2P1D e do S-VECD para a mistura CA-50/70-U8

WLF		2S2P1D		S-VECD	
T ref. (°C)	21	E₀₀ (MPa)	60	C × S	
C1	20,66	E₀ (MPa)	31750	C10	1
C2	151,83	K	0,225	C11	8,60E-04
Arrhenius		h	0,54	C12	0,5463
T ref. (°C)	21	δ	2,05	G^R × N_f	
a1	1,40E-03	τ_E (s)	0,080	Gama	4,51E+07
a2	-2,29E-01	β	20000	Delta	-1,45
a3	4,20E+00				

Fonte: Faccin (2018) e Schuster (2018)

Na Tabela 3.22, estão os coeficientes da série de Prony da mistura CA-50/70-U8, de acordo com Schuster (2018).

Tabela 3.22 - Coeficientes da série de Prony para a mistura CA-50/70-U8

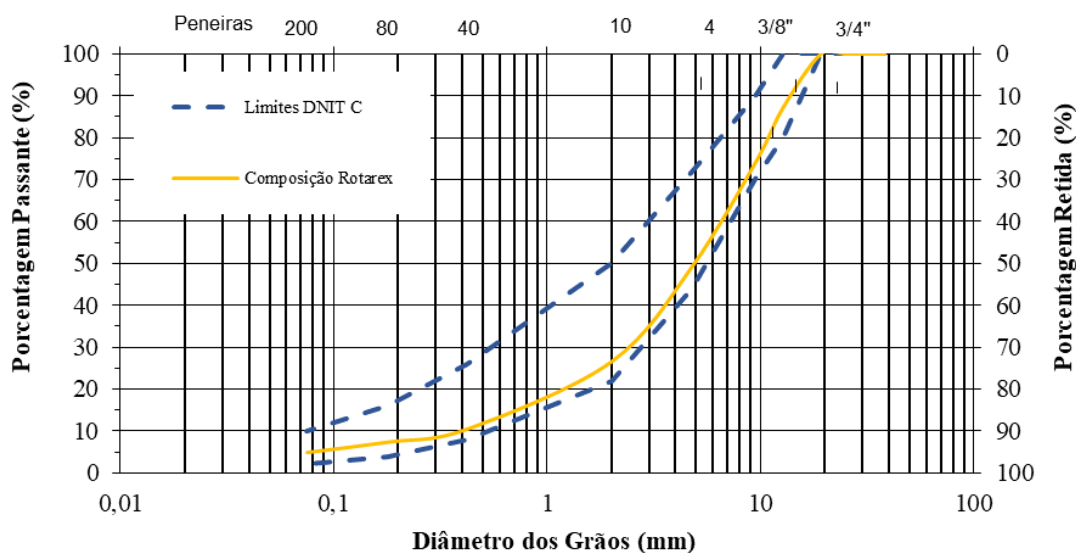
Ti (sec)	Ei (kPa)	Ti (sec)	Ei (kPa)	Ti (sec)	Ei (kPa)
5,48E-15	6,56E+04	1,54E-08	5,09E+05	3,36E-02	2,61E+06
1,89E-14	3,71E+04	5,27E-08	6,26E+05	1,10E-01	2,27E+06
6,53E-14	4,04E+04	1,81E-07	8,19E+05	3,55E-01	1,81E+06
2,25E-13	3,66E+04	6,19E-07	1,00E+06	1,16E+00	1,29E+06
7,76E-13	6,75E+04	2,11E-06	1,27E+06	3,79E+00	8,41E+05
2,68E-12	6,82E+04	7,20E-06	1,52E+06	1,26E+01	5,04E+05
9,23E-12	1,10E+05	2,44E-05	1,82E+06	4,27E+01	2,87E+05
3,18E-11	1,24E+05	8,27E-05	2,10E+06	1,48E+02	1,59E+05
1,10E-10	1,85E+05	2,78E-04	2,39E+06	5,26E+02	8,69E+04
3,78E-10	2,18E+05	9,33E-04	2,60E+06	1,93E+03	4,87E+04
1,30E-09	3,07E+05	3,10E-03	2,75E+06	6,22E+03	2,82E+04
4,47E-09	3,76E+05	1,03E-02	2,75E+06		

Fonte: Schuster (2018)

3.2.4.4 Mistura CA-SBS-U2

A curva granulométrica da mistura CA-SBS-U2, conforme Schuster (2018), está na Figura 3.22. A mistura se enquadra na Faixa C do DNIT e, na Tabela 3.23, estão as demais caracterizações dos agregados, realizadas por Faccin (2018).

Figura 3.22 - Curva granulométrica da mistura CA-SBS-U2



Fonte: Schuster (2018)

Tabela 3.23 - Características de CA-SBS-U2 relativas aos agregados

Abrasão (%)	16,0
Equivalente de areia (%)	56,9
Sanidade (%)	3,2
Absorção (%)	1,4

Fonte: Faccin (2018)

Na Tabela 3.24, estão os parâmetros volumétricos da mistura CA-SBS-U2 obtidos por Faccin (2018).

Tabela 3.24 - Parâmetros volumétricos da mistura CA-SBS-U2

Teor de ligante (%)	5,15
Volume de vazios (%)	4,00
VAM (%)	18,00
DMM (g/cm³)	2,669

Fonte: Faccin (2018)

Na Tabela 3.25, estão os valores dos coeficientes do modelo WLF e 2S2P1D, os coeficientes do modelo de Arrhenius, da curva C versus S e do critério de falha G^R , conforme Schuster (2018), para a mistura CA-SBS-U2.

Tabela 3.25 - Parâmetros dos modelos WLF, Arrhenius, 2S2P1D e do S-VECD para a mistura CA-SBS-U2

WLF		2S2P1D		S-VECD	
T ref. (°C)	21	E₀₀ (MPa)	150	C × S	
C1	19,74	E₀ (MPa)	34700	C10	1
C2	151,94	K	0,221	C11	5,70E-04
Arrhenius		h	0,55	C12	0,5735
T ref. (°C)	21	δ	2,60	G^R × N_f	
a1	8,00E-04	τ_E (s)	0,080	Gama	3,15E+07
a2	-1,67E-01	β	5000	Delta	-1,35
a3	3,17E+00				

Fonte: Schuster (2018)

Na Tabela 3.26, estão os coeficientes da série de Prony da mistura CA-SBS-U2, de acordo com Schuster (2018).

Tabela 3.26 - Coeficientes da série de Prony para a mistura CA-SBS-U2

Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)
5,47E-15	119000	1,53E-08	707000	3,38E-02	2370000
1,89E-14	65600	5,24E-08	822000	1,11E-01	2150000
6,52E-14	82300	1,79E-07	1060000	3,63E-01	1840000
2,25E-13	54500	6,13E-07	1230000	1,19E+00	1430000
7,76E-13	120000	2,09E-06	1510000	3,91E+00	1010000
2,68E-12	104000	7,11E-06	1710000	1,31E+01	637000
9,21E-12	183000	2,41E-05	1980000	4,53E+01	373000
3,18E-11	187000	8,16E-05	2170000	1,63E+02	208000
1,09E-10	290000	2,75E-04	2360000	6,13E+02	113000

Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)
3,77E-10	316000	9,23E-04	2450000	2,39E+03	61100
1,29E-09	455000	3,10E-03	2510000	8,38E+03	37200
4,45E-09	522000	1,03E-02	2470000		

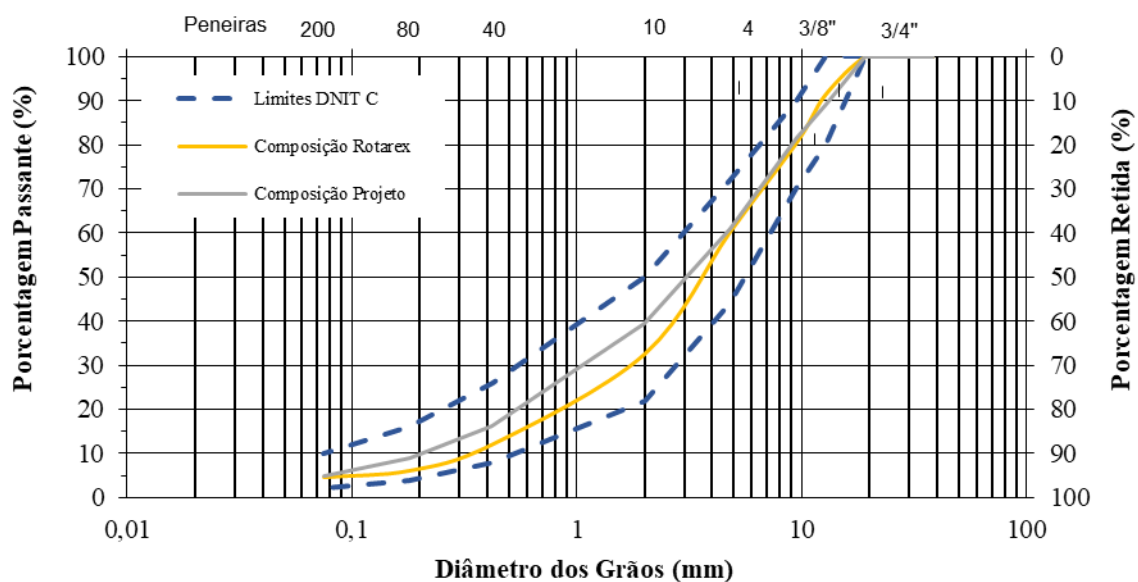
Fonte: Schuster (2018)

3.2.4.5 Mistura CA-SBS-U6

A curva granulométrica da mistura CA-SBS-U6, conforme Schuster (2018), está na Figura 3.23. A mistura se enquadra na Faixa C do DNIT e, na Tabela 3.27, estão as demais caracterizações dos agregados, realizadas por Faccin (2018).

Na Tabela 3.28, estão os parâmetros volumétricos da mistura CA-SBS-U6 obtidos por Faccin (2018).

Figura 3.23 - Curva granulométrica da mistura CA-SBS-U6



Fonte: Schuster (2018)

Tabela 3.27 - Características de CA-SBS-U6 relativas aos agregados

Abrasão (%)	11,8
Equivalente de areia (%)	62,5
Sanidade (%)	3,7
Absorção (%)	2,9

Fonte: Faccin (2018)

Tabela 3.28 - Parâmetros volumétricos da mistura CA-SBS-U6

Teor de ligante (%)	5,40
Volume de vazios (%)	4,50
VAM (%)	18,80
DMM (g/cm³)	2,354

Fonte: Faccin (2018)

Na Tabela 3.29, estão os valores dos coeficientes do modelo WLF e 2S2P1D, os coeficientes do modelo de Arrhenius, da curva C versus S e do critério de falha G^R , conforme Schuster (2018), para a mistura CA-SBS-U6.

Tabela 3.29 - Parâmetros dos modelos WLF, Arrhenius, 2S2P1D e do S-VECD para a mistura CA-SBS-U6

WLF		2S2P1D		S-VECD	
T ref. (°C)	21	E₀₀ (MPa)	85	C × S	
C1	20,68	E₀ (MPa)	26000	C10	1
C2	151,96	K	0,210	C11	2,60E-04
Arrhenius		h	0,52	C12	0,6343
T ref. (°C)	21	δ	2,50	G^R × N_f	
a1	2,10E-03	τ_E (s)	0,330	Gama	2,25E+07
a2	-2,80E-01	β	6000	Delta	-1,34
a3	4,95E+00				

Fonte: Schuster (2018)

Na Tabela 3.30, estão os coeficientes da série de Prony da mistura CA-SBS-U6 de acordo com Schuster (2018).

Tabela 3.30 - Coeficientes da série de Prony para a mistura CA-SBS-U6

Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)
6,25E-15	72500	8,41E-08	641000	8,30E-01	1590000
2,46E-14	46400	3,29E-07	781000	3,07E+00	1220000
9,68E-14	52500	1,28E-06	999000	1,14E+01	848000
3,81E-13	44700	4,98E-06	1200000	4,30E+01	536000
1,50E-12	84900	1,93E-05	1450000	1,65E+02	313000
5,89E-12	85100	7,45E-05	1670000	6,58E+02	172000
2,31E-11	139000	2,86E-04	1900000	2,74E+03	91400
9,10E-11	158000	1,10E-03	2050000	1,21E+04	47700
3,57E-10	235000	4,20E-03	2160000	5,48E+04	23000
1,40E-09	279000	1,59E-02	2170000	2,41E+05	9610
5,49E-09	391000	5,98E-02	2090000	9,77E+05	6630
2,15E-08	479000	2,24E-01	1890000		

Fonte: Schuster (2018)

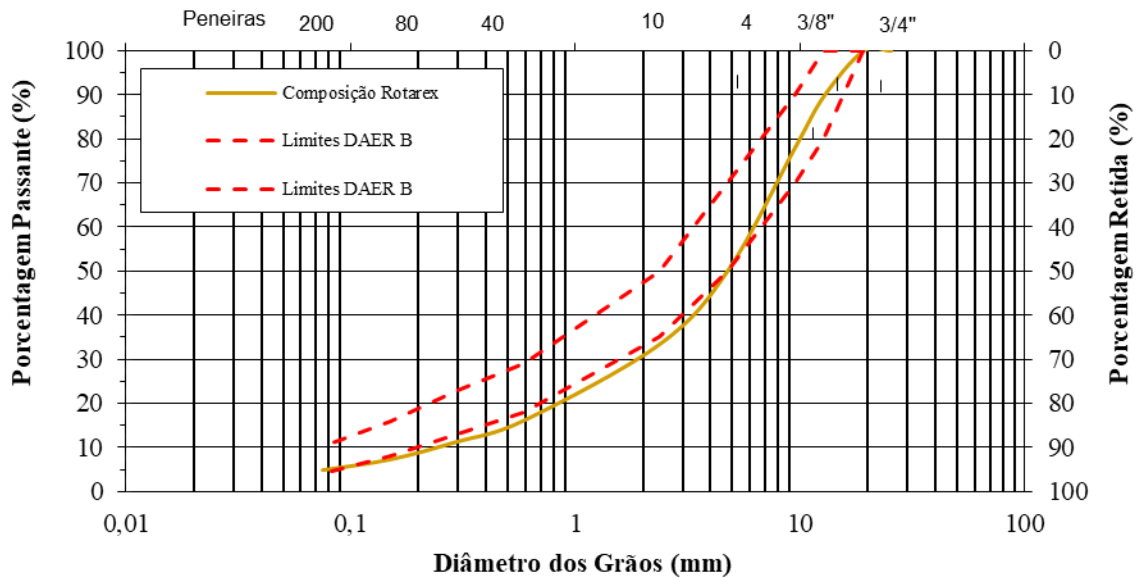
3.2.4.6 Mistura CA-BOR

A curva granulométrica da mistura CA-BOR, segundo Schuster (2018), está na Figura 3.24. A mistura se enquadra na Faixa B do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER/RS) e, na Tabela 3.31, estão as demais caracterizações dos agregados, realizadas por Faccin (2018).

Os parâmetros volumétricos da mistura CA-BOR obtidos por Faccin (2018) estão na Tabela 3.32

Na Tabela 3.33, estão os valores dos coeficientes do modelo WLF e Arrhenius, do modelo 2S2P1D, da curva C versus S e do critério de falha G^R , obtidos por Schuster (2018) para a mistura CA-BOR.

Figura 3.24 - Curva granulométrica da mistura CA-BOR



Fonte: Schuster (2018)

Tabela 3.31 - Características de CA-BOR relativas aos agregados

Abrasão (%)	14,5
Equivalente de areia (%)	60,7
Sanidade (%)	0,4
Absorção (%)	2,8

Fonte: Faccin (2018)

Tabela 3.32 – Parâmetros volumétricos da mistura CA-BOR

Teor de ligante (%)	6,76
Volume de vazios (%)	4,10
VAM (%)	18,60
DMM (g/cm³)	2,393

Fonte: Faccin (2018)

Tabela 3.33 - Parâmetros dos modelos WLF, Arrhenius, 2S2P1D e do S-VECD para a mistura CA-BOR

WLF		2S2P1D		S-VECD	
T ref. (°C)	21	E₀₀ (MPa)	30	C × S	
C1	19,52	E₀ (MPa)	24500	C10	1
C2	152,04	K	0,228	C11	4,68E-03
Arrhenius		h	0,58	C12	0,43244
T ref. (°C)	21	δ	2,90	G^R × N_f	
a1	1,30E-03	τ_E (s)	0,020	Gama	8,67E+06
a2	-1,93E-01	β	10000	Delta	-1,23
a3	3,49E+00				

Fonte: Schuster (2018)

Na Tabela 3.34, estão os coeficientes da série de Prony da mistura CA-BOR, conforme Schuster (2018).

Tabela 3.34 - Coeficientes da série de Prony para a mistura CA-BOR

Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)
5,47E-15	90100	1,52E-08	668000	3,15E-02	1410000
1,89E-14	51300	5,19E-08	808000	1,02E-01	1110000
6,52E-14	54200	1,77E-07	1020000	3,31E-01	793000
2,25E-13	52000	6,03E-07	1200000	1,08E+00	509000
7,75E-13	91700	2,05E-06	1430000	3,55E+00	298000
2,67E-12	96900	6,94E-06	1610000	1,20E+01	163000
9,20E-12	152000	2,34E-05	1790000	4,14E+01	86100
3,17E-11	174000	7,88E-05	1890000	1,49E+02	44800
1,09E-10	253000	2,64E-04	1950000	5,64E+02	23100
3,75E-10	302000	8,82E-04	1920000	2,25E+03	11500
1,29E-09	416000	2,90E-03	1830000	8,17E+03	7220
4,43E-09	506000	9,60E-03	1660000		

Fonte: Schuster (2018)

3.2.4.7 Mistura CA-RAP30

A granulometria do RAP com CAP 50/70 utilizado por Correa (2020) está na Tabela 3.35 e a curva granulométrica da mistura CA-RAP30, representada em azul-claro, está na Figura 3.25. Os resultados obtidos nos ensaios de agregados estão na Tabela 3.36.

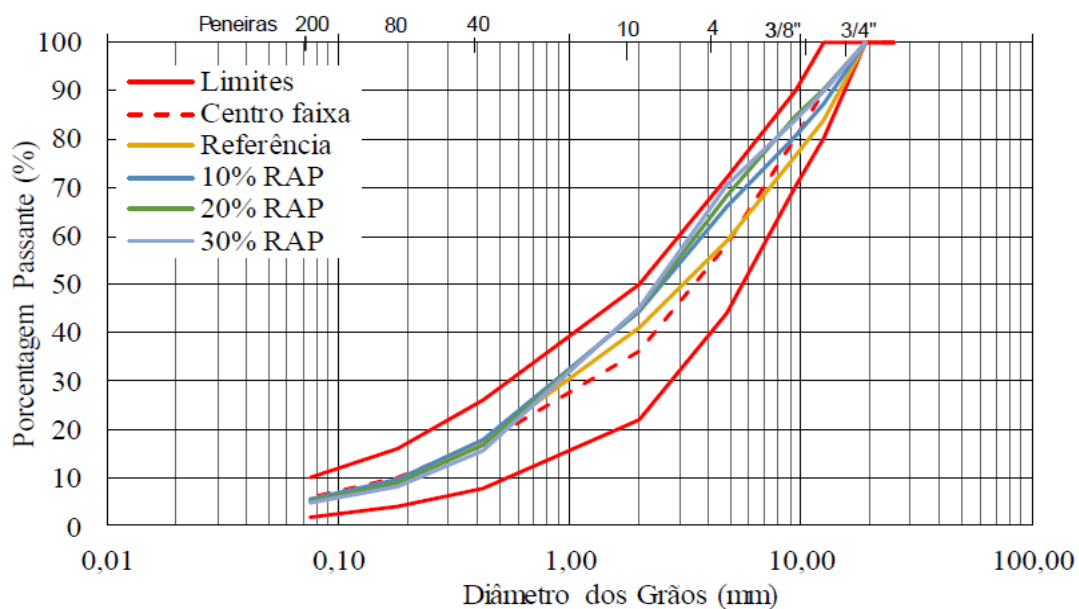
Os parâmetros volumétricos e de resistência da mistura CA-RAP30 e o módulo de resiliência a 25 °C, além dos parâmetros da curva de Wöhler obtidos por Correa (2020), estão na Tabela 3.37.

Tabela 3.35 - Granulometria do RAP 50/70 estudado por Correa (2020)

Peneira	mm	Porcentagem média passante (%)
1"	25,4	100
3/4"	19,1	100
1/2"	12,7	100
3/8"	9,5	73,7
nº 4	4,8	57,91
nº 10	2	30,15
nº 40	0,42	11,41
nº 80	0,18	3,54
nº 200	0,075	1,6

Fonte: Correa (2020)

Figura 3.25 - Curva granulométrica das misturas estudadas por Correa (2020)



Fonte: Correa (2020)

Tabela 3.36 - Características de CA-RAP30 relativas aos agregados

Abrasão (%)	19,81
Equivalente de areia (%)	62,47
Durabilidade (DNER ME 089/94) (%)	7,14
Absorção (%)	0,95

Fonte: Correa (2020)

Tabela 3.37 - Parâmetros volumétricos da mistura CA-RAP30

Teor de ligante novo (%)	4,50
Teor de ligante do RAP (%)	1,61
Volume de vazios (%)	4,00
DMM (g/cm³)	2,444

Fonte: Correa (2020)

Na Tabela 3.38, estão os valores dos coeficientes do modelo WLF e de Arrhenius, modelo 2S2P1D, dos coeficientes da curva C versus S e do critério de falha G^R , conforme Correa (2020), para a mistura CA-RAP30.

Tabela 3.38 - Parâmetros dos modelos WLF, Arrhenius, 2S2P1D e do S-VECD para a mistura CA-RAP30

WLF		2S2P1D		S-VECD	
T ref. (°C)	21	E₀₀ (MPa)	44	C × S	
C1	25,76	E₀ (MPa)	32400	C10	1
C2	190,73	K	0,177	C11	1,78E-04
Arrhenius		h	0,53	C12	0,6782
T ref. (°C)	21	δ	2,09	G^R × N_f	
a1	8,32E-04	τ_E (s)	0,047	Gama	6,33E+07
a2	-1,79E-01	β	10000	Delta	-1,47
a3	3,18E+00				

Fonte: Correa (2020)

Os coeficientes da série de Prony da mistura CA-RAP30 (Tabela 3.39) foram obtidos a partir da função sigmoideal (Tabela 3.40) obtida por Correa (2020) por meio do FlexPAVE™, o que justifica o diferente número de elementos em comparação com as misturas que foram estudo de Faccin (2018) e Schuster (2018).

Tabela 3.39 - Coeficientes a série de Prony para a mistura CA-RAP30

Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)	Ti (s)	Ei (kPa)
2,00E+16	66	2,00E+05	12945,00	2,00E-06	1349300
2,00E+15	439	2,00E+04	35000,00	2,00E-07	846740
2,00E+14	96	2,00E+03	77632,00	2,00E-08	454140
2,00E+13	74	2,00E+02	278760,00	2,00E-09	293080
2,00E+12	223	2,00E+01	817770,00	2,00E-10	153140
2,00E+11	71	2,00E+00	2243800,00	2,00E-11	93126
2,00E+10	707	2,00E-01	4093200,00	2,00E-12	51422
2,00E+09	899	2,00E-02	5016000,00	2,00E-13	29860
2,00E+08	1.743	2,00E-03	4507900,00	2,00E-14	17024
2,00E+07	3.250	2,00E-04	3353300,00	2,00E-15	9178
2,00E+06	6.679	2,00E-05	2226900,00	2,00E-16	6959

Fonte: Correa (2020)

Tabela 3.40 - Coeficientes da função sigmoidal para a mistura CA-RAP30

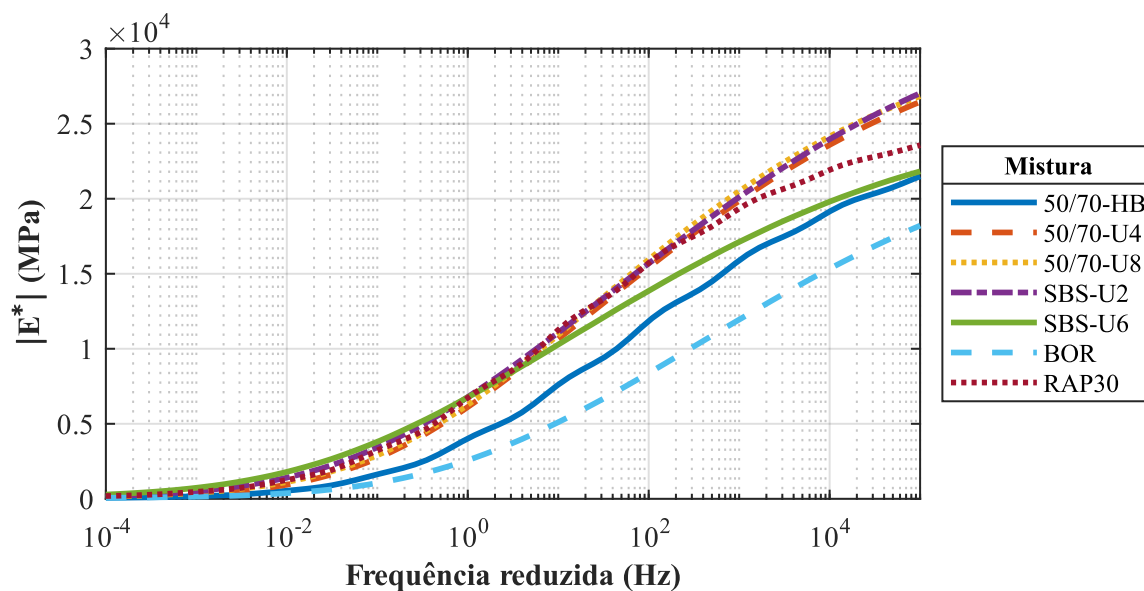
a	4,159
b	3,256
d	1,488
g	0,563

Fonte: Correa (2020)

3.2.4.8 *Resumo das misturas*

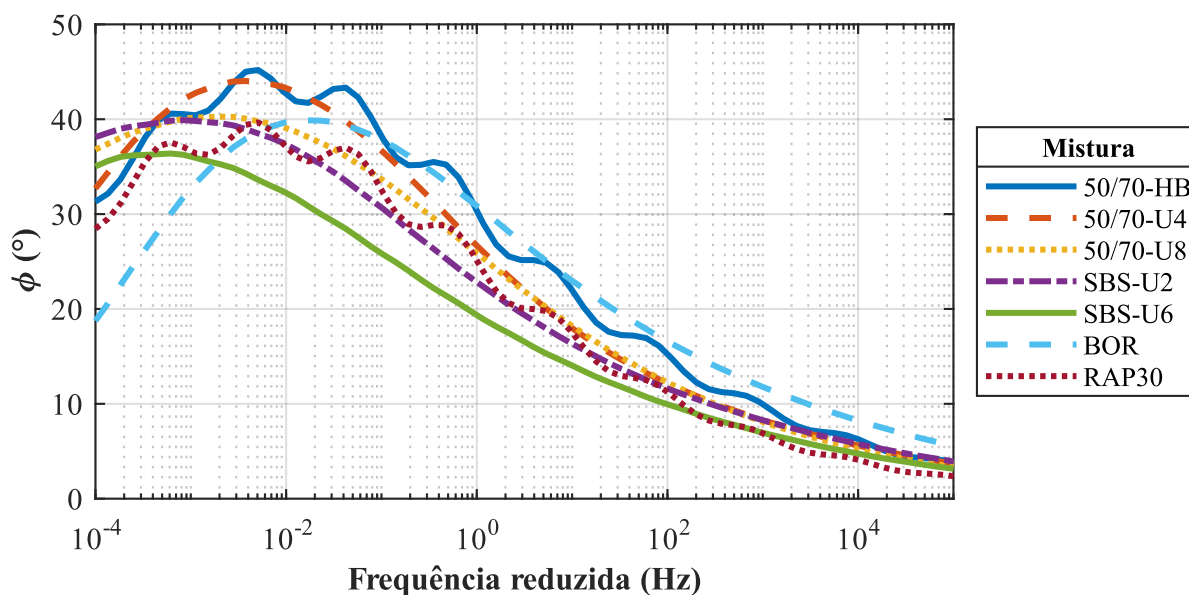
Na Figura 3.26 e na Figura 3.27, estão as curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase, respectivamente, de todas as misturas abordadas nessa pesquisa. Comenta-se que as misturas CA-50/70-HB e CA-RAP30 apresentaram gráficos de módulo dinâmico e de ângulo de fase com ondulações devido às diferenças quanto ao número de elementos da série de Prony, no caso da mistura CA-50/70-HB, e à modelagem feita pelo próprio FlexPAVE™, no caso da mistura CA-RAP30, conforme exposto na seção 3.2.4. Além disso, vale destacar que os limites das abscissas da Figura 3.28 e Figura 3.29 foram determinados, respectivamente, a partir dos resultados de pseudorrigidez e de dano fornecidos pelo FlexPAVE™ para as simulações.

Figura 3.26 – Curvas mestras de módulo dinâmico



Fonte: Autor

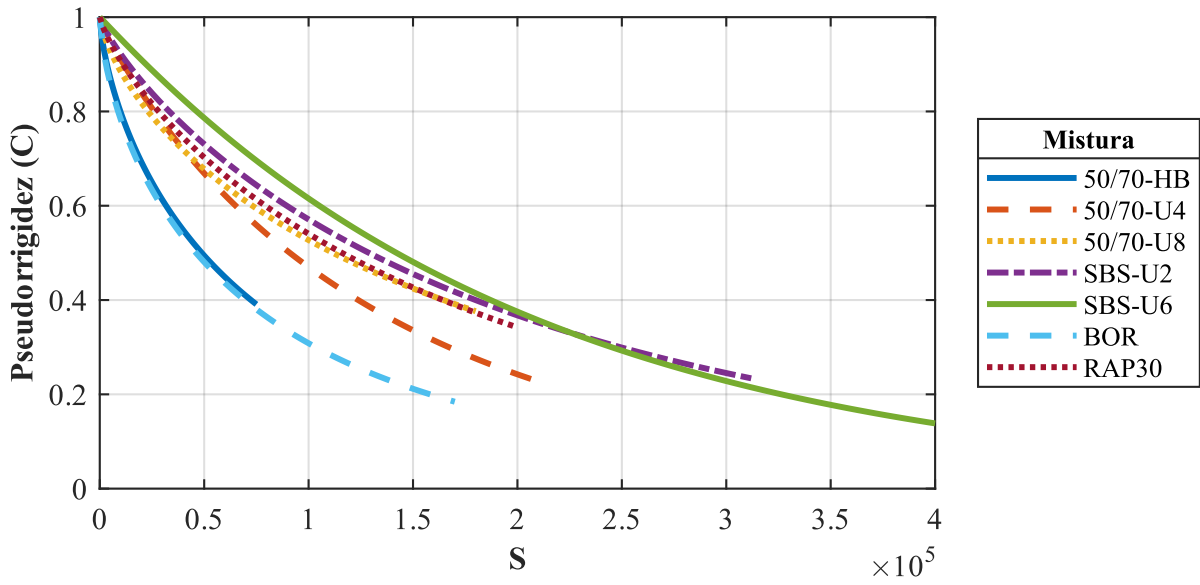
Figura 3.27 – Curvas mestras de ângulo de fase



Fonte: Autor

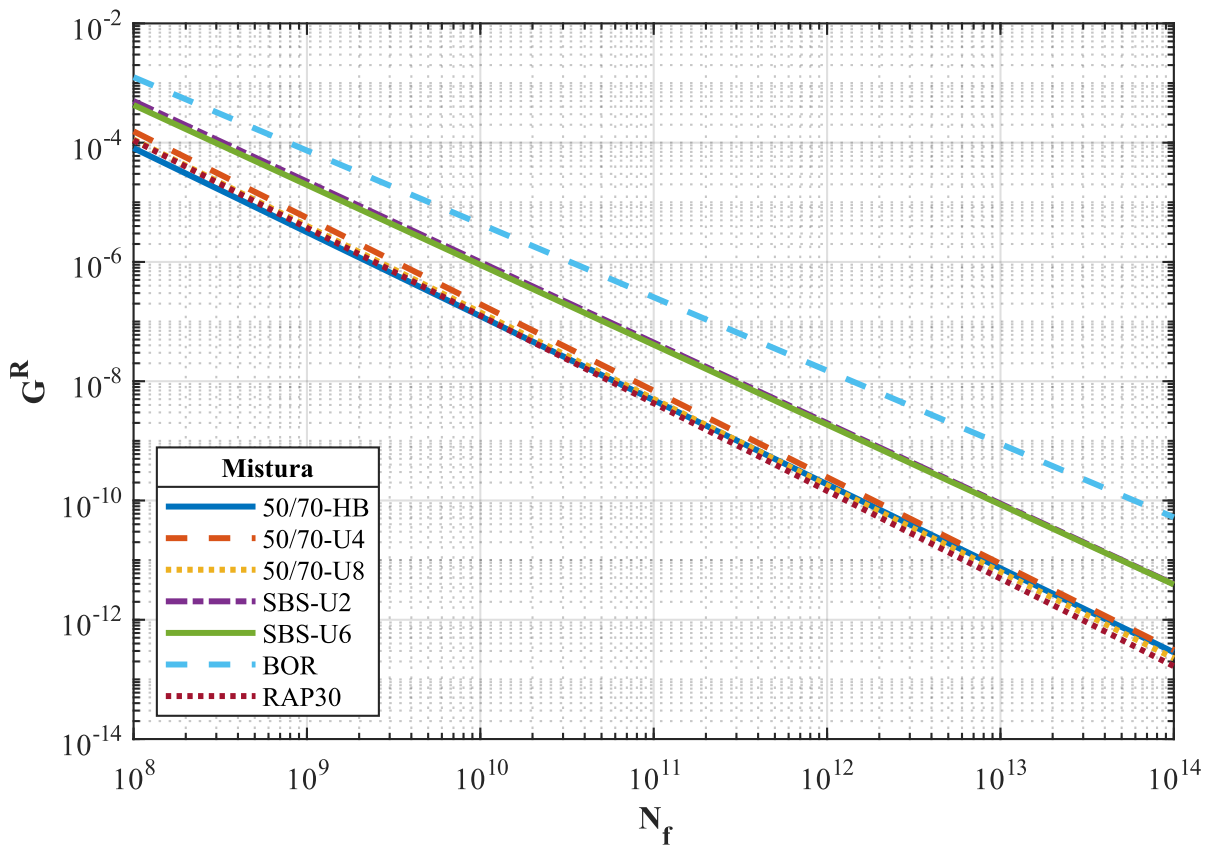
Na Figura 3.28 e na Figura 3.29 estão, respectivamente, os gráficos da curva característica e da envoltória de ruptura das misturas estudadas.

Figura 3.28 – Curvas características de dano C x S



Fonte: Autor

Figura 3.29 – Envoltórias de ruptura G^R x N_f



Fonte: Autor

3.3 TRÁFEGO

O GEPPASV realiza semestralmente contagens de tráfego nos trechos monitorados em Santa Maria/RS. A contagem do tráfego (Tabela 3.41), assim como a distribuição do tráfego ao longo do dia (Tabela 3.42 e Figura 3.30) para o trecho HB são resultado dos trabalhos de Santos (2015), Bueno (2016), Bueno (2019) e Bordin (2020).

Tabela 3.41 - Contagem do tráfego do trecho HB no 2º semestre de 2019

Tempo (anos)	N anual	N acum.
1	1,10E+06	1,10E+06
2	1,31E+06	2,42E+06
3	1,76E+06	4,17E+06
4	1,58E+06	5,75E+06
5	1,26E+06	7,00E+06
6	1,31E+06	8,32E+06
7	1,48E+06	9,80E+06

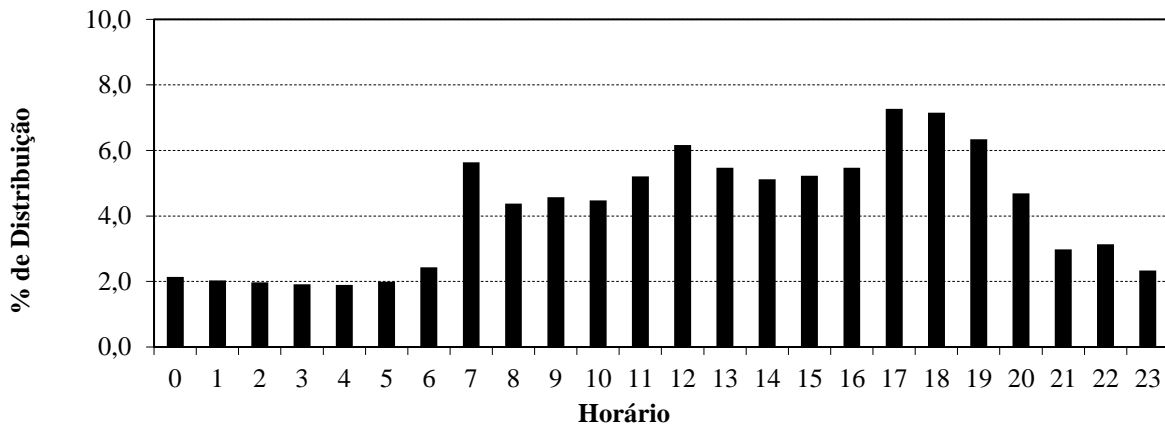
Fonte: Adaptado de Bueno (2019)

Tabela 3.42 - Distribuição do tráfego de veículos comerciais ao longo do dia para o trecho HB a partir da contagem do tráfego do 2º semestre do 2019

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

Fonte: Adaptado de Bueno (2019)

Figura 3.30 - Gráfico da distribuição do tráfego ao longo do dia para o trecho HB referente ao 2º semestre de 2019



Fonte: Bueno (2019)

3.4 EMPREGO DO FLEXPAVE™

Nessa seção, serão apresentados os dados de entrada para as simulações do FlexPAVE™ (cedido pela NCSU) relativos a informações gerais, à estrutura do pavimento, à caracterização dos materiais, à temperatura, ao tráfego e às análises. Além disso, serão apresentados os conjuntos de simulações realizados nesta pesquisa utilizando o programa.

3.4.1 Informações gerais

Na aba *General Information*, foram inseridas as mesmas informações para todas as simulações, conforme indicado na Tabela 3.43.

Tabela 3.43 - Dados de entrada da aba *General Information*

Tipo de pavimento	Pavimento novo
Opções de análise	Análise de performance do pavimento
Opções de fadiga	Somente trincamento por fadiga
Vida de projeto (anos)	15

Fonte: Autor

Conforme mostra a Tabela 3.43, foi selecionada a opção de análise de performance, ou seja, além de determinar os esforços no pavimento (análise de respostas mecânicas), o programa calculará a danificação. As datas de construção e abertura foram mantidas conforme o padrão do programa, visto que não alterarão os resultados. Além disso, optou-se por iniciar todas as simulações na mesma estação do ano para padronizar as variações de temperatura ao longo do tempo.

Quanto à vida de projeto, foram escolhidos 15 anos para todas as simulações. Esse período foi adotado com o objetivo de que, na fase de aplicação da função de transferência, haja uma maior precisão nos resultados de AT. Como explicado na seção 2.7, o parâmetro $T_{0,35}$, que corresponde ao tempo (em meses) em que é atingido um dano de 0,35, é utilizado na função de transferência de Nascimento (2015) para a previsão de AT. Aumentando o número de meses de simulação de 120 (que é o valor usual) para 180, a interpolação utilizada para obter $T_{0,35}$ tende a ser mais precisa.

Visto que o objetivo principal das simulações é avaliar o efeito da temperatura na fadiga, não foi selecionada a opção *Thermal Stress* (tensões oriundas da retração térmica). Além disso, foram feitas simulações de teste e verificou-se que, ao considerar-se essas tensões, a vida à fadiga não apresentou variações relativas maiores do que 6% em módulo.

Contudo, é importante ressaltar a importância dessa análise no desempenho de pavimentos especialmente em regiões com grande variação térmica, como é o caso da região central do Rio Grande do Sul.

3.4.2 Camadas de suporte

Na aba *Design Structure*, foi inserido o valor de 3,65 m para a largura do pavimento. Os dados de entrada para as camadas de subleito, sub-base e base são referentes ao trecho HB e foram os mesmos em todas as simulações, conforme já abordado na seção 3.2.

Os valores de todos os módulos foram obtidos em Bueno (2019) via retroanálise realizada pelo *software* BAKFAA considerando camadas perfeitamente aderidas entre si. Os coeficientes de Poisson para as camadas de subleito, sub-base e base foram todos adotados, conforme recomendações de Balbo (2007) e Bernucci *et al.* (2008).

Serão apresentados nessa seção os dados referentes a essas camadas na aba *Design Structure* do FlexPAVE™.

3.4.2.1 Subleito

Na Tabela 3.44, estão os dados de entrada referentes à camada de subleito no FlexPAVE™. A espessura para o subleito foi escolhida com o valor indicado por não haver a opção de considerar uma espessura infinita.

Tabela 3.44 - Dados de entrada do subleito no FlexPAVE™

Espessura (cm)	380
Tipo de material	Subleito
Modelo	Linear elástico
Módulo elástico (MPa)	160
Coefficiente de Poisson	0,45

Fonte: Autor

3.4.2.2 Sub-base

Os dados de entrada relativos à sub-base do trecho HB estão na Tabela 3.45.

Tabela 3.45 - Dados de entrada referentes da sub-base no FlexPAVE™

Espessura (cm)	40
Tipo de material	Base granular
Modelo	Linear elástico
Módulo elástico (MPa)	189
Coefficiente de Poisson	0,40

Fonte: Autor

3.4.2.3 Base

Para a camada de base, foram inseridos os dados de entrada mostrados na Tabela 3.46.

Tabela 3.46 - Dados de entrada da base no FlexPAVE™

Espessura (cm)	20
Tipo de material	Base granular
Modelo	Linear elástico
Módulo elástico (MPa)	569
Coefficiente de Poisson	0,35

Fonte: Autor

3.4.3 Revestimento

Ainda na aba *Design Structure* do FlexPAVE™, foram inseridos os dados de entrada de cada uma das misturas asfálticas abordadas na seção 3.2.4. As características comuns a todas as misturas inseridas no programa estão na Tabela 3.47.

Tabela 3.47 - Dados de entrada do revestimento no FlexPAVE™

Tipo de material	Concreto asfáltico
Modelo	Viscoelástico com dano
Tipo de módulo dinâmico	Série de Prony

Fonte: Autor

O modelo adotado (viscoelástico com dano) é o VECD, que utiliza tanto a teoria da viscoelasticidade quanto a danificação por fadiga e as informações referentes ao ensaio de módulo complexo foram inseridas por meio das séries de Prony já mostradas na seção 3.2.4.

O coeficiente de Poisson para todas as misturas foi adotado com o valor de 0,3 e considerou-se a pseudorrigidez inicial como sendo 0,8 em todas as simulações.

Os parâmetros de modelagem da curva mestra e do modelo S-VECD podem ser consultados em Bueno (2019) para a mistura CA-50/70-HB, em Correa (2020) para a mistura CA-RAP30 e em Schuster (2018) para as outras 5 misturas. Na Tabela 3.48 e na Tabela 3.49, estão os dados de entrada específicos de cada mistura

Tabela 3.48 - Dados de entrada das misturas asfálticas no FlexPAVE™ relativos à modelagem da curva mestra

Mistura	Einf (MPa)	Temp. ref. (°C)	Arrhenius		
			a1	a2	a3
CA-50/70-HB	15,4	20	6,01E-04	-0,16	3,00
CA-50/70-U4	50,0	21	3,00E-04	-0,15	2,99
CA-50/70-U8	60,0	21	1,40E-03	-0,23	4,20
CA-SBS-U2	150,0	21	8,00E-04	-0,17	3,17
CA-SBS-U6	85,0	21	2,10E-03	-0,28	4,95
CA-BOR	30,0	21	1,30E-03	-0,19	3,49
CA-RAP30	14,0	21	8,32E-04	-0,18	3,17

Fonte: Autor

Tabela 3.49 - Dados de entrada das misturas asfálticas no FlexPAVE™ relativos à curva característica e à envoltória de ruptura

Mistura	Alfa	C x S		G ^R x N _f	
		a	b	Gama	Delta
CA-50/70-HB	3,01	3,28E-04	0,71	1,52E+07	-1,41
CA-50/70-U4	2,96	2,17E-05	0,91	6,16E+06	-1,45
CA-50/70-U8	3,15	1,62E-04	0,72	4,51E+07	-1,45
CA-SBS-U2	3,52	3,70E-05	0,84	3,15E+07	-1,35
CA-SBS-U6	3,60	4,18E-06	1,01	2,25E+07	-1,34
CA-BOR	3,12	4,50E-04	0,68	8,67E+06	-1,23
CA-RAP30	3,21	6,05E-05	0,80	6,33E+07	-1,47

Fonte: Autor

3.4.4 Clima

Na aba *Climate Data* do FlexPAVE™, foi selecionada a opção *EICM Text File* para as hipóteses de temperatura ISD, SAN, CHE e PHO. No caso das hipóteses SHELL e DNIT, foi escolhida a opção *Isothermal*.

No primeiro caso, é inserido um arquivo de texto no formato do EICM, ou seja, com as temperaturas do pavimento a cada hora durante o período de um ano e a diferentes profundidades.

No segundo caso, seleciona-se uma temperatura constante que será adotada para todos os pontos da seção transversal do pavimento e durante toda a sua vida útil.

Os dados completos de temperatura utilizados na hipótese ISD podem ser conferidos no Apêndice A.

3.4.5 Tráfego

Na aba *Traffic Data* do FlexPAVE™, foram inseridas as informações da Tabela 3.50.

Tabela 3.50 - Dados de entrada da mistura CA-BOR no FlexPAVE™

Tipo de eixo	Semieixo
Tipo de roda	Dupla
Carga do semieixo (kN)	40
Vel. de projeto (m/s)	16,67
Pressão de inflação (kPa)	550
Forma da área de contato	Retangular
Razão compr./larg.	1,5714
Espaçamento das rodas (cm)	30,47

Fonte: Autor

Vale ressaltar que foi adotado um semieixo de rodas duplas com carga de 40 kN, que é a metade do eixo padrão rodoviário de 80 kN, e pressão de inflação dos pneumáticos de 550 kPa. A velocidade de 16,67 m/s (igual a 60 km/h) corresponde a uma minoração do limite de velocidade de 80 km/h, adotado em grande parte das rodovias do estado do Rio Grande do Sul, em função dos veículos comerciais geralmente trafegarem nessa faixa de velocidades.

Destaca-se que a pressão de inflação dos pneus adotada por Nascimento (2015) na elaboração da função de transferência foi de 800 kPa. O valor adotado nesta pesquisa de 550 kPa se justifica por ser o padrão usado na determinação do número N de solicitações do eixo padrão com os fatores de equivalência da USACE.

A distribuição do tráfego ao longo do ano foi adotada como sendo uniforme. A distribuição diária escolhida foi a mesma apresentada na Tabela 3.42, conforme a contagem de tráfego realizada pelo GEPPASV no 2º semestre de 2019.

3.4.6 Opções de resultados e análises

Na aba do FlexPAVE™ chamada *Outputs and Analysis Options*, foram escolhidas as configurações apresentadas na Tabela 3.51.

Tabela 3.51 - Opções de análise e resultados das simulações no FlexPAVE™

Erro relativo	0,01
Erro absoluto	1,00E-06
Nº máx. de iterações	50
Tipo de fissuração	Estático
Direção de fissuração	Automático
Tipo de malha	Médio
Nº de elementos finitos	10 p/camada
Nº de intervalos de tempo	100
Nº de divisões horizontais	100

Fonte: Autor

Conforme a Tabela 3.51, foi adotada uma malha para cada camada do pavimento com 10 divisões ao longo do eixo Z (ao longo da profundidade) e 100 divisões ao longo do eixo X (sentido transversal ao tráfego), o que corresponde a uma matriz de *outputs* (tensões e dano) de 11 colunas e 101 linhas. As configurações atinentes aos erros inerentes às análises e ao tipo de fissuração foram mantidas conforme o padrão do *software*.

3.4.7 Simulações

As simulações de desempenho foram realizadas com o objetivo de verificar o impacto que diferentes condições de temperatura têm sobre a fadiga do revestimento asfáltico utilizando o modelo VECD.

Para isso, foi escolhido o pavimento do trecho monitorado da Av. Hélivio Basso como estrutura padrão nas simulações. Foram mantidas as propriedades das camadas de subleito, sub-base e base, variando apenas a espessura e o material da camada de revestimento.

Conforme o que foi apresentado na seção 3.3, o número anual de solicitações do eixo padrão no trecho HB é de $1,48 \times 10^6$. Ao longo de 15 anos (a explicação para a adoção desse período de análise está na seção 3.4.1) e sem considerar o crescimento do tráfego, o número N, considerando o tráfego original da via, seria igual a $2,22 \times 10^7$.

Conforme a Tabela 3.6, que mostra a evolução da AT medida em campo ao longo do tempo, o trecho não apresentou valores maiores que 4% para nenhuma das faixas ao longo de 68 meses desde a abertura do tráfego.

Neste estudo, será considerado o critério de 30% de AT para prever a ruptura do pavimento a partir da fissuração por fadiga. Tal critério foi adotado por ser também utilizado no MeDiNa para o dimensionamento e análise de pavimentos, conforme Franco e Motta (2018).

Para que esse limite de 30% fosse atingido nas simulações, foi majorado o tráfego do trecho HB. Dessa forma, foi adotado um N ao longo de 180 meses (15 anos) igual a 5×10^8 solicitações, que é observado em rodovias de tráfego muito intenso (CERATTI *et al.*, 2015). Destaca-se que esse tráfego não foi adotado como sendo um valor de projeto, mas sim um dado de entrada necessário para a obtenção da vida à fadiga do pavimento em cada simulação.

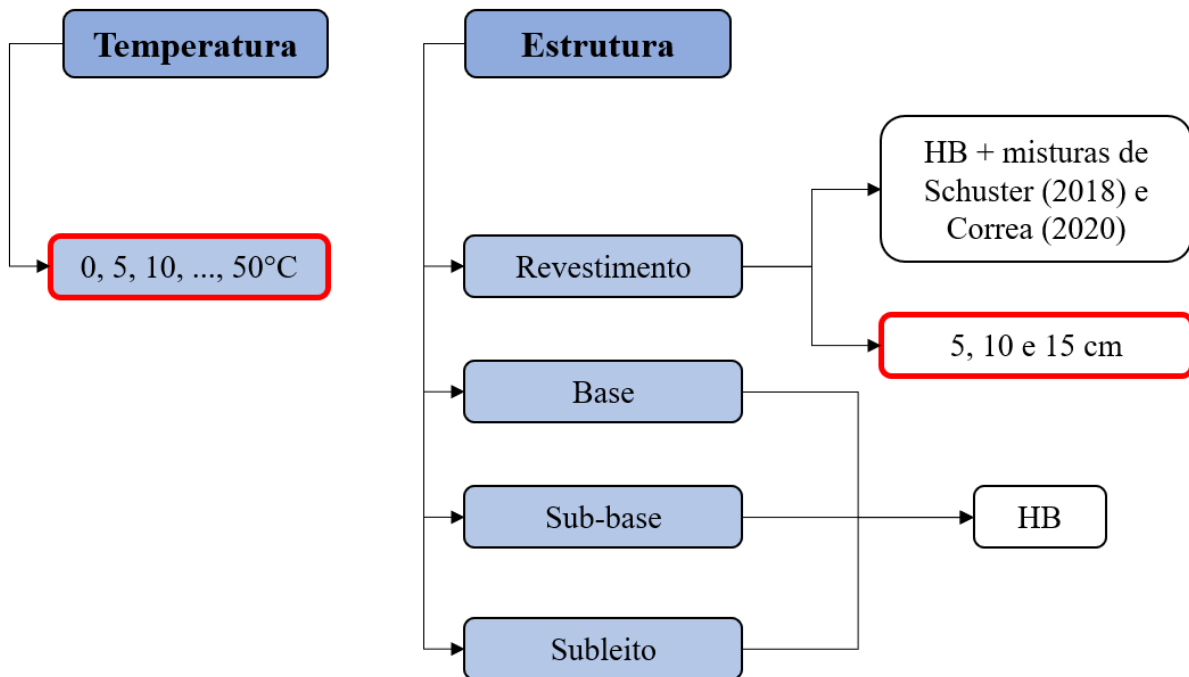
Também é necessário pontuar que o tráfego majorado considerado nas simulações não está no *range* dos trechos monitorados utilizados na calibração e validação da função de transferência de Nascimento (2015). Mesmo com tais limitações, que são inerentes a funções de caráter empírico, a adoção deste tráfego se justifica para que as misturas com adição de SBS atingissem 30% de AT, conforme será apresentado.

O cálculo do dano foi feito com base na média dos 110 pontos utilizados por Nascimento (2015) na elaboração da função de transferência (conforme será mostrado na seção 3.5). Tal abordagem foi utilizada também por Mocelin (2018) e Schuster (2018).

Como forma de avaliar preliminarmente a influência da temperatura sobre o dano por fadiga em cada mistura, foram realizadas simulações com temperaturas constantes de 0 a 50 °C (com incrementos de 5 °C) e com a espessura da camada de revestimento igual a 5, 10 e 15 cm. Foi escolhida tal faixa de temperaturas porque ela contém, conforme mostra o polígono de frequências relativas acumuladas da Figura 3.9, mais de 95% das temperaturas simuladas. Esse

conjunto de simulações foi denominado como simulações com temperatura constante (TC), cujos dados de entrada estão resumidos na Figura 3.31.

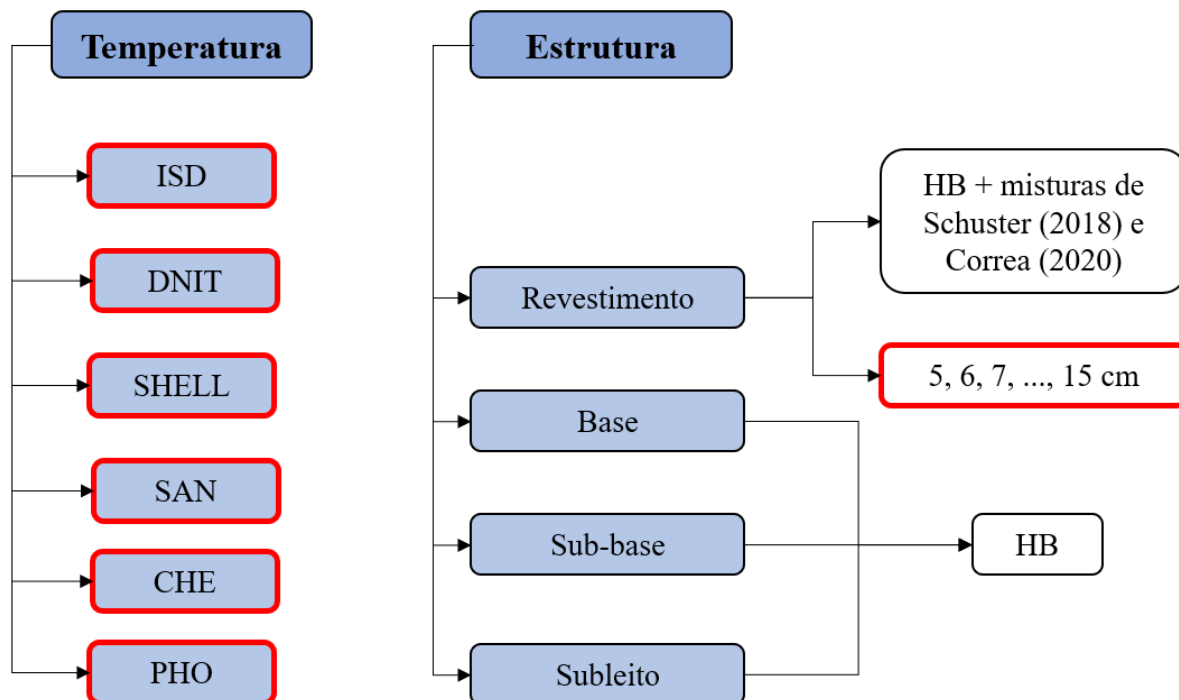
Figura 3.31 - Dados de entrada das simulações TC no FlexPAVE™



Fonte: Autor

Posteriormente, com o objetivo de fornecer os dados para a aplicação da função de transferência, foram realizadas simulações considerando as 6 hipóteses de temperatura descritas na seção 3.1. (simulações HT) e espessura de revestimento de 5 a 15 cm (com incrementos de 1 cm para a realização posterior do dimensionamento). O resumo dos dados das simulações HT está na Figura 3.32. Destaca-se que 2 das hipóteses consideram temperatura constante (DNIT e SHELL) e as outras 4 são baseadas em dados modelados pelo EICM (e, no caso da hipótese ISD, também em dados medidos em campo) e, portanto, apresentam variações de temperatura ao longo da profundidade e do tempo.

Figura 3.32 - Dados de entrada das simulações HT no FlexPAVE™

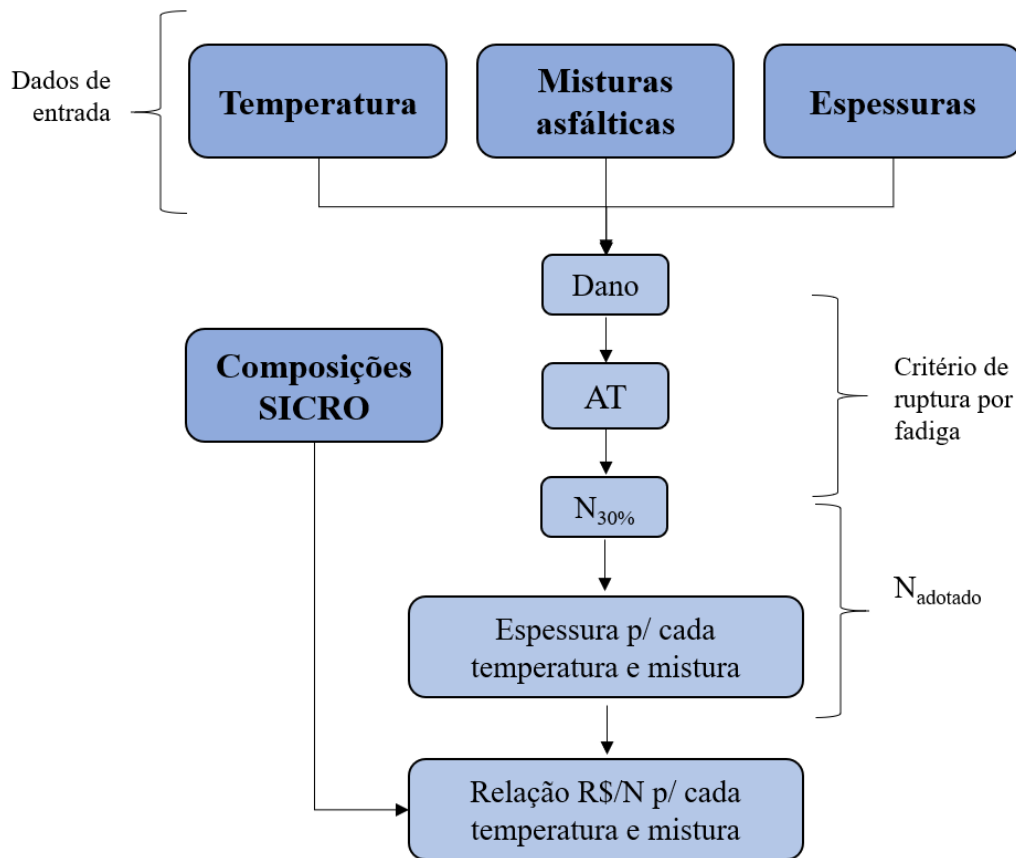


Fonte: Autor

A partir dessas simulações, foi aplicada a função de transferência de Nascimento (2015) para a obtenção da AT e da vida à fadiga, que é o tráfego correspondente ao tempo em que a AT atinge 30% ($N_{30\%}$). Adotando-se, para fins de dimensionamento, um N igual a 1×10^8 (observado como razoável para que se atingisse a ruptura nas condições consideradas nessa pesquisa), foi determinada a espessura mínima da camada de revestimento necessária para cada combinação de hipótese de temperatura e mistura asfáltica. Com base na estrutura obtida, foi realizada a subsequente análise econômica. O resumo do processo de dimensionamento aqui abordado está na Figura 3.33.

Tanto para as simulações TC como para as simulações HT, o foco da análise dos resultados será compreender a influência da temperatura sobre o dano por fadiga. Além disso, serão feitas observações quanto à influência dos diferentes materiais e diferentes espessuras de revestimento sobre o dano, o que terá impacto sobre as etapas subsequentes.

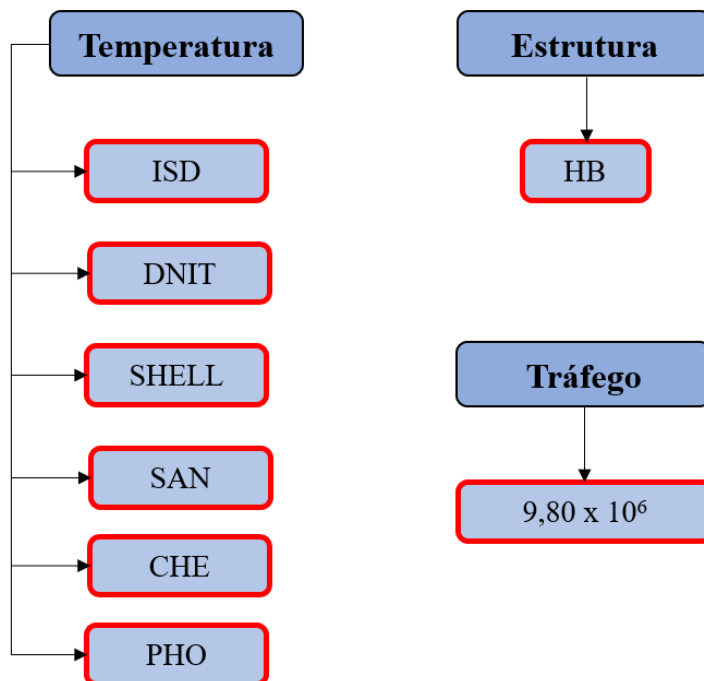
Figura 3.33 – Resumo do processo de dimensionamento utilizado nesta pesquisa a partir do FlexPAVE™



Fonte: Autor

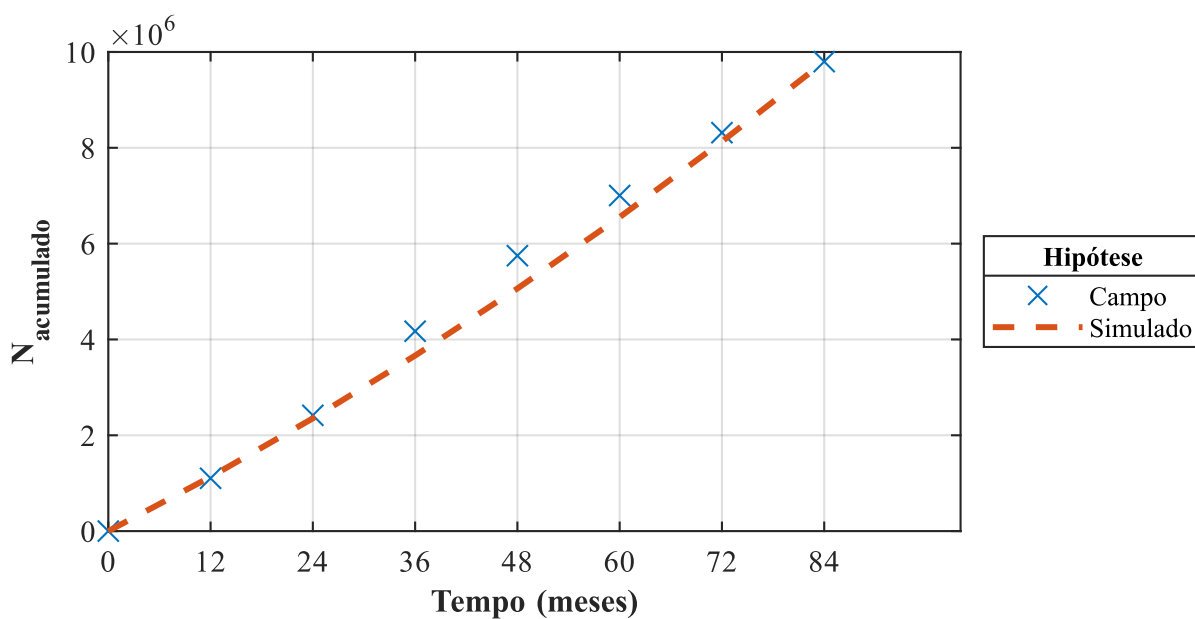
Por fim, foram realizadas simulações a condições de campo (CC) com o objetivo de verificar qual das hipóteses de temperatura propostas prevê com maior acurácia a AT do trecho HB. Conforme mostra a Figura 3.34, adotou-se a estrutura e o tráfego original do trecho. A partir dos números N anuais obtidos por intermédio das contagens de tráfego (Tabela 3.41) foi escolhido número diário de 3020 solicitações do eixo padrão com crescimento de 8% por ano. A comparação do tráfego obtido nas contagens e a aproximação utilizada nas simulações está na Figura 3.35

Figura 3.34 – Dados de entrada das simulações CC no FlexPAVE™



Fonte: Autor

Figura 3.35 – Comparação entre o número N acumulado medido em campo e o adotado nas simulações



Fonte: Autor

3.5 APLICAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

A função de transferência proposta por Nascimento (2015) foi aplicada por meio de planilha eletrônica para cálculo do parâmetro $T_{0,35}$ a partir dos resultados de dano por fadiga obtidos para cada período de análise (nesse caso, a cada mês).

Com os dados do dano médio obtido no FlexPAVE™ para combinação de hipótese de temperatura com condições do revestimento (espessura e material), foram calculados os fatores de deslocamento para cada simulação, o dano reduzido e, finalmente, a AT a cada período de análise (nesse caso, a cada mês).

No caso das simulações TC e HT, foi utilizada a Equação (2.49) considerado 95% de confiabilidade (resultando 1,65 para o parâmetro Z da curva normal), que é o mesmo nível adotado no MeDiNa para vias do tipo Sistema Arterial Primário. Sendo assim, todos os resultados de AT apresentados nessa pesquisa levam em consideração uma confiabilidade de 95%.

Para as simulações CC, não foi feita a correção da AT com a Equação (2.49), tendo em vista que o objetivo de tais simulações não é prever a evolução de AT a partir de um nível aceitável de confiabilidade, mas sim fazer comparações com o que já foi medido em campo. Ou seja, para tais casos, considerou-se a AT com 50% de confiabilidade.

3.6 EMPREGO DO MEDINA

Para fins de comparação de desempenho à fadiga da mistura CA-50/70-HB com o FlexPAVE™, foram feitas simulações com a utilização do MeDiNa.

Para a camada de revestimento do trecho HB, foi utilizada a curva de fadiga de Rossato (2015) adaptada para o MeDiNa, conforme mostra a Equação (3.4), que apresentou R^2 de 0,849.

$$N_f = 4,00 \times 10^{-5} \varepsilon_t^{-1,999} \quad (3.4)$$

Em que:

N_f = número de ciclos de carga até a falha;

ε_t = deformação de tração;

Foi simulada somente a mistura CA-50/70-HB no MeDiNa por não haver dados disponíveis da curva de fadiga das demais misturas a partir do ensaio de fadiga à compressão diametral.

Para as demais camadas, foram criados materiais no programa, cujas informações estão resumidas na Tabela 3.52. Vale destacar que os valores de módulo de resiliência diferem daqueles utilizados no FlexPAVE™ porque, como foi comentado na seção 2.6, o MeDiNa considera as camadas como não aderidas. Devido a isso, foram utilizados os resultados da retroanálise considerando camadas não aderidas apresentada por Bueno (2019) para a faixa 2 do trecho HB.

Destaca-se também que os valores do coeficiente de Poisson foram assumidos e que os valores de massa específica aparente seca foram aqueles apresentados por Santos (2015) para a massa específica aparente máxima. No caso da camada de sub-base, cujo material não foi submetido a tal caracterização, foi adotado o mesmo valor da camada de base, o que não altera os resultados de desempenho à fadiga do pavimento.

Tabela 3.52 - Dados de entrada do MeDiNa referentes aos materiais

Camada	Esp. (cm)	MR (MPa)	Coef. Poisson	Massa esp. (g/cm³)
Revestimento	Variável	4901	0,30	2,100
Base	20,00	573	0,35	2,294
Sub-base	40,00	447	0,40	2,294
Subleito	0,00	181	0,45	1,894

Fonte: Bueno (2019) e Santos (2015)

Também se comenta que a deformação permanente não foi levada em conta nas simulações do MeDiNa, de modo que a previsão de ruptura em cada caso se desse exclusivamente devido à AT atingir o limite de 30%.

Nas simulações do MeDiNa, foram adotadas duas condições de tráfego. A primeira é a mesma utilizada nas simulações HT do FlexPAVE™ (Tabela 3.53), com o tráfego majorado, e a segunda é a mesma utilizada nas simulações CC (Tabela 3.54).

Ressalta-se que, na condição real do tráfego, foi considerada uma taxa de crescimento anual no MeDiNa ligeiramente diferente daquela usada no FlexPAVE™ porque o ano é composto de 12 meses de 30 dias (360 ao todo) neste último programa e de 365 dias naquele.

Também se comenta que foi adotado o tipo de via como “Sistema Local” porque é a opção do *software* que apresenta a menor confiabilidade (65%) e, portanto, se afasta menos dos resultados sem as correções estatísticas (confiabilidade de 50%), o que possibilita uma melhor comparação com o que é observado em campo.

Tabela 3.53 - Dados de entrada do MeDiNa referentes ao tráfego majorado do trecho HB

Tipo de via	Sistema Arterial Primário
VMD (1º ano)	91333
FV	1,000
N anual (1º ano)	3,33E+07
% Veículos na faixa de projeto	100
N anual da faixa	3,33E+07
Taxa de crescimento (%)	0,0
Período de projeto (anos)	15
N Total	5,00E+08

Fonte: Autor

Tabela 3.54 - Dados de entrada do MeDiNa referentes ao tráfego real do trecho HB

Tipo de via	Sistema Local
VMD (1º ano)	3020
FV	1,000
N anual (1º ano)	1,10E+06
% Veículos na faixa de projeto	100
N anual da faixa	1,10E+06
Taxa de crescimento (%)	8,1
Período de projeto (anos)	7
N Total	9,87E+06

Fonte: Autor

3.7 ANÁLISE ECONÔMICA

A partir dos números N obtidos pelos dois *softwares* (FlexPAVE™ e MeDiNa), foram orçadas as estruturas de pavimento com as diferentes espessuras de concreto asfáltico obtidas e diferentes misturas asfálticas estudadas nessa pesquisa.

Na Tabela 3.55 e na Tabela 3.56, estão, respectivamente, os dados geométricos adotados para a via e os quantitativos adotados para a sinalização. Também se salienta que foram adotadas as mesmas espessuras de camadas tanto para a faixa de tráfego quanto para o

acostamento e que foi adotada a extensão de 1 km de via para se obter os custos por unidade de comprimento.

A espessura do revestimento, conforme já comentado acerca das simulações do FlexPAVE™, foi considerada dentro do intervalo de 5 a 15 cm e o número de pinturas de ligação foi determinado em função da espessura, sendo realizada uma pintura a cada 5 cm de espessura. Destaca-se que os quantitativos relativos à terraplenagem e à sinalização foram baseados no trabalho de Silva (2019).

Tabela 3.55 – Dados geométricos adotados para o levantamento de custos

Largura da via (m)	7,2
Espessura do revestimento	Variável
Espessura da base (cm)	20,0
Espessura da sub-base (cm)	40,0
Largura dos acostamentos (m)	5,0

Fonte: Autor

Tabela 3.56 – Quantitativos relativos à sinalização adotados para o levantamento de custos

Total de tinta acrílica à base de água (m ² /km)	438,0903
Placas de regulamentação por km	6
Placas de advertência por km	4
Tachas por quilômetro (3 a cada 16 m)	188

Fonte: Silva (2019)

Na Tabela 3.57 e na Tabela 3.58, estão as DMTs juntamente com o tipo de via adotados para os diferentes materiais na etapa de pavimentação e de sinalização, respectivamente. As distâncias médias de transporte (DMT) relativas à pavimentação foram as mesmas adotadas por Silva (2019), com exceção das distâncias relativas ao material fresado e ao agente rejuvenecedor, que foram as aquelas consideradas por Luzzi (2019).

Tabela 3.57 - DMTs adotadas para as composições relativas à pavimentação

Materiais em transporte	DMT (km)	Tipo Via
Jazida de solo - Trecho de disposição do solo	0,93	Revestimento Primário
Jazida de brita - Trecho de disposição da brita/MS	1,09	Revestimento Primário
Jazida de areia - Usinagem CA	0,76	Revestimento Primário

Materiais em transporte	DMT (km)	Tipo Via
Usinagem do CA - Trecho de disposição do CA	1,09	Revestimento Primário
Brita produzida em central de 80 m³/h	1,09	Revestimento Primário
Cal hidratada para usinagem CA	1,09	Revestimento Primário
Tubo PE para areia extraída com draga de sucção tipo bomba	1,09	Revestimento Primário
Transporte de RAP	60,00	Pavimentada
Agente rejuvenescedor para RAP	60,00	Pavimentada

Fonte: Luzzi (2019) e Silva (2019)

Tabela 3.58 - DMTs adotadas para as composições relativas à sinalização

Materiais em transporte	DMT (km)	Tipo Via
Microesferas de vidro refletiva tipo I-B	300	Pavimentada
Microesferas de vidro refletiva tipo II-A	300	Pavimentada
Solvente para tinta à base de resina acrílica pint. de faixa	300	Pavimentada
Tinta para pré-marcação de pintura de faixa	300	Pavimentada
Tinta refletiva acrílica para pintura de faixa	300	Pavimentada
Confecção de placa para fornecimento e implantação	300	Pavimentada
Chapa de aço galvanizado para confecção de placa	300	Pavimentada
Película retrorrefletiva tipo I + SI para confecção de placa	300	Pavimentada
Tinta poliéster em pó para pintura da placa	300	Pavimentada
Tacha refletiva bidirecional	300	Pavimentada

Fonte: Autor

Na Tabela 3.59, estão os custos unitários dos materiais de insumo fornecidos pela ANP (ANP, 2021), juntamente com o mês e o estado de referência. Sempre que possível, foi considerado o valor mais recente (maio de 2021) para o estado do Rio Grande do Sul. Na indisponibilidade de preços dessa data, foi tomado o preço do CAP 50/70 como parâmetro para ajustar os preços para a mesma data dos demais. Em relação às misturas com adição de SBS, adotou-se o custo do CAP modificado por polímero 60-85-E por não haver custos recentes (desde agosto de 2015) fornecidos pela ANP para CAPs modificados por SBS.

Tabela 3.59 – Custo unitário, mês e estado de referência dos insumos fornecidos pela ANP

Insumos	Custo unitário (R\$/ton.)
ASFALTOS DILUÍDOS CM-30	R\$ 4.474,09
EMULSÕES ASFÁLTICAS RR-1C	R\$ 2.152,98
EMULSÕES ASFÁLTICAS RR-2C	R\$ 2.610,02

Insumos	Custo unitário (R\$/ton.)
CAP MODIFICADO POR POLÍMERO 60-85-E	R\$ 4.304,85
CIMENTOS ASFÁLTICOS CAP-50-70	R\$ 3.302,74
CAP MODIFICADO POR BORRACHA DE PNEU AB8	R\$ 3.713,72

Fonte: ANP (2021)

As composições referentes à terraplenagem, pavimentação e sinalização estão na Tabela 3.60, Tabela 3.61 e Tabela 3.62, respectivamente. Destaca-se que o código e o custo unitário das composições apresentadas são aqueles referentes ao relatório analítico de custos do SICRO (DNIT, 2021) mais recente disponível para o estado do Rio Grande do Sul (janeiro de 2021) sem levar em consideração os benefícios e despesas indiretas (BDI). É necessário comentar também que são apresentadas diferentes composições referentes ao concreto asfáltico e à sua usinagem tendo em vista que foi realizado o orçamento considerando diferentes tipos de concretos asfálticos, que os custos da pintura de ligação (PL) e do concreto asfáltico variam em função da espessura da camada de revestimento, como já foi abordado, e que as composições cujos custos e quantitativos não são informados são aquelas que incidem no custo total indiretamente por meio de outras composições. No caso da mistura CA-BOR, foram adotadas composições de execução e usinagem baseadas na faixa C do DNIT por ser aquela que melhor descreve a granulometria do material (faixa B do DAER/RS).

Tabela 3.60 - Composições utilizadas para a orçamentação da terraplenagem

Código	Nome da composição	Unidade	Custo unitário	Quant.
5502114	Escavação, carga e transporte de material de 1ª categoria - DMT de 1.000 a 1.200 m - caminho de serviço em leito natural - com escavadeira e caminhão basculante de 14 m ³	m ³	R\$ 4,44	28264,21
5503041	Compactação de aterros a 100% do Proctor intermediário	m ³	R\$ 5,38	28264,21

Fonte: DNIT (2021)

Tabela 3.61 - Composições utilizadas para a orçamentação da pavimentação

Código	Nome da composição	Unidade	Custo unitário	Quant.
4011209	Regularização do subleito	m ²	R\$ 0,70	12200
4016096	Escavação e carga de material de jazida com escavadeira hidráulica	m ³	R\$ 0,90	-
4011280	Base ou sub-base de macadame seco com brita produzida	m ³	R\$ 54,76	4880
4816012	Brita produzida em central e britagem de 80 m ³ /h	m ³	R\$ 32,76	-
4816010	Rocha para britagem com perfuratriz sobre esteira	m ³	R\$ 24,04	-
4011275	Base ou sub-base de brita graduada com brita produzida	m ³	R\$ 65,96	2440
6416039	Usinagem de brita graduada com brita produzida em usina de 300 t/h	m ³	R\$ 57,54	-
4816010	Rocha para britagem com perfuratriz sobre esteira	m ³	R\$ 24,04	-
4011351	Imprimação com asfalto diluído	m ²	R\$ 5,58	12200
4011353	Pintura de ligação	m ²	R\$ 1,13	Variável
4816020	Areia extraída com draga de sucção tipo bomba	m ³	R\$ 8,26	-
4011371	Tratamento superficial duplo com banho diluído - brita produzida	m ²	R\$ 14,86	5000
4011462	Concreto asfáltico - faixa C - areia extraída, brita produzida	t	R\$ 302,63	Variável
6416077	Usinagem de concreto asfáltico - faixa C - areia extraída e brita produzida	t	R\$ 286,46	-
4011465	Concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia extraída, brita produzida	t	R\$ 349,80	Variável
6416247	Usinagem de concreto asfáltico com asfalto polímero - faixa C - areia extraída e brita produzida	t	R\$ 332,71	-
4011471	Concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial	t	R\$ 365,51	Variável
6416213	Usinagem de concreto asfáltico com borracha - faixa C - brita comercial	t	R\$ 346,87	-
4011477	Concreto asfáltico reciclado em usina com adição de asfalto - brita produzida	t	R\$ 299,36	1636,8
6416097	Usinagem de concreto asfáltico reciclado em usina fixa com adição de material fresado e brita produzida	t	R\$ 283,26	-

Fonte: DNIT (2021)

Tabela 3.62 - Composições utilizadas para a orçamentação da sinalização

Código	Nome da composição	Unidade	Custo unitário	Quant.
5213401	Pintura de faixa - tinta base acrílica - espessura de 0,6 mm	m ²	R\$ 28,01	438,0903
5213466	Fornecimento e implantação de placa de advertência em aço, lado de 1,00 m - película retrorrefletiva tipo I e SI	un.	R\$ 443,32	4
5213414	Confecção de placa em aço n° 16 galvanizado, com película retrorrefletiva tipo I + SI	m ²	R\$ 400,52	-

Código	Nome da composição	Unidade	Custo unitário	Quant.
5212552	Pintura eletrostática a pó com tinta poliéster em chapa de aço	m ²	R\$ 14,14	-
5213449	Fornecimento e implantação de placa de regulamentação em aço, R2 lado 0,80 m - película retrorrefletiva tipo I e SI	un.	R\$ 150,92	6
5213360	Tacha refletiva bidirecional - fornecimento e colocação	un.	R\$ 15,97	188

Fonte: DNIT (2021)

Tendo os resultados da vida à fadiga para cada simulação juntamente com o custo total da implantação (soma dos custos de terraplenagem, pavimentação e sinalização) do pavimento, foram obtidas as relações custo/N para cada combinação de mistura asfáltica e espessura.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

São apresentados e analisados neste capítulo os resultados de dano por fadiga obtidos pelo FlexPAVE™, além da área trincada e vida à fadiga previstas por meio da função de transferência de Nascimento (2015) e por meio do MeDiNa. Por fim, serão analisadas economicamente as estruturas de pavimento obtidas.

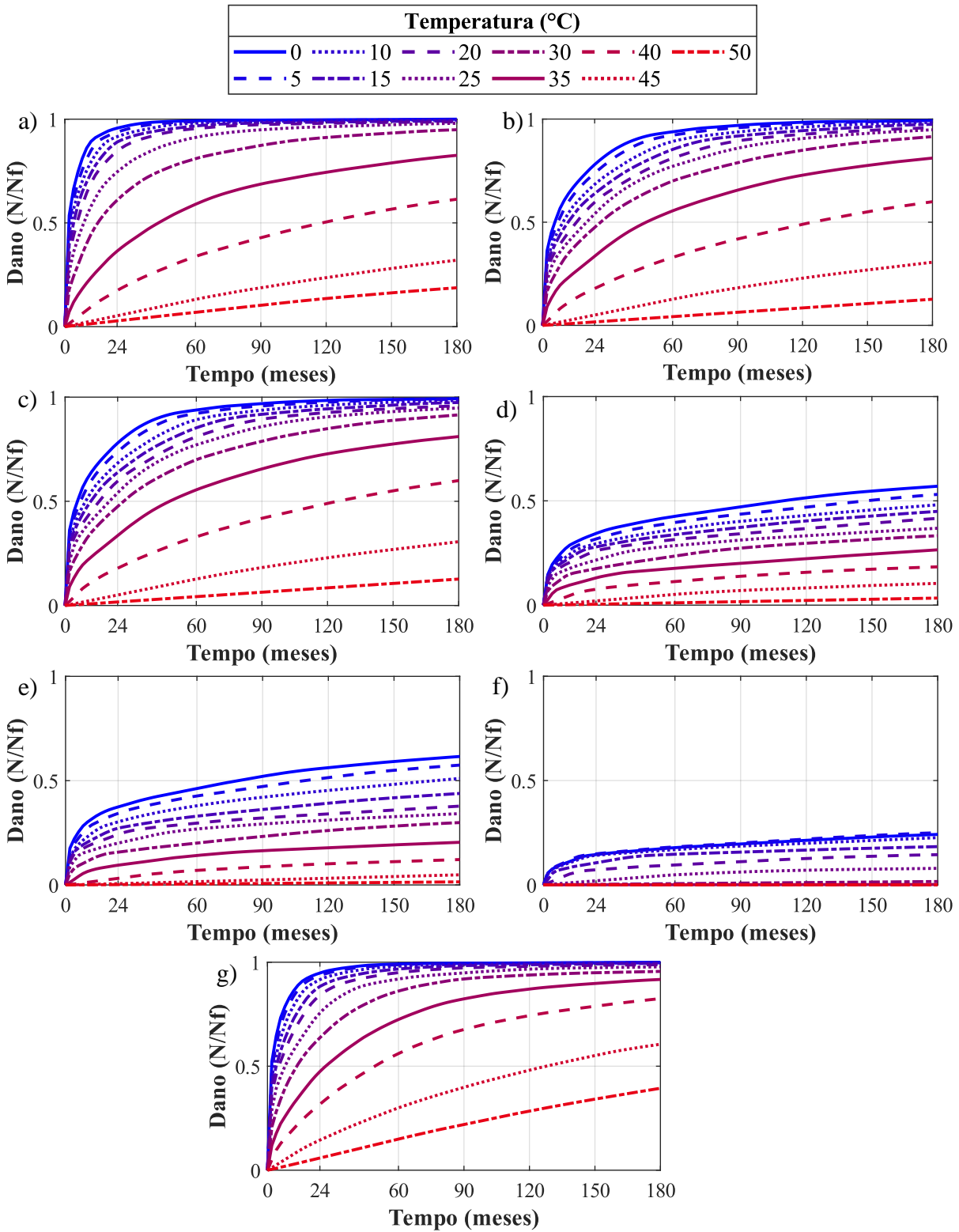
4.1 SIMULAÇÕES TC

4.1.1 Dano por fadiga

A partir das simulações a temperaturas constantes de 0 a 50 °C, foram obtidos os valores de dano utilizando a malha de 110 pontos apresentada na seção 2.7. Na Figura 4.1, estão os gráficos da evolução temporal do dano para cada mistura considerando uma espessura de 10 cm de revestimento. O resumo dos resultados de dano das simulações TC, considerando 5, 10 e 15 cm de revestimento, pode ser consultado no Apêndice B.

A primeira observação que pode ser feita é que, para todas as combinações de misturas asfálticas e espessuras de revestimento aqui abordadas, a tendência geral é que o dano decresça com o aumento da temperatura. Tal comportamento está em consonância com o que foi comentado na seção 2.4.2 acerca da influência da temperatura sobre a fadiga de misturas asfálticas e pode ser explicado pelos diferentes domínios de comportamento viscoelástico a que a mistura asfáltica está sujeita, conforme abordado na seção 2.4.3. A altas temperaturas, a mistura asfáltica começa a se comportar de forma mais dúctil, ao passo que, em baixas temperaturas, responde de maneira mais frágil aos carregamentos (ver Figura 2.22).

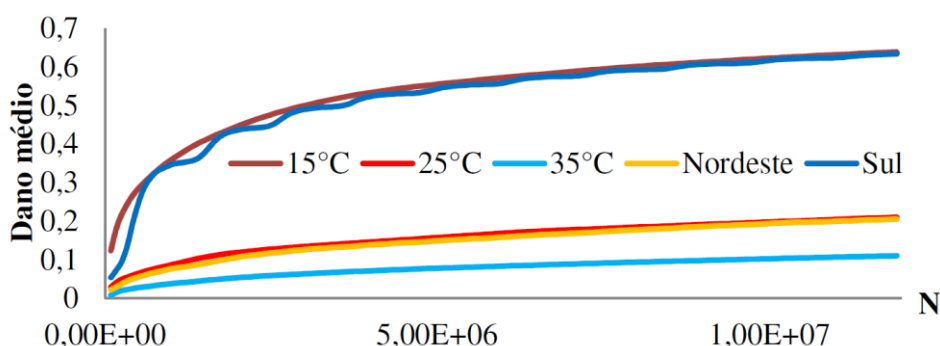
Figura 4.1 – Evolução temporal do dano a temperaturas constantes considerando 10 cm de revestimento para as misturas a) CA-50/70-HB, b) CA-50/70-U4, c) CA-50/70-U8, d) CA-SBS-U2, e) CA-SBS-U6, f) CA-BOR e f) CA-RAP30



Fonte: Autor

Os resultados apresentados também são confirmados por programas de análise elástica de pavimentos, como o CAP3D-D (Figura 4.2), utilizado na pesquisa de Santiago *et al.* (2018), onde foram consideradas diferentes condições de temperatura, incluindo aquelas representativas de localidades nas regiões Nordeste e Sul do Brasil. Verifica-se que os autores obtiveram maiores valores de dano médio para simulações com menores temperaturas.

Figura 4.2 – Evolução temporal do dano por fadiga considerando diferentes condições de temperatura a partir do *software* CAP3D-D

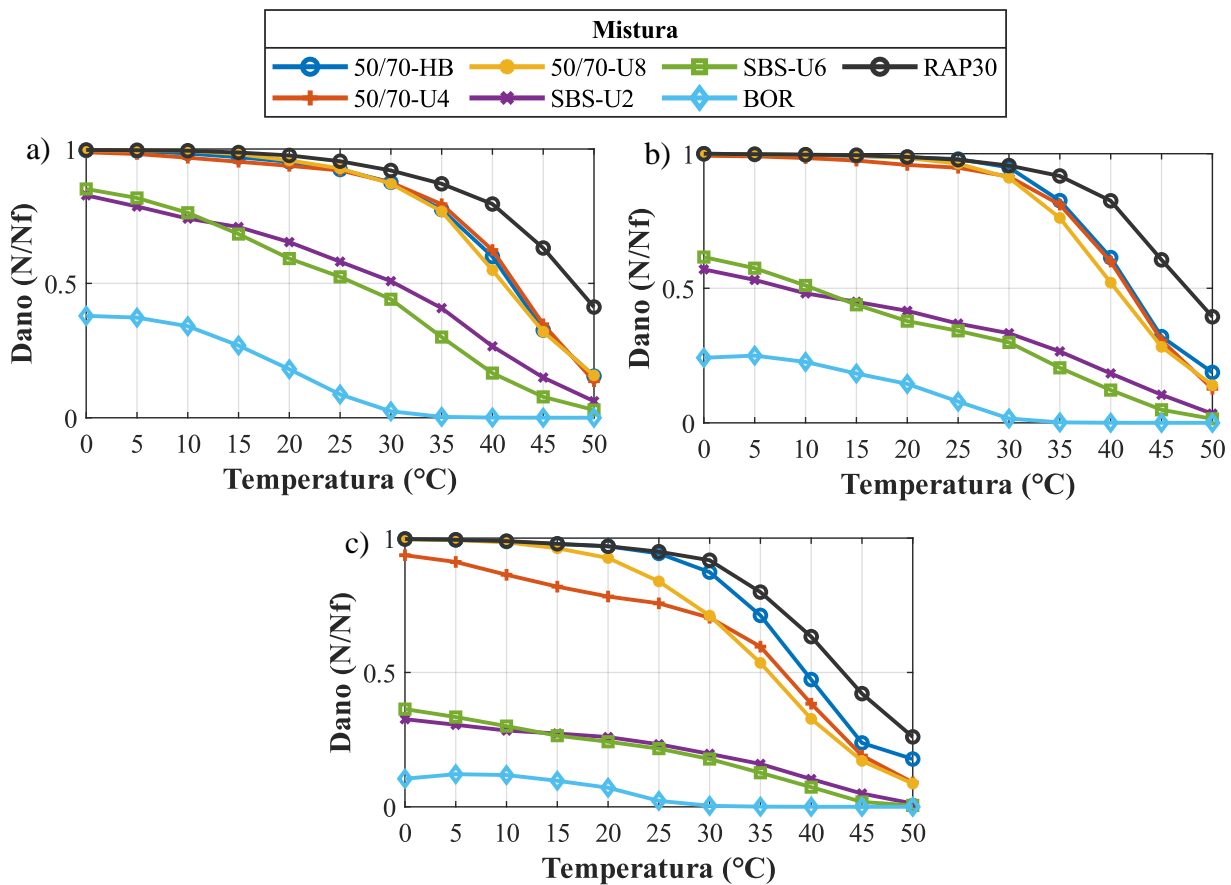


Fonte: Santiago *et al.* (2018)

O dano obtido no final das simulações, a 180 meses, para todas as misturas está representado na Figura 4.3 para 5, 10 e 15 cm de espessura de revestimento, respectivamente.

Fica claro, para as três espessuras aqui abordadas, que as misturas com ligante 50/70 (CA-50/70-HB, CA-50/70-U4 e CA-50/70-U8), juntamente com a mistura com adição de RAP (CA-RAP30), apresentaram um nível de danificação maior que as misturas com adição de SBS (CA-SBS-U2 e CA-SBS-U6) e que essas, por sua vez, apresentaram mais dano do que a mistura com asfalto borracha (CA-BOR). Comparando entre si as misturas estudadas por Schuster (2018), percebe-se que na sua pesquisa foi observado o mesmo *ranking* de dano para os diferentes tipos de mistura, ou seja, misturas com ligante convencional apresentaram maior dano, seguidas das misturas com adição de SBS e, por fim, a mistura CA-BOR (nomeada como U3-DAER-FXB-ECO-10-EXP pelo autor) apresentou o menor dano. Visto que as misturas CA-50/70-HB e CA-RAP30 foram simuladas em condições distintas de tráfego por Bueno (2019) e Correa (2020), respectivamente, não é possível fazer uma comparação direta com as misturas estudadas por Schuster (2018).

Figura 4.3 - Dano a 180 meses para diferentes temperaturas e misturas com a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento



Fonte: Autor

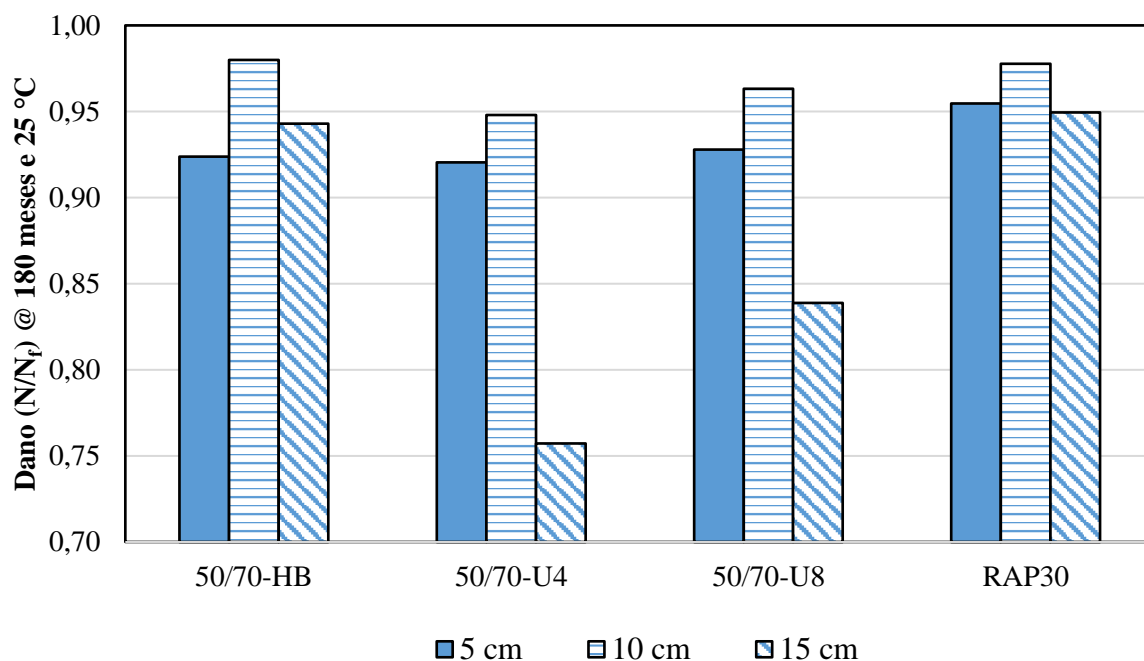
O menor dano observado pelas misturas com adição de SBS e pela mistura CA-BOR também está de acordo, respectivamente, com as pesquisas de Qabur (2018) e Kuchiishi et al. (2019). Quanto à mistura CA-RAP30, observou-se, assim como atestado por Mannan et al. (2015), que a mistura foi mais danificada em comparação com a mistura com ligante convencional.

Para analisar melhor as razões para o *ranking* observado entre as misturas, pode-se verificar, na Figura 3.29 (apesar das retas quase se sobreporem), que foi verificado o mesmo *ranking* geral por tipo de mistura observado no dano, ou seja, as misturas com ligante convencional e a mistura CA-RAP30 apresentaram sua curva deslocada mais para a esquerda (menores valores de Nf para o mesmo G^R), seguidas das misturas com adição de SBS e, por último, a mistura CA-BOR.

Observando-se a relação entre o dano e a espessura do revestimento, observa-se que houve aumento do dano a 180 meses com o aumento da espessura de revestimento para as

misturas com ligante 50/70 e com adição de RAP. Na Figura 4.4, estão plotados, como exemplo, os danos obtidos para as essas misturas a 25 °C.

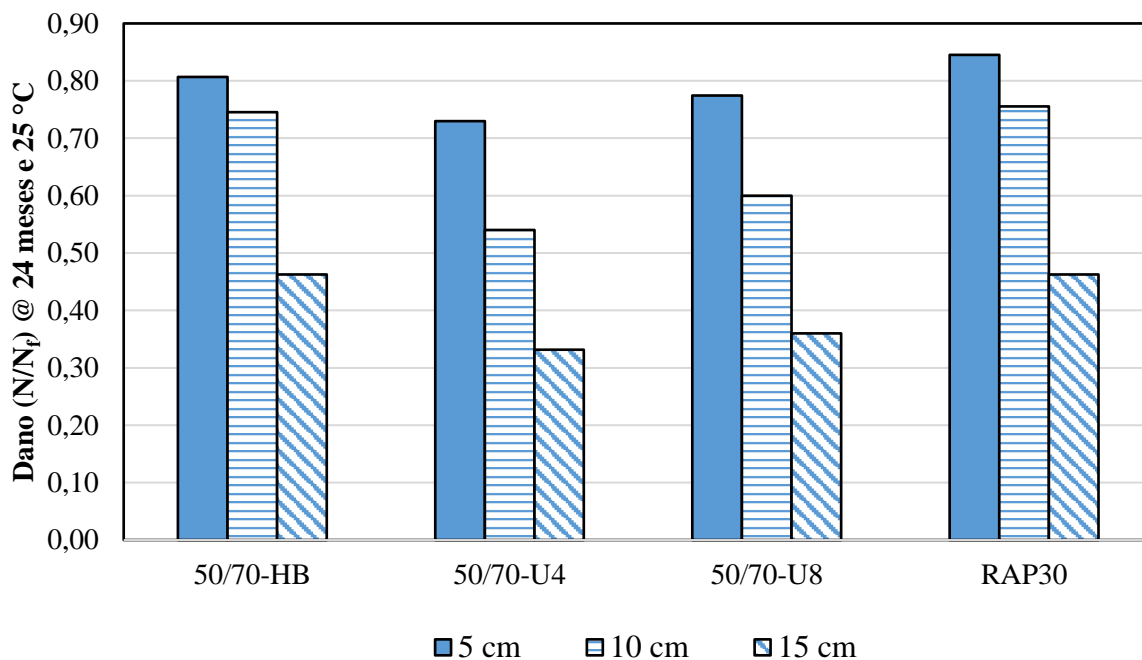
Figura 4.4 – Dano a 25°C para as misturas CA-50/70-HB, CA-50/70-U4, CA-50/70-U8 e CA-RAP30 a 180 meses



Fonte: Autor

Tal comportamento foi divergente do senso comum, visto que uma estrutura mais robusta tende a dissipar mais as tensões e, conseqüentemente, apresentar menores deformações, o que se refletirá em uma menor danificação. Contudo, verifica-se que para níveis menores de tráfego (nos primeiros estágios das simulações), as estruturas com camadas de revestimento mais espessas apresentaram menor dano para todos os casos (Figura 4.5).

Figura 4.5 – Dano a 25°C para as misturas CA-50/70-HB, CA-50/70-U4, CA-50/70-U8 e CA-RAP30 a 24 meses

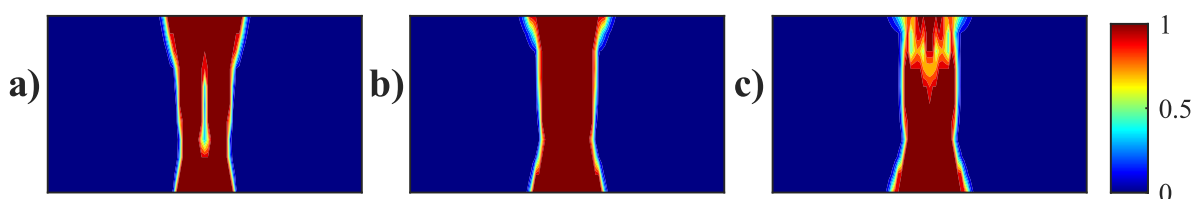


Fonte: Autor

Comparando a Figura 4.4 com a Figura 4.5, nota-se que as aparentes inconsistências comentadas começam a ser observadas somente valores muito elevados de AT prevista, além do limite de 30%. Após a aplicação da função de transferência, conforme será discutido na seção 4.1.3, todos os valores de dano apresentados na Figura 4.4 correspondem a valores de AT superiores a 94%. Por outro lado, a AT correspondente aos valores de dano da Figura 4.5 são inferiores a 50%.

Ainda sobre essa questão, a distribuição do dano ao longo da seção transversal pode estar influenciando tais resultados inesperados. Na Figura 4.6, por exemplo, estão os gráficos de contorno de dano a 120 meses para a mistura CA-50/70-HB a 25 °C.

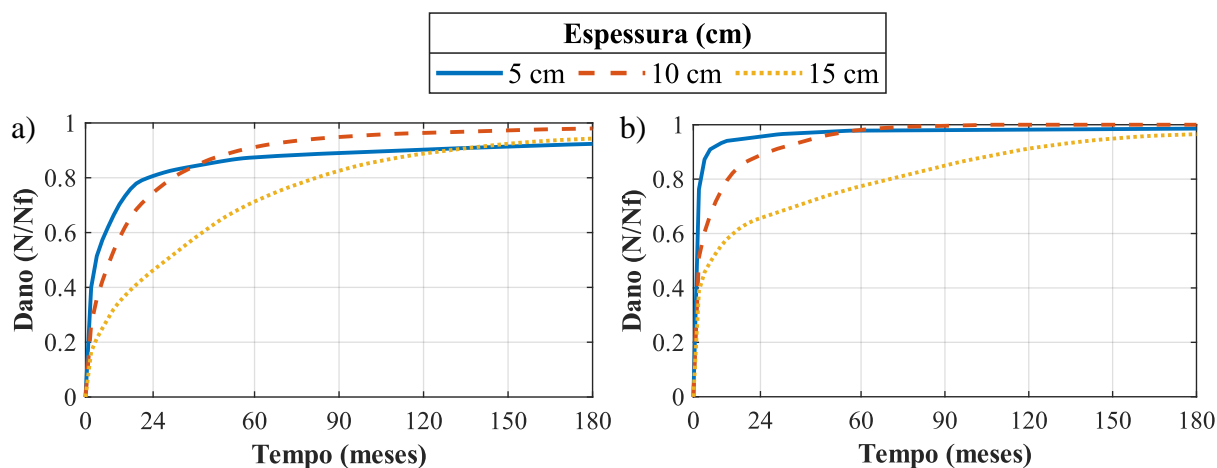
Figura 4.6 – Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-HB a 120 meses a 25 °C e espessura de revestimento de a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm



Fonte: Autor

Pode-se perceber que, no caso do pavimento com 5 cm de revestimento, há uma região sem danificação no interior da camada, o que não se verifica com 10 cm de revestimento. As razões para essa diferença permanecem inexploradas, mas fica evidente que a malha de pontos escolhida para o cálculo do dano médio interferirá nos resultados para diferentes espessuras. Visto que a malha de 110 pontos adotada se concentra no centro da seção transversal ao longo de toda a sua profundidade, a região menos danificada na Figura 4.6 a) minorará o dano em relação à seção da Figura 4.6 b). Na Figura 4.7, estão os gráficos de dano para a mistura CA-50/70-HB a 25 °C considerando, respectivamente, a malha de 110 pontos já comentada e apenas as duas primeiras e as duas últimas linhas (próximas ao topo e ao fundo da camada) da mesma malha.

Figura 4.7 – Evolução temporal do dano médio para a mistura CA-50/70-HB a 25 °C considerando a) malha de 110 pontos e b) duas primeiras e duas últimas linhas da malha de 110 pontos



Fonte: Autor

Na Figura 4.7 a), percebe-se que a aparente inconsistência observada (maiores danos para maiores espessuras) fica atenuada em comparação com o gráfico da Figura 4.7. Apesar disso, a malha original de 110 pontos é a que foi utilizada em todas as análises desta pesquisa, visto que a função de transferência de AT de Nascimento (2015) foi desenvolvida a partir dela. Tais comentários são traçados apenas para ressaltar que a relação entre espessura e dano é função de tais critérios de análise. O MeDiNa, por exemplo, conforme foi apresentado na seção

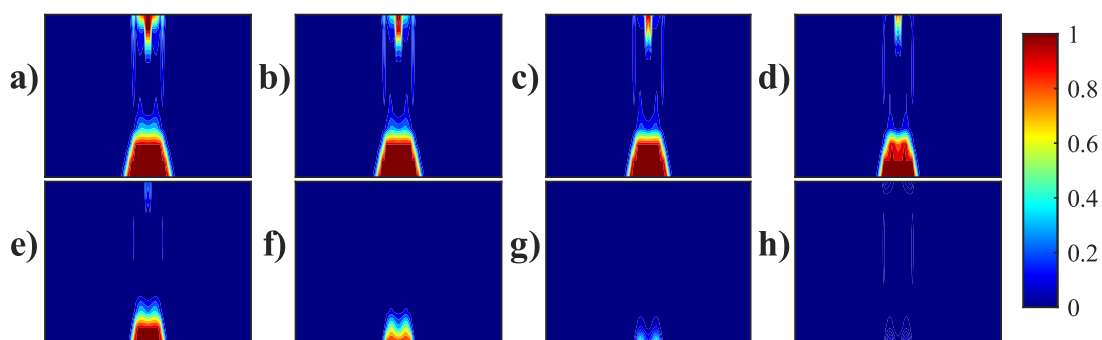
2.6, usa uma malha de 20 pontos, sendo 10 deles no topo e os outros 10 pontos no fundo da camada de revestimento.

Também é imperativo lembrar, conforme citado na seção 3.4.5 que a pressão de inflação de pneus adotada neste estudo (550 kPa) é diferente daquela utilizada por Nascimento (2015) no desenvolvimento de sua função de transferência (800 kPa). Contudo, tal diferença não altera a relação entre a temperatura e o dano, cuja análise constitui o objetivo desta pesquisa.

4.1.2 Tipo de fissuração

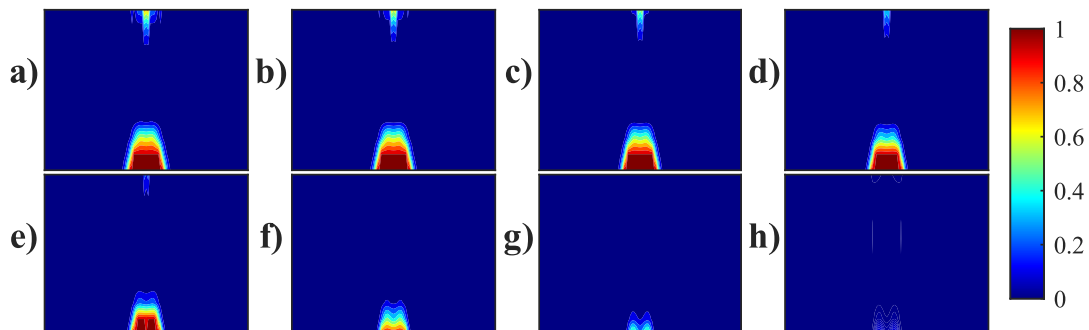
Além dos resultados numéricos de dano fornecidos pelo FlexPAVE™, também é possível obter gráficos que mostram como essa danificação se distribui no interior da camada de revestimento, conforme abordado na seção 2.5.1. Da Figura 4.8 à Figura 4.14, estão os gráficos de contorno para cada mistura considerando 10 cm de espessura de revestimento e temperaturas de 5 a 40 °C quando do início do processo de danificação (que varia de mistura para mistura). Os gráficos considerando 5 e 15 cm de espessura de revestimento se encontram no Apêndice C.

Figura 4.8 – Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-HB a 1 mês e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C



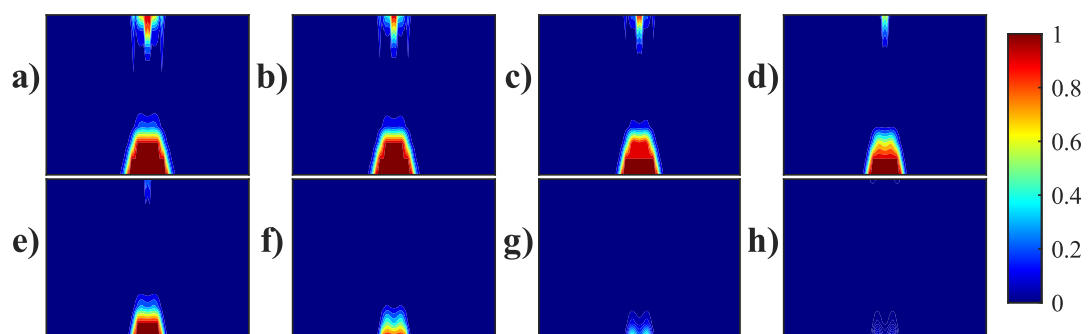
Fonte: Autor

Figura 4.9 – Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-U4 a 1 mês e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C



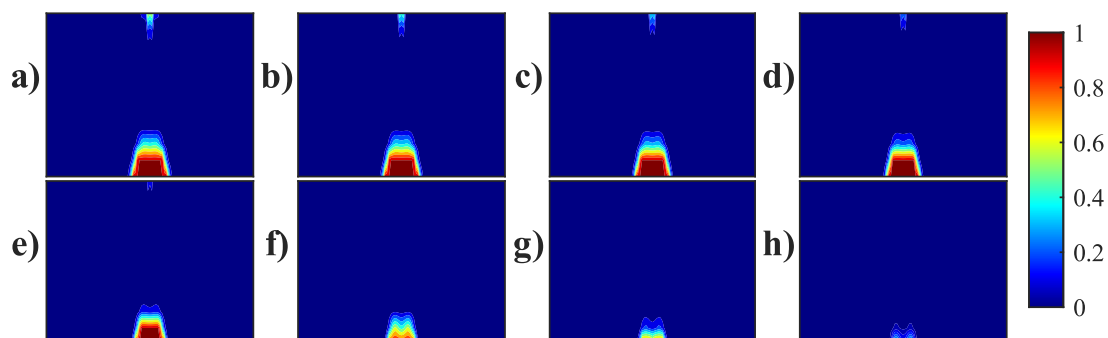
Fonte: Autor

Figura 4.10 – Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-U8 a 1 mês e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C



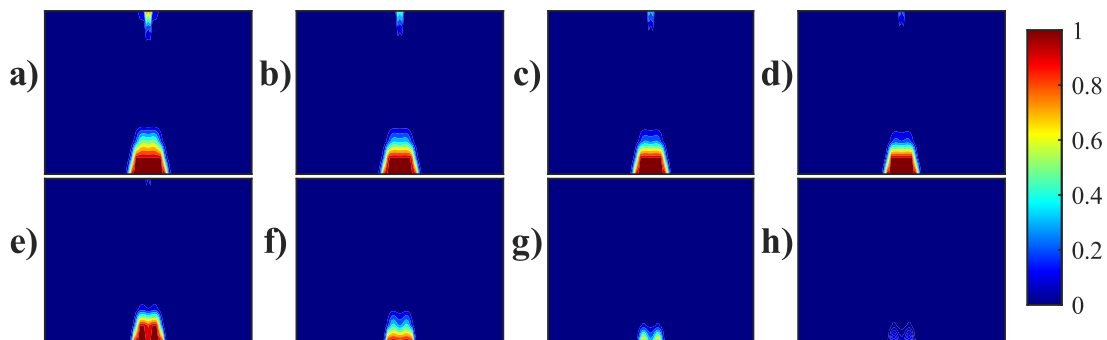
Fonte: Autor

Figura 4.11 – Distribuição do dano para a mistura CA-SBS-U2 a 6 meses e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C



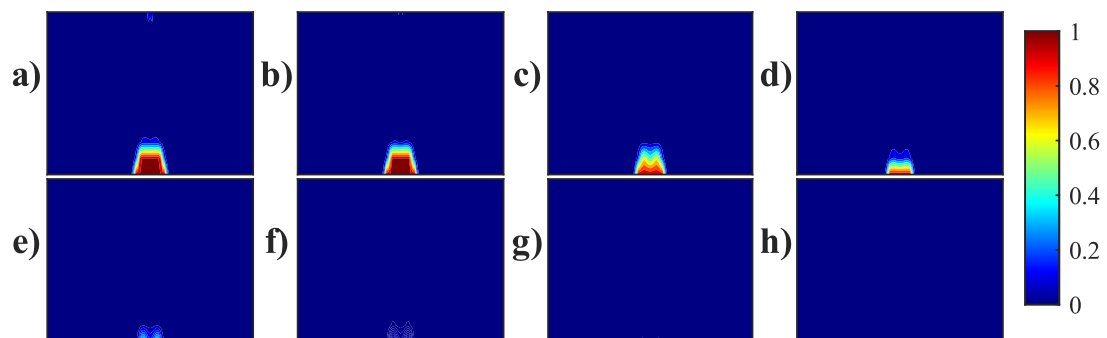
Fonte: Autor

Figura 4.12 – Distribuição do dano para a mistura CA-SBS-U6 a 6 meses e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C



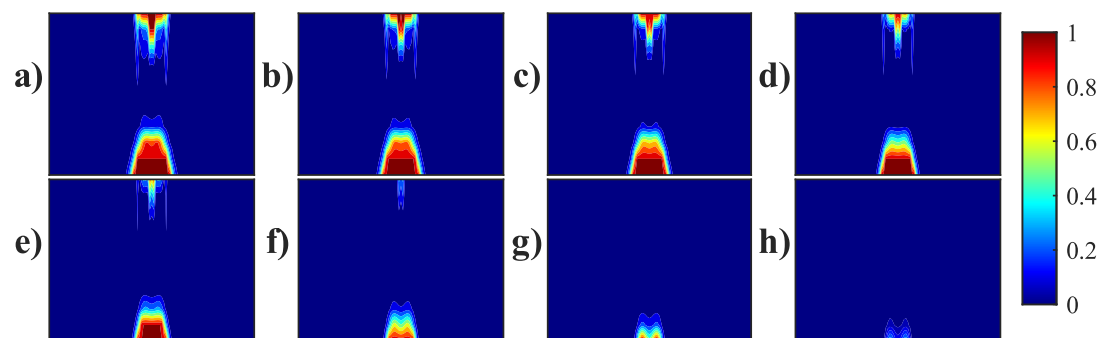
Fonte: Autor

Figura 4.13 – Distribuição do dano para a mistura CA-BOR a 24 meses e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C



Fonte: Autor

Figura 4.14 – Distribuição do dano para a mistura CA-RAP30 a 1 mês e 10 cm de revestimento a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C



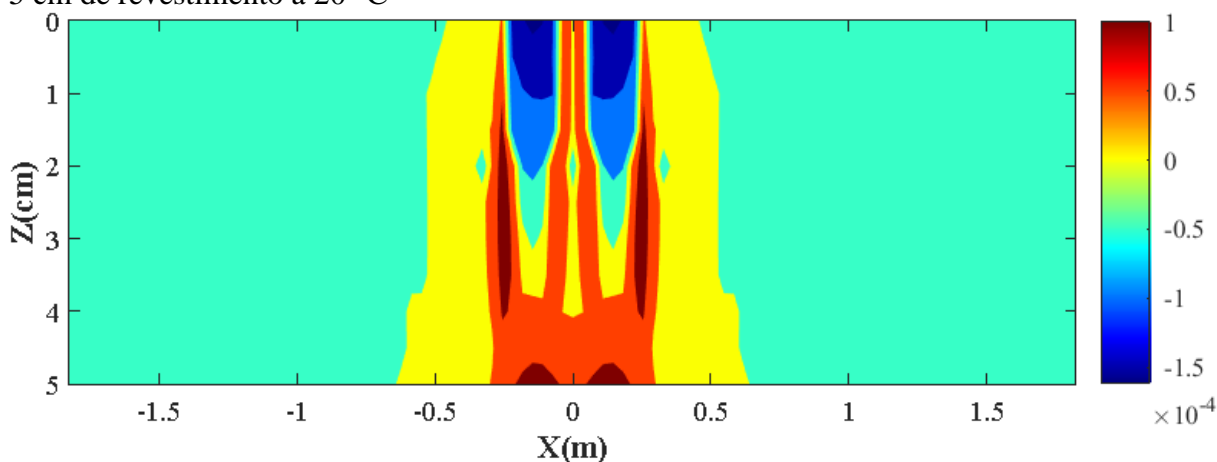
Fonte: Autor

As regiões em azul nos gráficos mostram onde não houve dano significativo e as regiões vermelhas mostram onde houve maior danificação, permitindo uma análise de caráter qualitativo do fenômeno de fadiga. Conforme Wang *et al.* (2018), tais representações são úteis para prever se as trincas por fadiga serão do tipo *bottom-up* ou *top-down* e, como já abordado na seção 2.4.2, essa identificação é importante para a gerência de pavimentos quanto ao tipo de reabilitação que será necessária posteriormente.

De forma geral, denota-se um avanço mais precoce da danificação por fadiga na face inferior da camada. A tais casos, associam-se fissuras do tipo *bottom-up*, que partem do fundo da camada de revestimento e se propagam em direção à superfície. Conforme Park e Kim (2013), tal tipo de fissuração é normalmente explicado pelas deformações de tração que surgem nas fibras inferiores do revestimento em função da flexão causada pela passagem dos veículos.

Além disso, observou-se também, de forma paralela, uma danificação na parte superior da camada, sobretudo entre as duas regiões de contato dos pneumáticos com a superfície do pavimento. Conforme NCHRP (2010), as fissuras que se iniciam na superfície, no caso de camadas esbeltas, tendem a ocorrer devido a tensões que surgem da flexão fora da área de contato pneu-pavimento, o que pode ser o caso aqui abordado. A Figura 4.15 mostra, como exemplo, a distribuição das deformações principais na seção transversal considerando a mistura CA-50/70-HB com 5 cm de espessura a 20 °C no momento da passagem do veículo.

Figura 4.15 – Distribuição da deformação principal para a mistura CA-50/70-HB considerando 5 cm de revestimento a 20 °C



Fonte: Autor

Percebe-se que surgem deformações de compressão (em azul) próximas à superfície na região de contato entre o pneumático e a superfície do revestimento e, adjacentes a essas regiões, ocorrem áreas de tração (em laranja e vermelho). Tal observação vai ao encontro do mecanismo de fissuração *top-down* supracitado.

Sobre a relação entre a temperatura e a fissuração *top-down*, concordam com os resultados apresentados Baek (2010) e Canestrari e Ingrassia (2020), que ressaltam que temperaturas mais baixas tendem a favorecer a ocorrência de tal fenômeno.

Sobre as análises aqui realizadas, vale ressaltar o que foi comentado na seção 2.4.2. Os mecanismos envolvidos na propagação das fissuras (especialmente do tipo *top-down*) são complexos e, portanto, não está compreendido no foco deste trabalho aprofundar-se mais nessas questões.

4.1.3 Área trincada

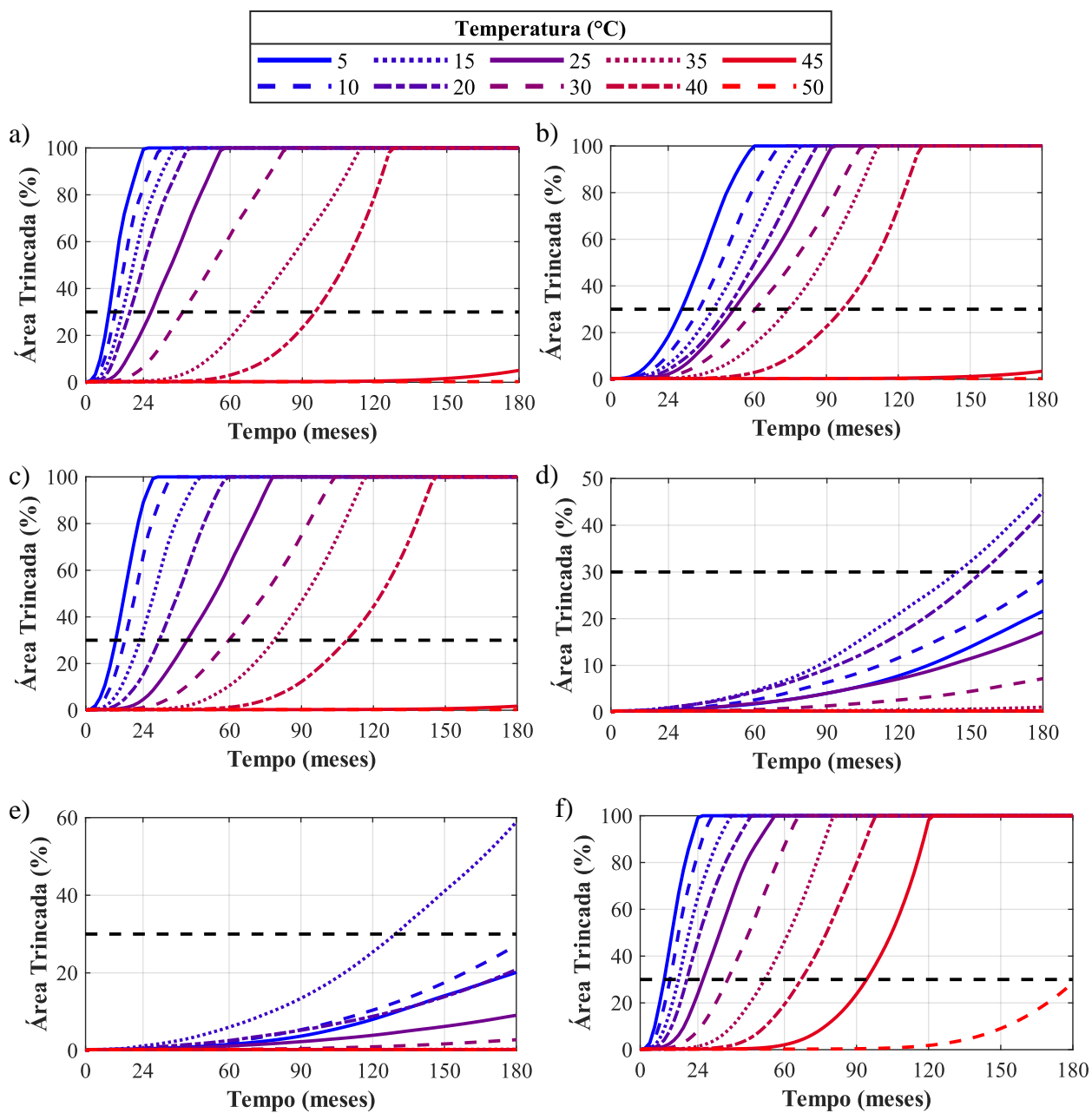
São apresentados, na Figura 4.16, os valores de percentual de AT obtidos por meio da aplicação da função de transferência de Nascimento (2015) baseada no parâmetro $T_{0,35}$. Em cada gráfico, a linha tracejada indica o limite de 30% de AT, utilizado para definir a ruptura por fadiga do pavimento, conforme comentado na seção 3.4.7. Cabe salientar também que a função foi aplicada somente na faixa de temperatura de 5 a 50 °C, de forma a não destoar dos dados climáticos utilizados na sua calibração, que são respectivos às cidades americanas de Miami e San Diego, conforme abordado na seção 2.7. Além disso, comenta-se que foi utilizada a Equação (2.49) considerado 95% de confiabilidade (resultando 1,65 para o parâmetro Z da curva normal), que é o mesmo nível adotado no MeDiNa para vias do tipo Sistema Arterial Primário. Para a consulta do resumo de todos os dados de AT das simulações TC, pode-se recorrer ao Apêndice D.

É necessário ressaltar que não foi exibido o gráfico da mistura CA-BOR porque a AT obtida para todas as temperaturas não atingiu valores significativos (inferiores a 1%).

A partir dados expostos na Figura 4.16, percebe-se que não houve sempre uma relação direta entre a temperatura e o percentual de AT. Em outras palavras, acréscimos de temperatura não resultaram necessariamente em decréscimos de AT, como observou-se de maneira geral no caso do dano. As explicações para isso estão expostas com detalhes na seção 4.2.3.

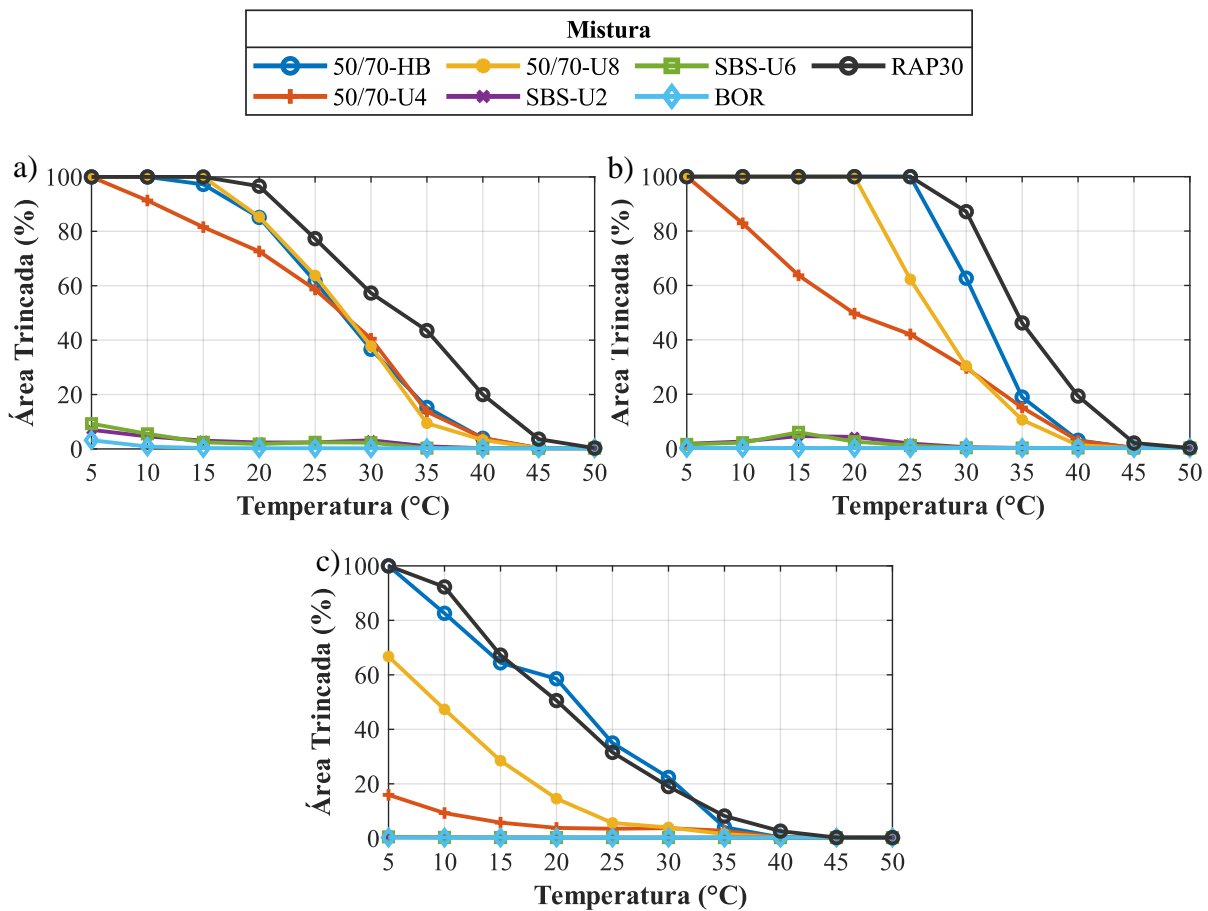
Ainda que ocorram essas supostas inconsistências, verifica-se, na Figura 4.17, que, nos estágios iniciais da vida do pavimento, a AT apresentou a tendência geral de diminuir a maiores temperaturas.

Figura 4.16 – Evolução temporal da AT para as misturas a) CA-50/70-HB, b) CA-50/70-U4, c) CA-50/70-U8, d) CA-SBS-U2, e) CA-SBS-U6 e f) CA-RAP30 considerando 10 cm de revestimento



Fonte: Autor

Figura 4.17 – AT a 60 meses para diferentes temperaturas e misturas com a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento



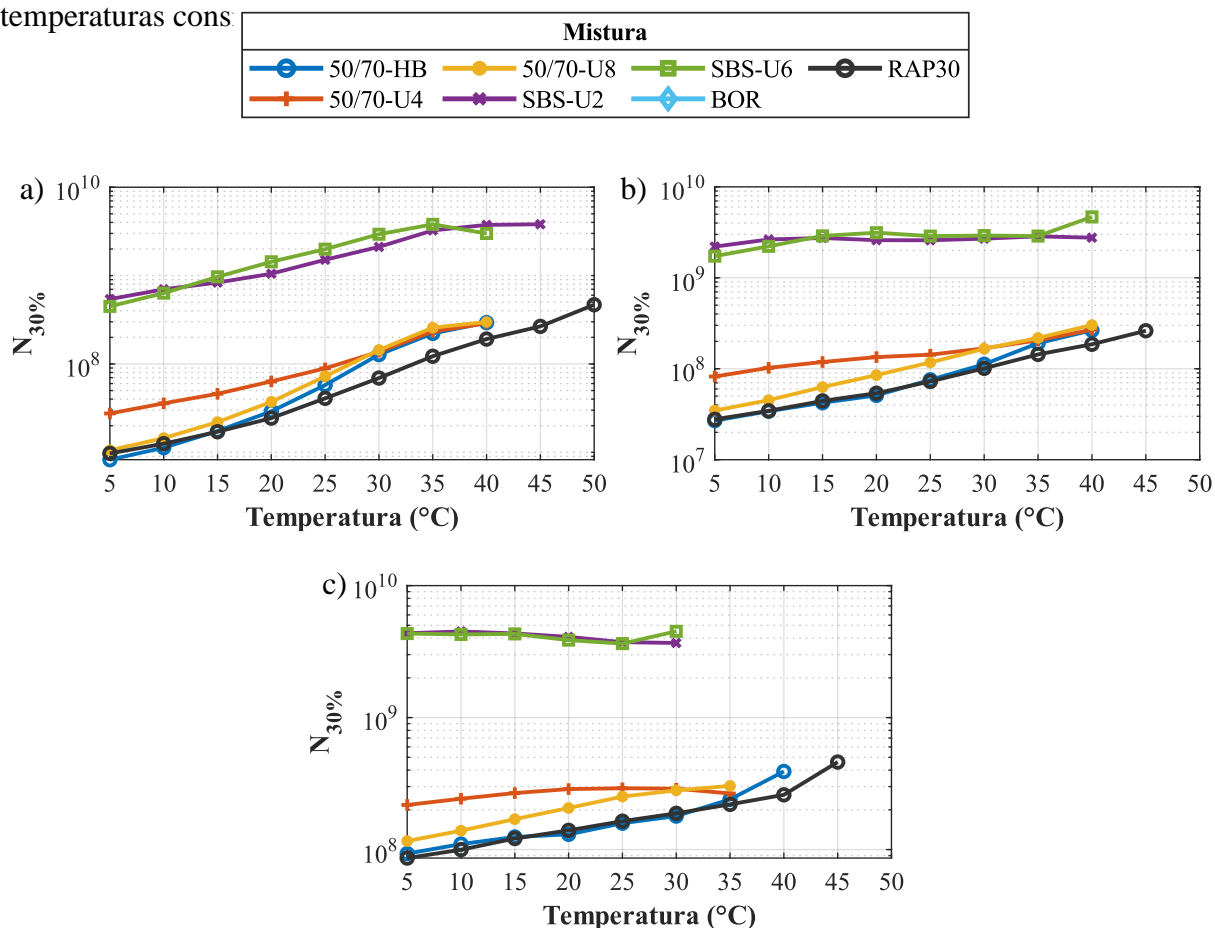
Fonte: Autor

Quanto à relação entre a espessura do revestimento e a AT, verificaram-se maiores valores de AT para maiores espessuras de revestimento pelos motivos já abordados na seção 4.1.1 em relação ao dano.

Sobre essa questão, também Santiago *et al.* (2020) relatam que, ao aplicar a função de transferência baseada no *software* CAP3D-D, obteve-se valores de AT praticamente idênticos para diferentes espessuras de revestimento, o que também foi contra o esperado. A tal fenômeno, os autores também atribuíram como causa o processo de conversão do dano em dano reduzido. Dessa forma, fica evidente que, no estado atual das pesquisas nacionais acerca da fadiga em pavimentos asfálticos, por mais que as funções de transferência sejam validadas para trechos experimentais em diferentes localidades do país (no caso dos autores supracitados, foram utilizados trechos das regiões Nordeste e Sul do Brasil), a natureza empírica de tal conversão de grandezas pode ocasionar em tais aparentes inconsistências.

Dispondo-se da evolução da AT ao longo do tempo, foram obtidos os valores de N em que a AT atingiu o valor de 30% (vida à fadiga do material) considerando 5, 10 e 15 cm de espessura de revestimento, conforme discriminado na Figura 4.18 a), b) e c), respectivamente. Observa-se que os pontos ausentes nos gráficos correspondem às simulações onde não foi atingido o limite de 30% de AT ao longo dos 180 meses. Além disso, visto que as misturas CA-SBS-U2, CA-SBS-U6 e CA-BOR não atingiram o limite de AT fixado na maioria das situações abordadas, foram feitas simulações adicionais com um N igual a 5×10^9 solicitações ao longo de 180 meses de modo a obter a vida à fadiga para tais misturas.

Figura 4.18 – Vida à fadiga correspondente à AT de 30% para diferentes misturas e temperaturas cons



Fonte: Autor

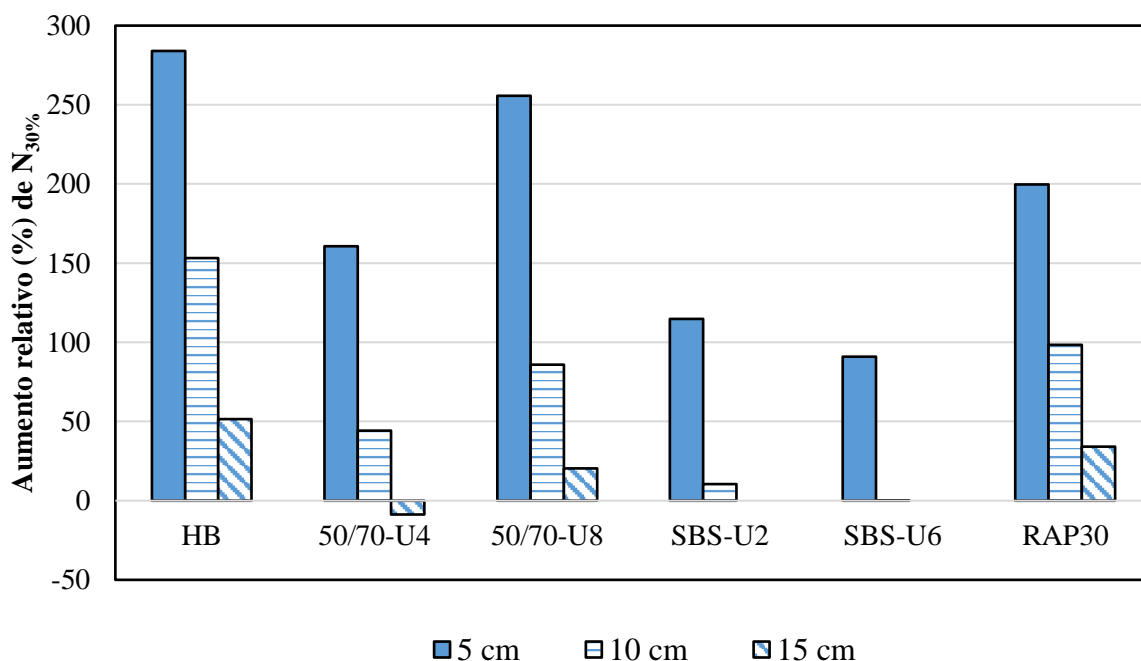
Acerca dos gráficos, cabem dois comentários. O primeiro é que a mistura CA-BOR não atingiu 30% de AT em nenhum caso. Tendo em vista os já elevados níveis de tráfego adotados

nas simulações, optou-se por não adotar tráfegos mais intensos ainda e, portanto, muito distantes de valores factuais.

A segunda consideração diz respeito à influência da temperatura na vida à fadiga dos materiais estudados. No caso de pavimentos com 5 cm de revestimento, observa-se um crescimento praticamente linear da vida à fadiga (em escala logarítmica) em função da temperatura, enquanto que, à medida que a espessura da camada aumenta, a temperatura parece influenciar menos nos resultados, o que vai ao encontro das observações de Santiago *et al.* (2018) utilizando o CAP3D-D.

As estimativas de temperaturas para o interior do estado do Rio Grande do Sul utilizadas na presente pesquisa se aproximam da faixa entre 25 °C (hipótese DNIT) e 35 °C (hipótese ISD). Na Figura 4.19, estão registradas as variações relativas de $N_{30\%}$ entre essas duas temperaturas para todas as misturas estudadas exceto a mistura CA-BOR.

Figura 4.19 – Variação relativa da vida à fadiga correspondente à AT de 30% entre 25 e 35 °C para diferentes misturas



Fonte: Autor

Da Figura 4.19, depreende-se que o aumento de 25 °C para 35 °C aumenta consideravelmente a vida à fadiga, podendo essa diferença chegar a mais de 200% no caso de 5 cm de espessura e a mais de 100% no caso de 10 cm. Assim, pode-se afirmar que a

temperatura considerada nas análises de desempenho à fadiga de pavimentos asfálticos, nas condições aqui estudadas de tráfego e com os materiais em questão, exerce uma sensível influência no potencial desempenho à fadiga de pavimentos asfálticos.

É necessário, todavia, ressaltar que todas as considerações feitas não somente nessa seção como nas próximas levam em consideração apenas a fadiga de pavimentos asfálticos. Temperaturas mais elevadas, que tendem a atenuar a fissuração por fadiga na maioria dos casos, podem comprometer o pavimento ao acelerar outros processos de degradação, como o afundamento de trilha de roda, por exemplo.

4.1.4 Síntese das análises

Do que foi apresentado nas análises das simulações TC, pode-se resumir os seguintes pontos:

- a) A temperatura tem influência direta no dano por fadiga e na previsão de AT e de vida à fadiga;
- b) A primeira mistura no ranking de desempenho foi a CA-BOR, seguida das misturas com adição de SBS, as misturas com ligante convencional e a mistura CA-RAP30;
- c) A fissuração prevista foi predominantemente do tipo *bottom-up*;
- d) A variação de 25°C para 35 °C ocasiona consideráveis variações na vida à fadiga prevista.

4.2 SIMULAÇÕES HT

Serão apresentados, na presente seção, os resultados obtidos para dano e AT a partir da aplicação das hipóteses de temperatura comentadas na seção 3.1, além de sua subsequente análise.

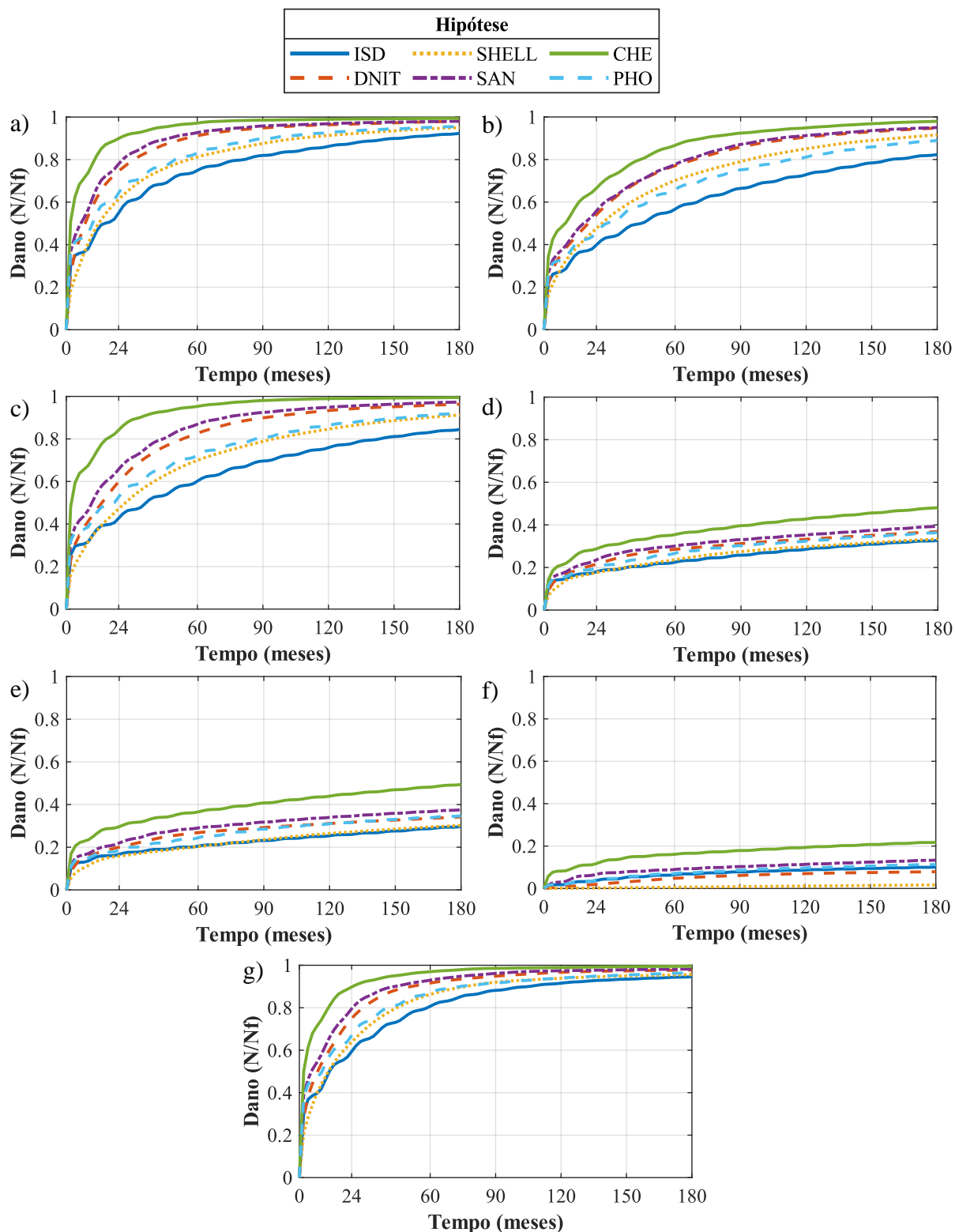
4.2.1 Dano por fadiga

Na Figura 4.20, estão os gráficos temporais de dano considerando 10 cm de espessura da camada de revestimento, respectivamente, obtidos a partir das diferentes hipóteses de temperatura apresentadas e as diferentes misturas asfálticas. O resumo do dano obtido para todas as simulações HT está no Apêndice E.

Comparando os resultados para as diferentes condições de temperatura, verifica-se que a hipótese ISD foi a que resultou em menores valores de dano para todas as misturas asfálticas, exceto a mistura CA-BOR. Por outro lado, as simulações considerando a hipótese CHE foram as que apresentaram maior nível de danificação.

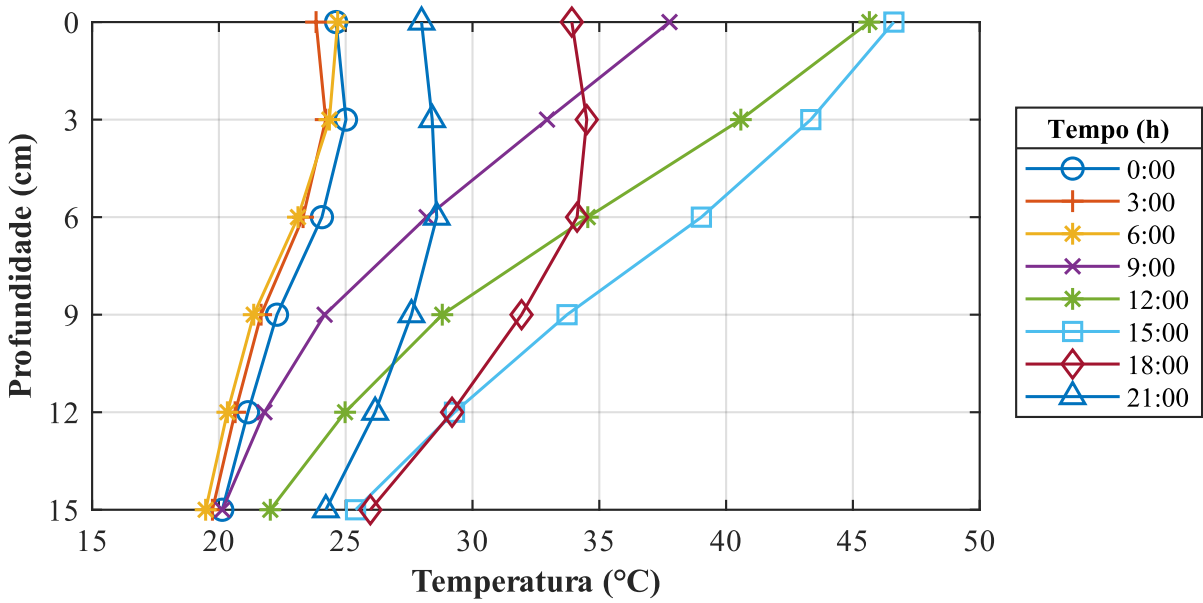
Alguns comentários sobre cada hipótese podem vir ao auxílio na procura por uma explicação para esse comportamento. Primeiramente, como já comentado na seção 3.1, as hipóteses ISD, SAN, CHE e PHO têm variações de temperatura ao longo do tempo (oscilações diárias e sazonais) e ao longo do espaço (gradientes de temperatura ao longo da profundidade do pavimento). Sendo assim, simulações com camadas de revestimento mais esbeltas terão uma média de temperaturas diferente daquelas em que foram considerados revestimentos mais espessos. Isso ocorre porque o FlexPAVE™ descarta as temperaturas modeladas para profundidades superiores à espessura do revestimento. Por exemplo, ao se considerar 5 cm de revestimento, todas as temperaturas inseridas no programa para espessuras maiores que essa serão descartadas. Da Figura 4.21 à Figura 4.24, estão, respectivamente, as temperaturas médias anuais das hipóteses ISD, SAN, CHE e PHO ao longo da profundidade para diferentes horas do dia.

Figura 4.20 – Evolução temporal do dano para as misturas a) CA-50/70-HB, b) CA-50/70-U4, c) CA-50/70-U8, d) CA-SBS-U2, e) CA-SBS-U6 e f) CA-RAP30 a diferentes hipóteses de temperatura considerando 10 cm de revestimento



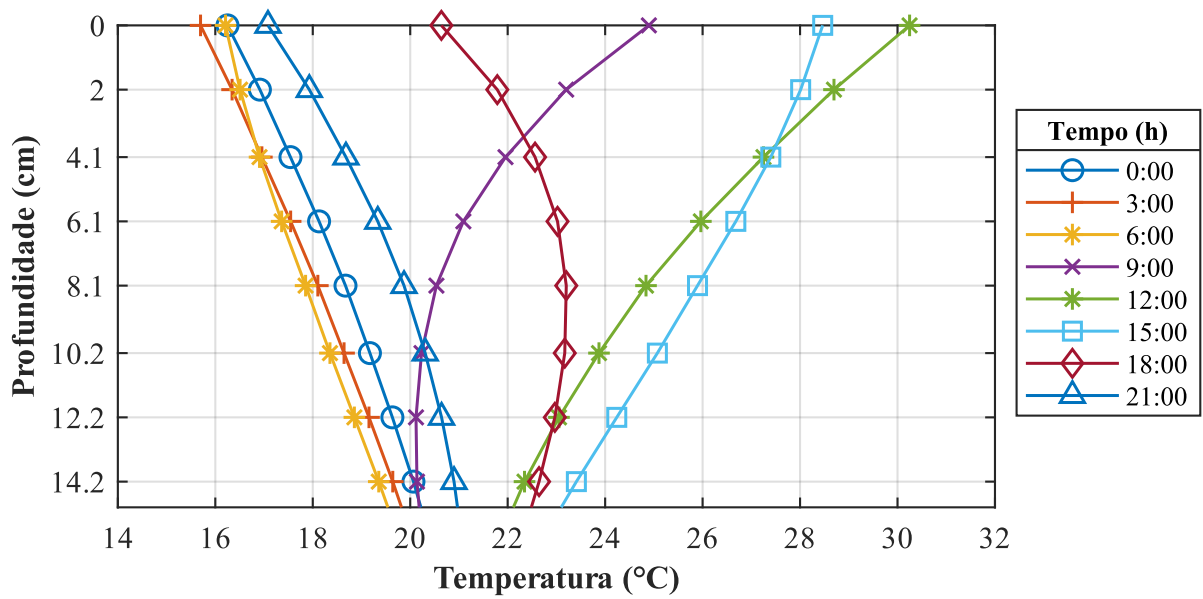
Fonte: Autor

Figura 4.21 - Temperatura média anual da hipótese ISD ao longo da profundidade e para diferentes horas do dia



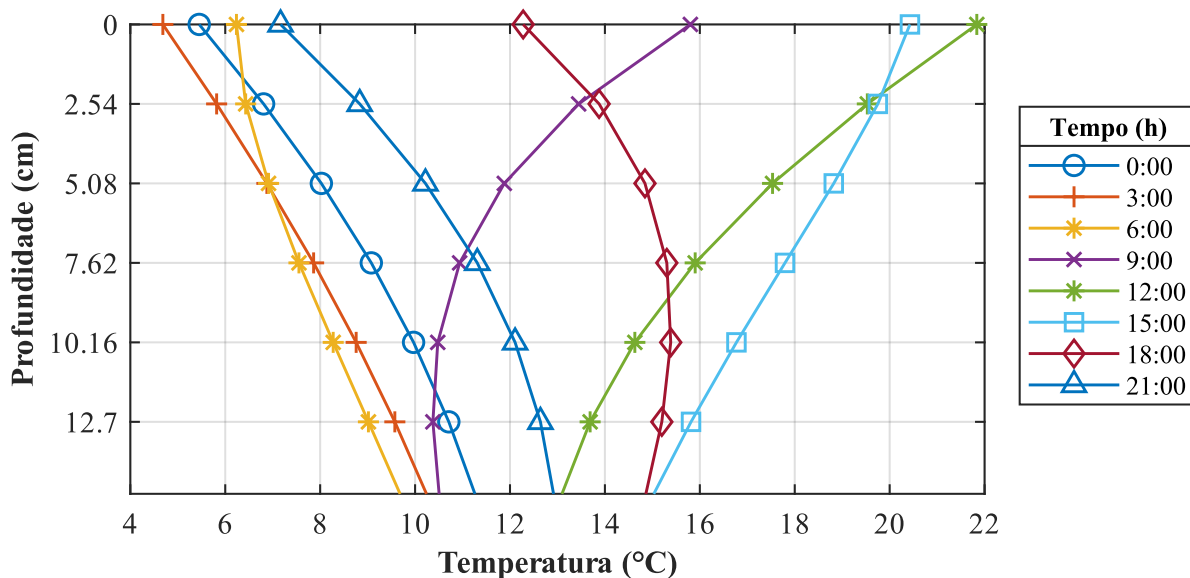
Fonte: Autor

Figura 4.22 - Temperatura média anual da hipótese SAN ao longo da profundidade e para diferentes horas do dia



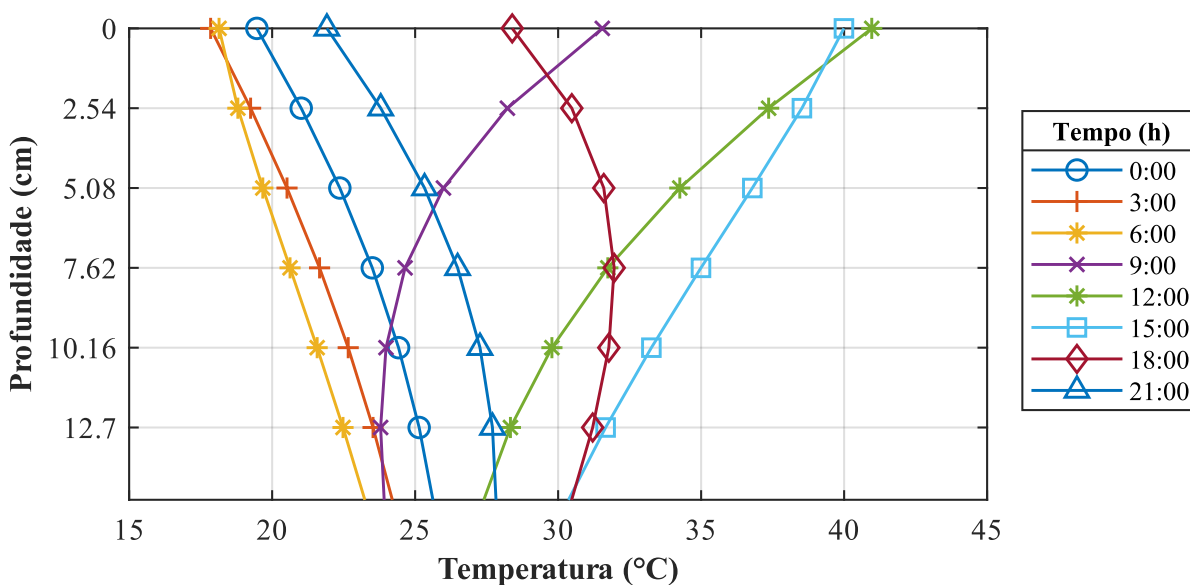
Fonte: Autor

Figura 4.23 - Temperatura média anual da hipótese CHE ao longo da profundidade e para diferentes horas do dia



Fonte: Autor

Figura 4.24 - Temperatura média anual da hipótese PHO ao longo da profundidade e para diferentes horas do dia



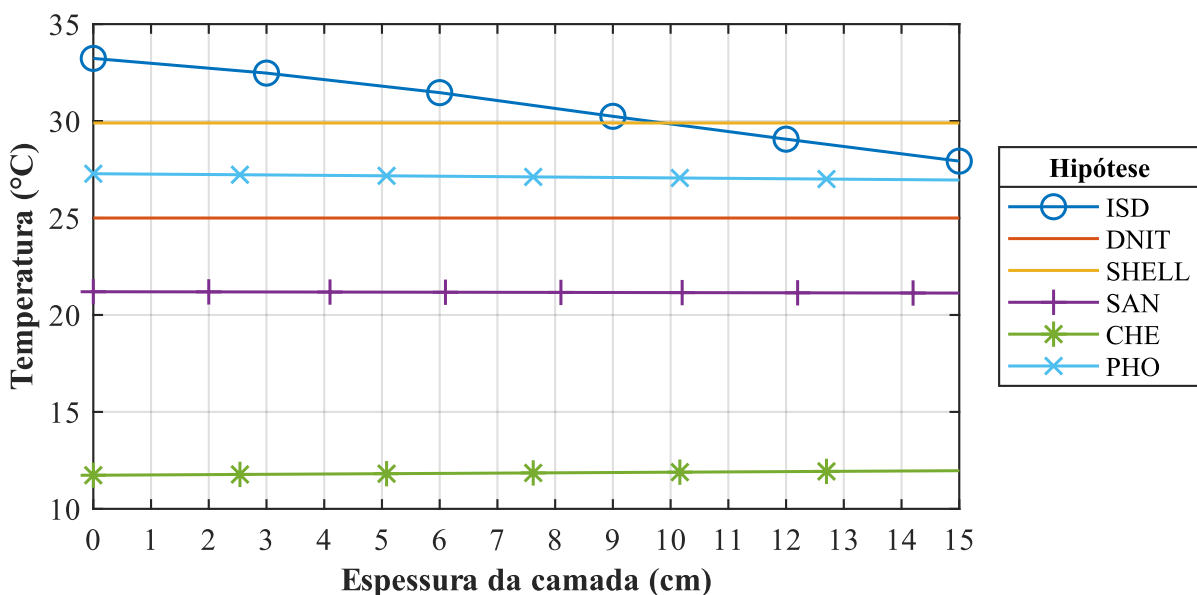
Fonte: Autor

A partir dos gráficos das hipóteses modeladas pelo EICM (SAN, CHE e PHO), fica evidente que as maiores temperaturas são verificadas na superfície da camada durante o dia

(principalmente em horários próximos de 15:00) e no fundo da camada durante a noite. Essa inversão pode ser explicada pelo atraso em que a energia térmica é dissipada em maiores profundidades, conforme comentado na seção 2.2.

Porém, ao analisar-se o gráfico da hipótese ISD (Figura 4.21), é perceptível que tal inversão não ocorre. Apesar de a temperatura ser sempre menor à noite considerando uma profundidade constante, as temperaturas na superfície são sempre superiores às que no fundo da camada de revestimento. Isso fica evidente na Figura 4.25, que mostra a média das temperaturas para cada hipótese ao longo de todas as horas do dia considerando diferentes espessuras para a camada de revestimento (média das temperaturas desde a superfície até o fundo da camada).

Figura 4.25 - Média das temperaturas para cada hipótese considerando diferentes espessuras de revestimento



Fonte: Autor

Percebe-se que as hipóteses SAN, CHE e PHO possuem uma média de temperaturas aproximadamente constante ao longo da profundidade devido à inversão das temperaturas comentada, ou seja, quando a temperatura da superfície está elevada, a temperatura no fundo do revestimento é mais baixa e vice-versa.

Como tal inversão não ocorre na hipótese ISD, a média da temperatura vai diminuindo com o aumento da profundidade e, conseqüentemente, com o aumento da espessura da camada.

Tal comportamento é atribuído ao processo de criação da hipótese ISD, conforme exposto na seção 3.1.1. Ao serem extrapoladas as temperaturas de Ijuí (após o processo de minoração), foram tomadas como referência as temperaturas medidas às 13:00 e às 16:00 ao longo de todas as profundidades. Contudo, a diferença relativa entre as temperaturas próximas à superfície e as temperaturas no fundo da camada é maior para a cidade de Ijuí do que para a cidade de San Diego.

Apesar das limitações apresentadas para essa hipótese, justifica-se a sua utilização na presente pesquisa pelo fato de não haver, até o presente momento, medições de temperatura em pavimentos na região central do RS a cada hora do dia e por um período de, pelo menos, um ano.

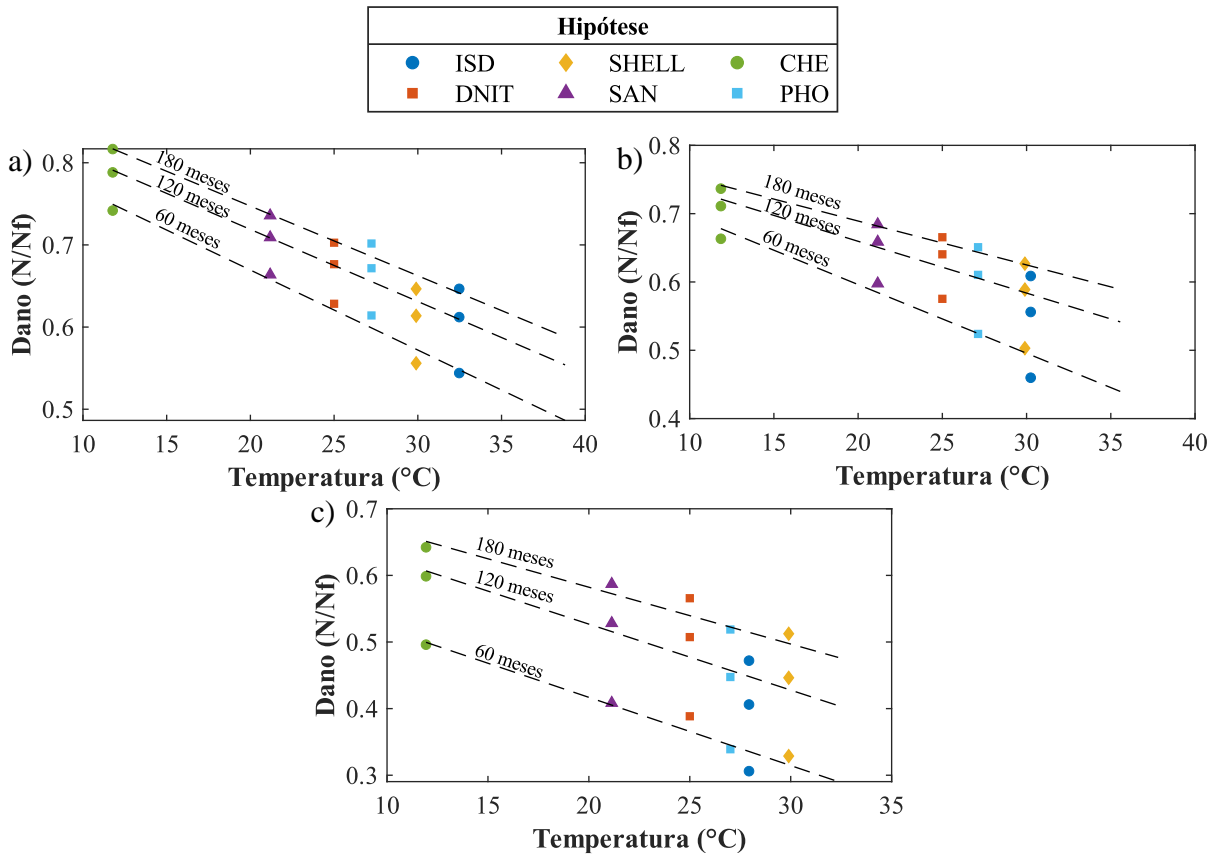
Além disso, ressalta-se, como limitação da hipótese ISD, a ausência de temperaturas medidas durante a noite. Com isso, não se tem acesso à oscilação noturna da temperatura do pavimento *in situ* nas condições climáticas em questão. Consequentemente, não se sabe quais são as temperaturas mínimas a que o pavimento pode chegar, o que impactaria na determinação do dano. Apesar disso, a distribuição do tráfego obtida pelo GEPPASV (Tabela 3.42) mostra como volume de tráfego é baixo em tal período (menos de 12% entre 0:00 e 6:00). Dessa forma, o período do dia em que foram realizadas as medições de temperatura é aquele mais crítico em termos de carregamento.

Na Figura 4.26, são exibidas as correlações entre as temperaturas médias de cada hipótese e a média do dano a 60, 120 e 180 meses para todas as misturas asfálticas consideradas. Na Tabela 4.1, estão os valores de R^2 obtidos para cada correlação.

Fica evidente que, para as condições de temperatura, estrutura de pavimento, materiais e tráfego considerados nas simulações HT, maiores temperaturas resultaram em menor dano, apresentando a tendência já observada nas simulações TC e comentada na seção 4.1.1.

Quanto ao *ranking* do dano das misturas abordadas, observou-se a mesma tendência das simulações TC, ou seja, as misturas com ligante convencional e a mistura CA-RAP30 apresentaram maior nível de dano, seguidas pelas misturas com adição de SBS e, com menos danificação, a mistura CA-BOR.

Figura 4.26 – Correlação entre a temperatura média e o dano médio a 60, 120 e 180 meses para cada hipótese de temperatura considerando a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento



Fonte: Autor

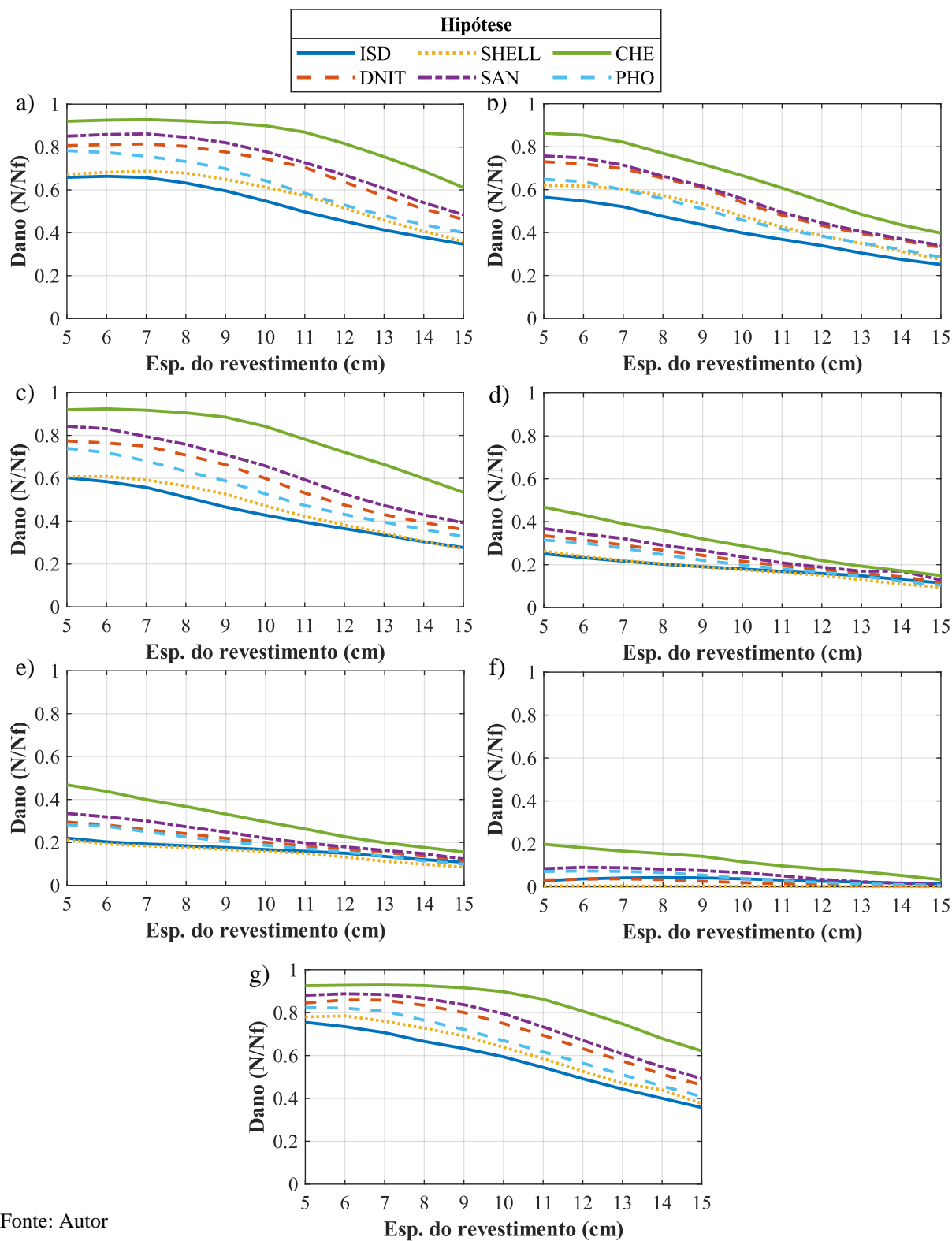
Tabela 4.1 – Coeficientes de correlação entre o dano médio e a temperatura média de cada hipótese

Tempo\Esp.	R ²		
	5 cm	10 cm	15 cm
60 meses	0,974	0,951	0,983
120 meses	0,972	0,961	0,956
180 meses	0,972	0,989	0,951

Fonte: Autor

Na Figura 4.27, está o dano a 24 meses obtido para diferentes espessuras (entre 5 e 15 cm). São mostrados os resultados para esse estágio inicial das simulações visto que, como foi comentado acerca das simulações TC, o pavimento ainda não rompeu por trincamento à fadiga.

Figura 4.27 - Dano a 24 meses para as misturas a) CA-50/70-HB, b) CA-50/70-U4, c) CA-50/70-U8, d) CA-SBS-U2, e) CA-SBS-U6, f) CA-BOR e f) CA-RAP30 considerando espessuras de revestimento entre 5 e 15 cm



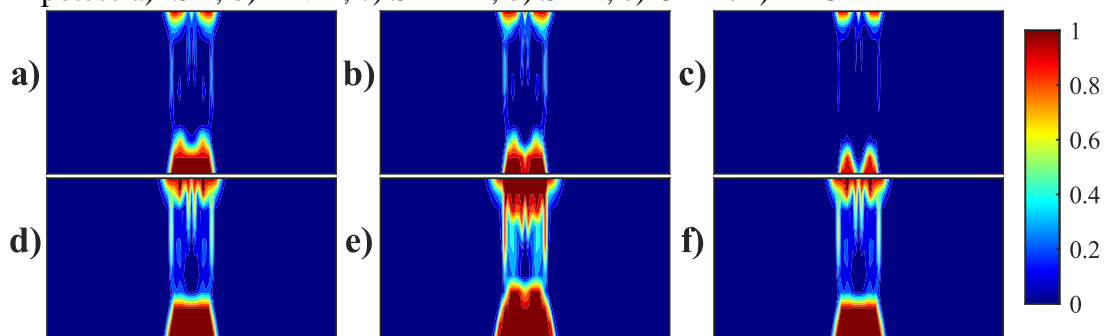
Fonte: Autor

A partir dos gráficos, percebe-se que o dano diminuiu, de forma geral, com o aumento da espessura da camada de revestimento, conforme esperado.

4.2.2 Tipo de fissuração

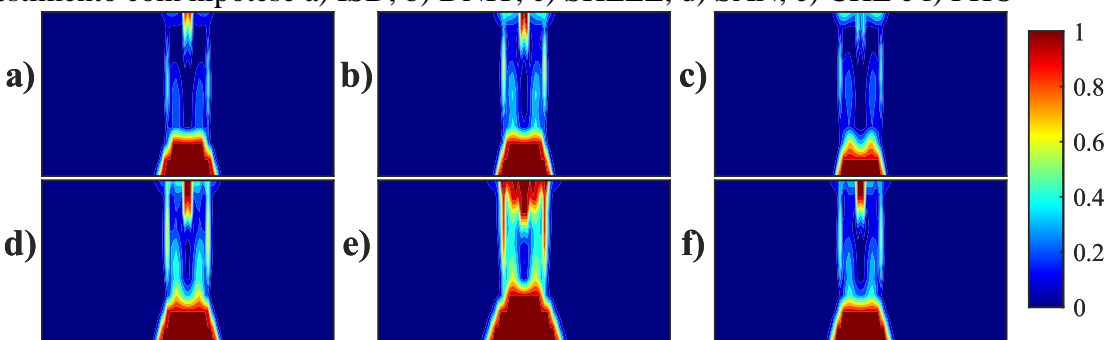
Da Figura 4.28 à Figura 4.39, estão os gráficos de contorno de dano para as misturas CA-50/70-HB, CA-SBS-U2, CA-BOR e CA-RAP30 considerando 5, 10 e 15 cm de espessura de revestimento, que resumem o comportamento observado por tipo de ligante. Foi selecionado o mês em cada caso de modo a facilitar a identificação do processo de fissuração, o que varia para cada combinação de mistura asfáltica e espessura de revestimento. Os gráficos de contorno para as demais misturas estão no Apêndice F.

Figura 4.28 - Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-HB a 1 mês e 5 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO



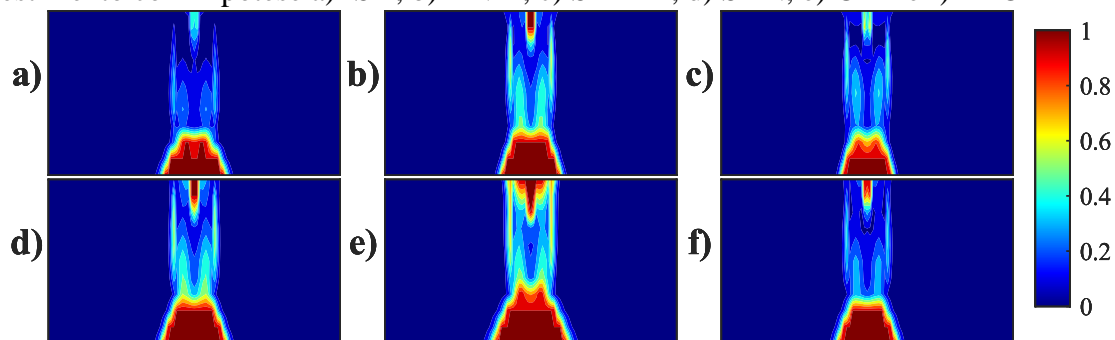
Fonte: Autor

Figura 4.29 - Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-HB a 6 meses e 10 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO



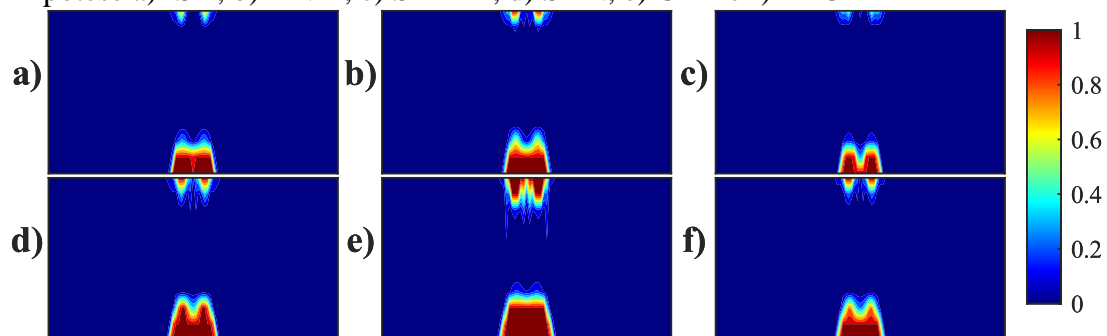
Fonte: Autor

Figura 4.30 - Distribuição do dano para a mistura CA-50/70-HB a 24 meses e 15 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO



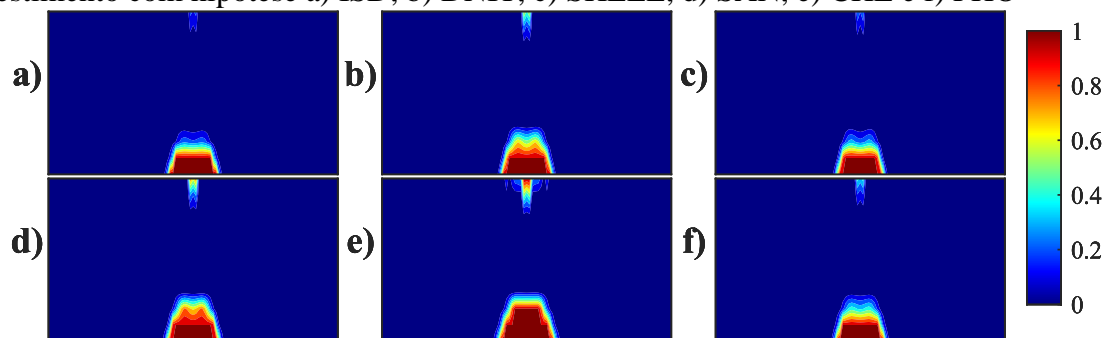
Fonte: Autor

Figura 4.31 - Distribuição do dano para a mistura CA-SBS-U2 a 6 meses e 5 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO



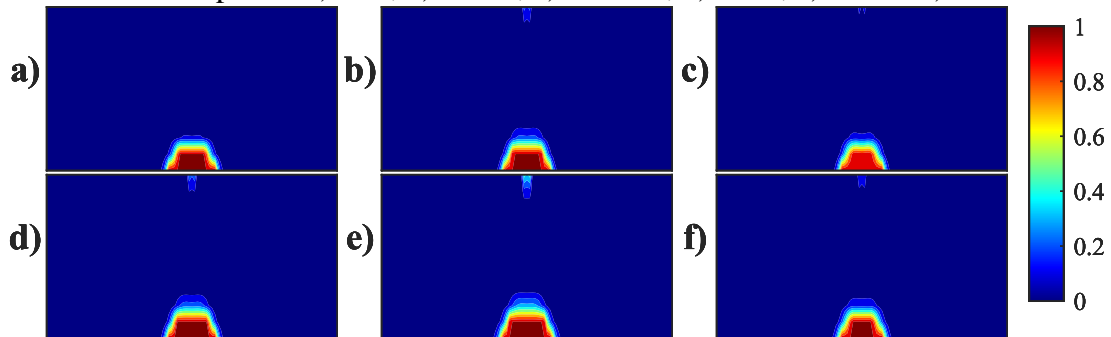
Fonte: Autor

Figura 4.32 - Distribuição do dano para a mistura CA-SBS-U2 a 24 meses e 10 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO



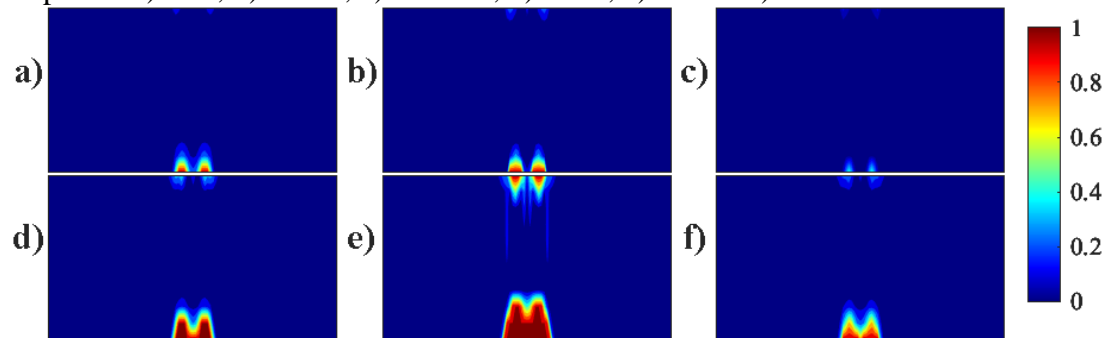
Fonte: Autor

Figura 4.33 - Distribuição do dano para a mistura CA-SBS-U2 a 60 meses e 15 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO



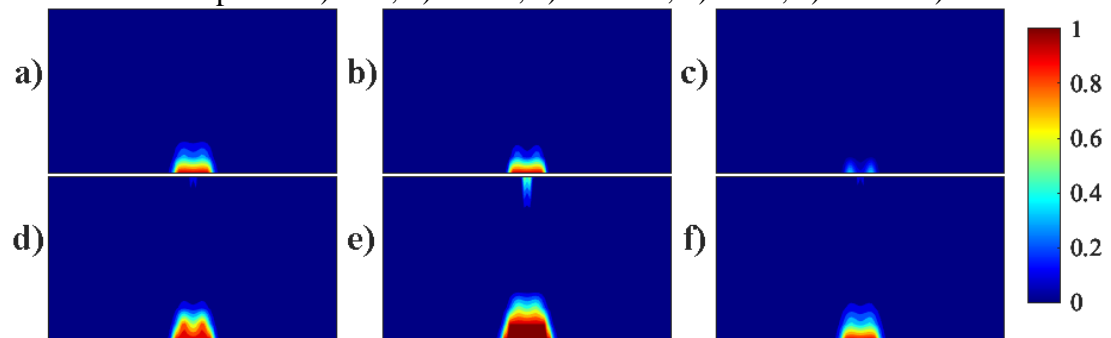
Fonte: Autor

Figura 4.34 - Distribuição do dano para a mistura CA-BOR a 120 meses e 5 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO



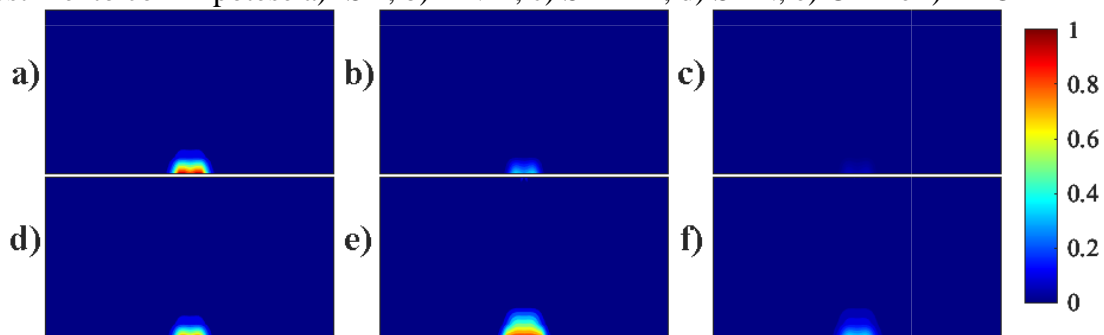
Fonte: Autor

Figura 4.35 - Distribuição do dano para a mistura CA-BOR a 180 meses e 10 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO



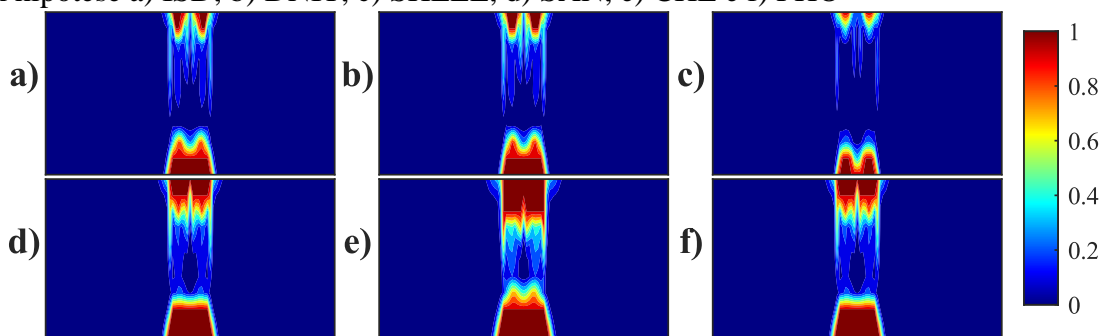
Fonte: Autor

Figura 4.36 - Distribuição do dano para a mistura CA-BOR a 180 meses e 15 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO



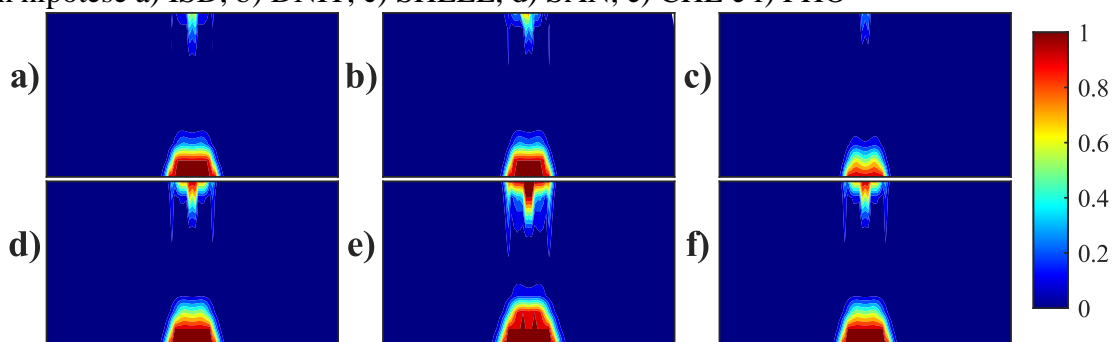
Fonte: Autor

Figura 4.37 - Distribuição do dano para a mistura CA-RAP30 a 1 mês e 5 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO



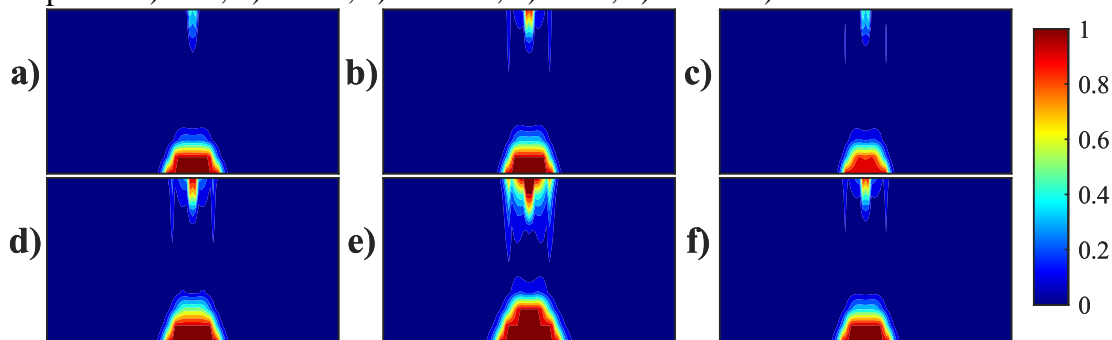
Fonte: Autor

Figura 4.38 - Distribuição do dano para a mistura CA-RAP30 a 1 mês e 10 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO



Fonte: Autor

Figura 4.39 - Distribuição do dano para a mistura CA-RAP30 a 6 meses e 15 cm de revestimento com hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO



Fonte: Autor

Todas as estruturas estudadas apresentaram danificação tanto na face inferior quanto na superior da camada de revestimento, salvo a mistura CA-BOR com 15 cm de revestimento, que apresentou apenas valores residuais de dano próximo da superfície.

Como também foi verificado nas simulações TC, as simulações com menores médias de temperatura apresentaram uma danificação mais intensa. Na maioria dos casos, fica evidente que a condição de temperatura que apresentou a maior área danificada na seção transversal foi a da hipótese CHE, enquanto as hipóteses ISD e SHELL, que têm as maiores médias térmicas, resultaram em uma danificação menos intensa.

Comparando as diferentes misturas, percebe-se a mesma tendência já apresentada nas simulações TC. As misturas com ligante convencional e a mistura CA-RAP30 foram as mais danificadas, seguidas das misturas com adição de SBS e, por último, a mistura CA-BOR. No caso dessa última, destaca-se que os gráficos apresentados são referentes a 120 ou 180 meses de simulação e, mesmo nesse nível de tráfego, praticamente não houve danificação.

Também se observa, em todas as simulações, que o dano evoluiu de forma mais precoce na face inferior do que na face superior da camada. Às fissuras do tipo *bottom-up*, é possível atribuir as causas já apresentadas na seção 4.2.2, a saber, as tensões de tração causadas pela flexão quando da passagem da carga móvel.

No caso do dano que evolui a partir da superfície (fissuras *top-down*), foi observado que, assim como já comentado na seção 4.1.2, temperaturas menores aumentam a tendência a esse tipo de fissuração.

4.2.3 Área trincada

Após a aplicação da função de transferência de Nascimento (2015), foram obtidos os resultados de AT ao longo do tempo para as simulações HT. Na Figura 4.40, estão os gráficos da evolução da AT ao longo do tempo para todas as misturas (excetuando a mistura CA-BOR, que não apresentou valores maiores que 1%) considerando 10 cm de espessura de revestimento. Assim como no caso das simulações TC, os valores de AT apresentados têm 95% de confiabilidade, utilizando o desvio padrão médio Z_p igual a 1,65. Para consultar o resumo da AT das simulações HT para todas as misturas, pode-se recorrer ao Apêndice G deste trabalho.

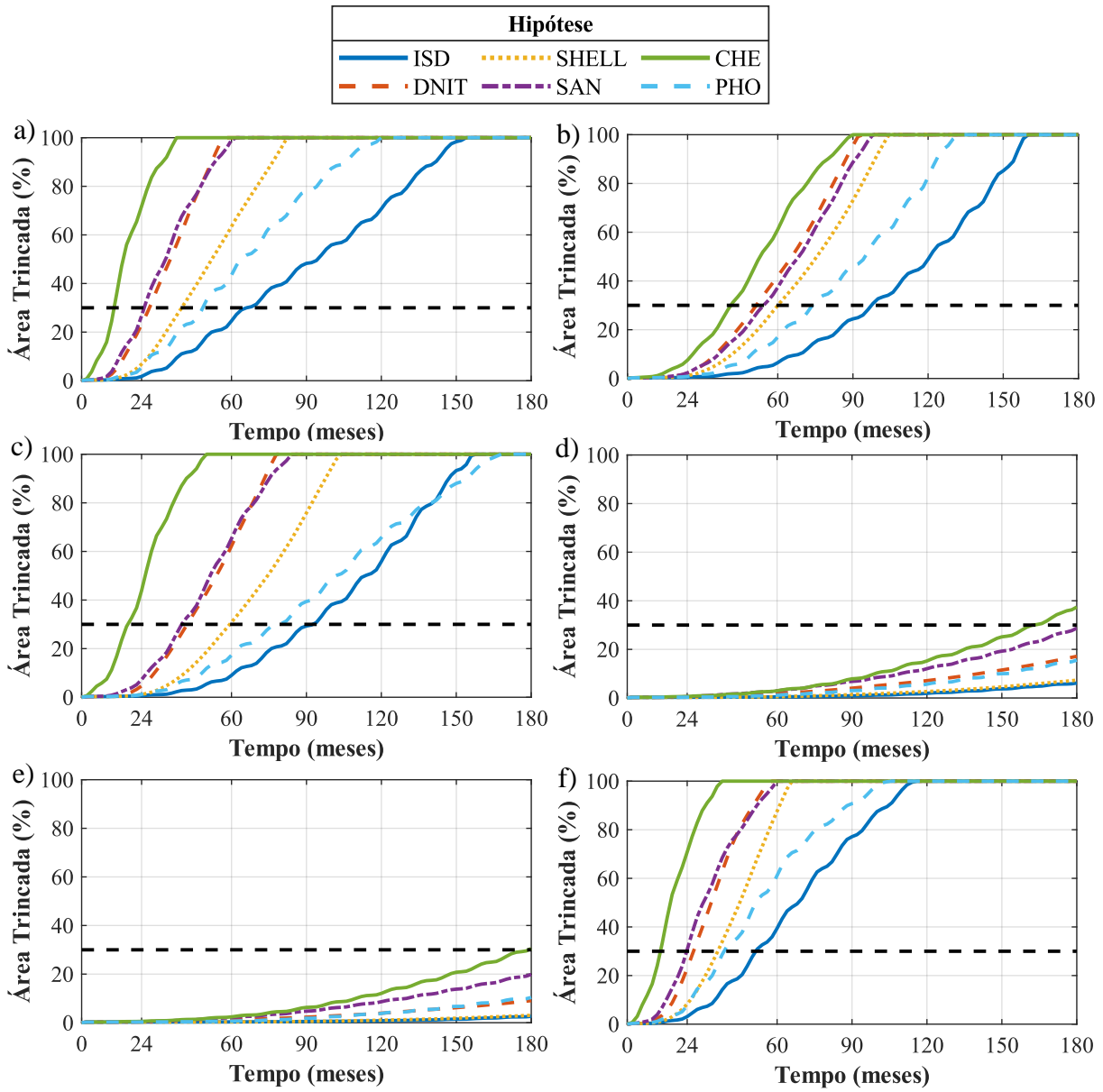
De maneira geral, foi observada uma relação inversa entre temperatura e AT, sendo a hipótese CHE aquela que gerou maior AT e a hipótese ISD a que gerou a menor.

Acerca da relação entre AT e espessura de revestimento, verificou-se algumas aparentes inconsistências no caso das misturas com adição de SBS (Figura 4.41). Como explicação, pode-se citar a própria natureza da função de transferência. Combinando as Equações (2.46), (2.47) e (2.48) e substituindo os valores dos coeficientes de deslocamento A e B e dos coeficientes da função C_1 e C_2 , chega-se à Equação (4.1).

A partir da Equação (4.1), percebe-se que a AT é função tanto do dano quanto do parâmetro $T_{0,35}$, de modo que o aumento de um desses parâmetros, mantendo o outro constante, resulta em um aumento da AT. Essa tendência se verifica mesmo após a aplicação do critério de confiabilidade da Equação (2.49), visto que o erro padrão S_e também cresce com o aumento do dano reduzido, conforme a Equação (2.50).

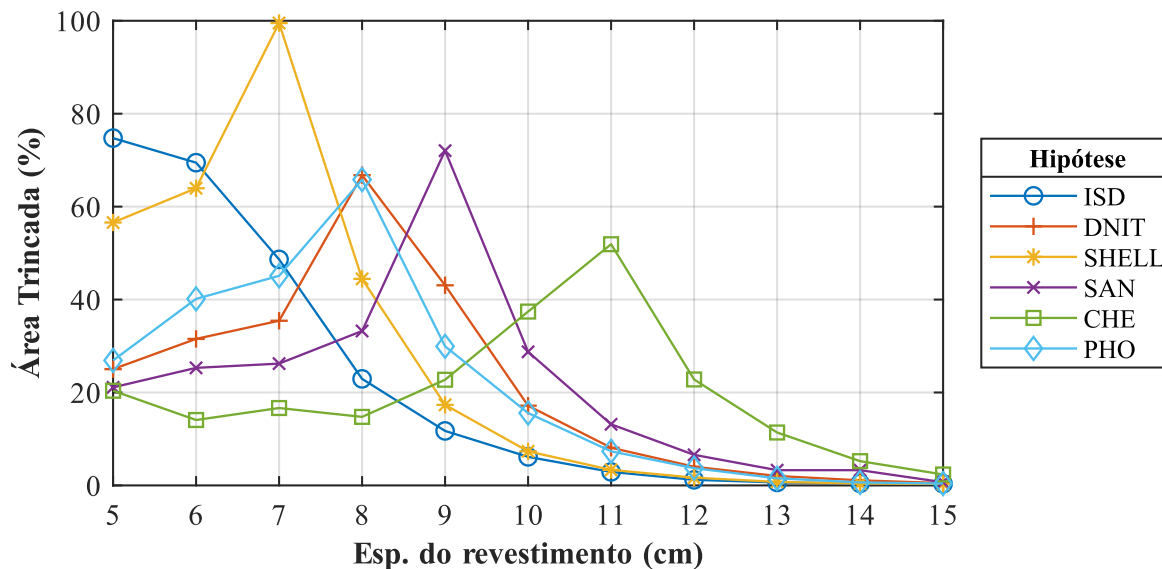
No caso de simulações cuja danificação cresce muito rápido (menores temperaturas e menores espessuras de revestimento), o valor de $T_{0,35}$ é minorado e, por consequência, a AT também será. De maneira inversa, situações em que $T_{0,35}$ apresentou maiores valores e o dano evoluiu mais tardiamente, tiveram uma majoração da AT.

Figura 4.40 - Evolução temporal da AT para as misturas a) CA-50/70-HB, b) CA-50/70-U4, c) CA-50/70-U8, d) CA-SBS-U2, e) CA-SBS-U6 e f) CA-RAP30 considerando 10 cm de revestimento



Fonte: Autor

Figura 4.41 - AT a 180 meses para a mistura CA-SBS-U2 considerando espessuras de revestimento entre 5 e 15 cm



Fonte: Autor

$$AT = 7272,68 \times \left[\frac{N}{N_f} \times (0,008274 \times T_{0,35} + 0,635237) \right]^{8,6629} \quad (4.1)$$

Em que:

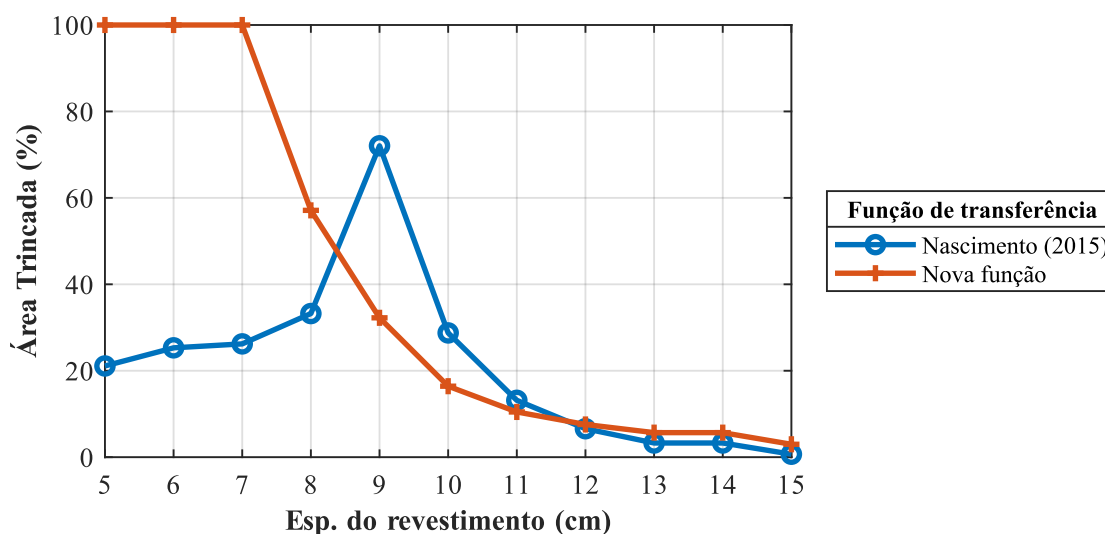
AT = área trincada (%);

N/N_f = dano;

$T_{0,35}$ = tempo em que o dano é igual a 0,35 (meses).

Contudo, a título de informação, tais supostas inconsistências verificadas em a partir de $T_{0,35}$ foram corrigidas em uma nova função de transferência repassada por Luís Alberto Herrmann do Nascimento em palestra proferida no dia 16/08/2021 ao grupo GEPPASV, após a arguição da banca desta pesquisa. Na nova função, não há a transformação do dano em dano reduzido por meio do fator $T_{0,35}$. Sendo assim, valores maiores de dano sempre correspondem a maiores valores de AT prevista. Na Figura 4.42, para exemplificar, são comparadas as AT previstas a 180 meses por ambas as funções para a mistura CA-SBS-U2 considerando a hipótese SAN e diferentes espessuras de revestimento.

Figura 4.42 – AT prevista a 180 meses a partir das duas funções de transferência considerando mistura CA-SBS-U2, hipótese SAN e diferentes espessuras de revestimento



Fonte: Autor

Percebe-se que, na função de Nascimento (2015), a sensibilidade do parâmetro $T_{0,35}$ leva a um valor de pico na relação entre AT e espessura, o que vai contra o esperado. Por outro lado, a nova função resulta em duas mudanças no gráfico da Figura 4.42. A primeira é que a AT sempre diminui com o aumento da espessura de revestimento e a segunda é que espessuras menores resultam em uma AT prevista muito mais elevada. Dessa forma, foi corrigida a aparente inconsistência observada na função de transferência anterior.

Na Figura 4.43, estão os resultados da vida à fadiga correspondente a 30% de AT. No caso das misturas com adição de SBS e da mistura CA-BOR, como tiveram menores valores de AT, foram feitas simulações adicionais com tráfego de 5×10^9 solicitações ao longo de 180 meses da mesma forma como foi comentado na seção 4.1.3.

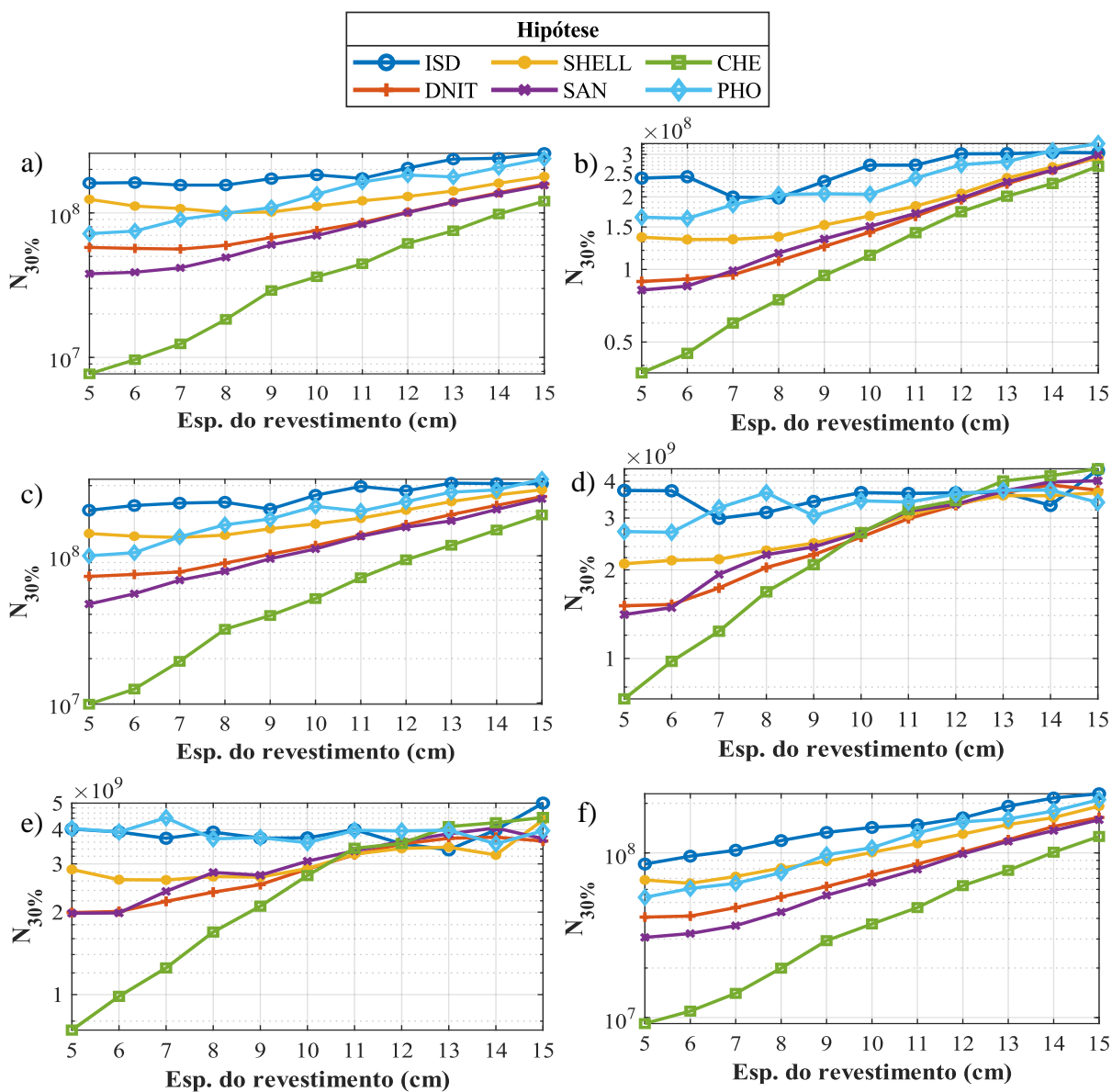
Destaca-se que, mesmo considerando um tráfego mais pesado, a mistura CA-BOR não atingiu em praticamente nenhum caso o limite de 30% de AT, razão pela qual seu gráfico não é apresentado aqui. Como foi abordado nas simulações TC, não foram simulados maiores níveis de tráfego para essa mistura por fugirem muito do volume de tráfego verificado em campo.

Analisando os resultados obtidos para as demais misturas, percebe-se que houve “ruídos” nos gráficos das misturas com adição de SBS pelos mesmos motivos que geraram inconsistências na AT dos mesmos materiais.

No caso das misturas com ligante 50/70 e da mistura CA-RAP30, verificou-se que, em geral, foi verificada uma relação direta entre a temperatura adotada e a vida à fadiga. Ou seja, a adoção de uma condição de temperatura majorada resultou em aumento da vida à fadiga do

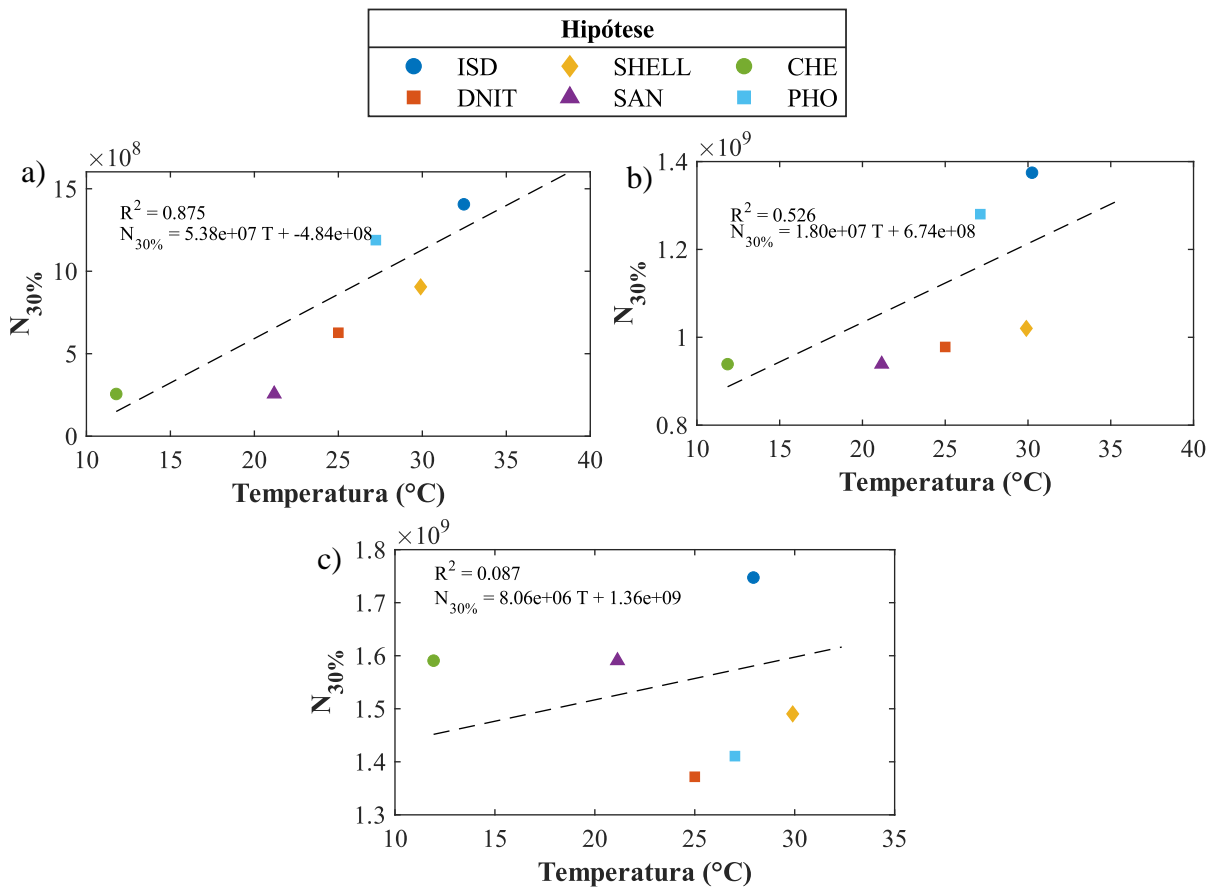
pavimento. Na Figura 4.44, estão as correlações entre as temperaturas médias de cada hipótese e a vida à fadiga média para as diferentes misturas (com exceção da mistura CA-BOR). Comenta-se que a temperatura média foi calculada levando em consideração os pontos localizados entre a superfície do revestimento e a espessura em cada caso. Por exemplo, considerando 5 cm de revestimento, foram consideradas as temperaturas medidas até essa profundidade no caso das hipóteses com temperatura variável (ISD, SAN, CHE e PHO).

Figura 4.43 - Vida à fadiga correspondente à AT de 30% para a mistura CA-50/70-HB considerando diferentes espessuras e hipóteses de temperatura



Fonte: Autor

Figura 4.44 - Correlação entre a temperatura média e a vida à fadiga considerando a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento

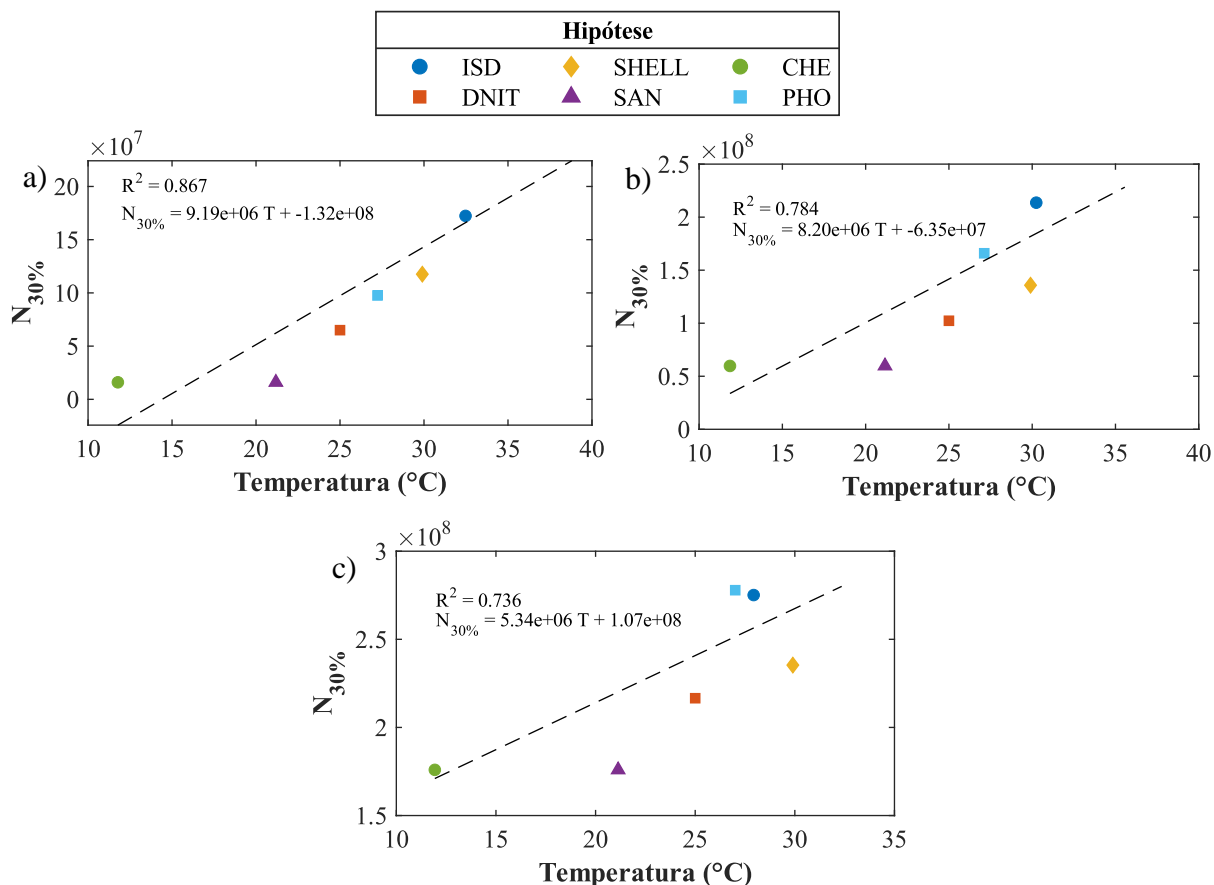


Fonte: Autor

Assim como foi observado no caso do dano (seção 4.2.1), o coeficiente de correlação diminui com o aumento da espessura de revestimento. Observa-se que as correlações para 10 e 15 cm foram bem inferiores à correlação para 5 cm. Contudo, pode-se explicar tais dispersões nos resultados às inconsistências verificadas na AT das misturas com adição de SBS. Caso elas fossem desconsideradas na correlação, os valores de R2 considerando 5, 10 e 15 cm de revestimento seriam, respectivamente, de 0,867; 0,784 e 0,736 (Figura 4.45).

Por fim, foram obtidas as espessuras admissíveis de revestimento para cada combinação de hipóteses de temperatura e misturas asfálticas (Figura 4.46). Não são exibidos os resultados referentes às misturas com adição de SBS e a mistura CA-BOR porque, em todos os casos, a espessura admissível coincide com a espessura mínima (5 cm).

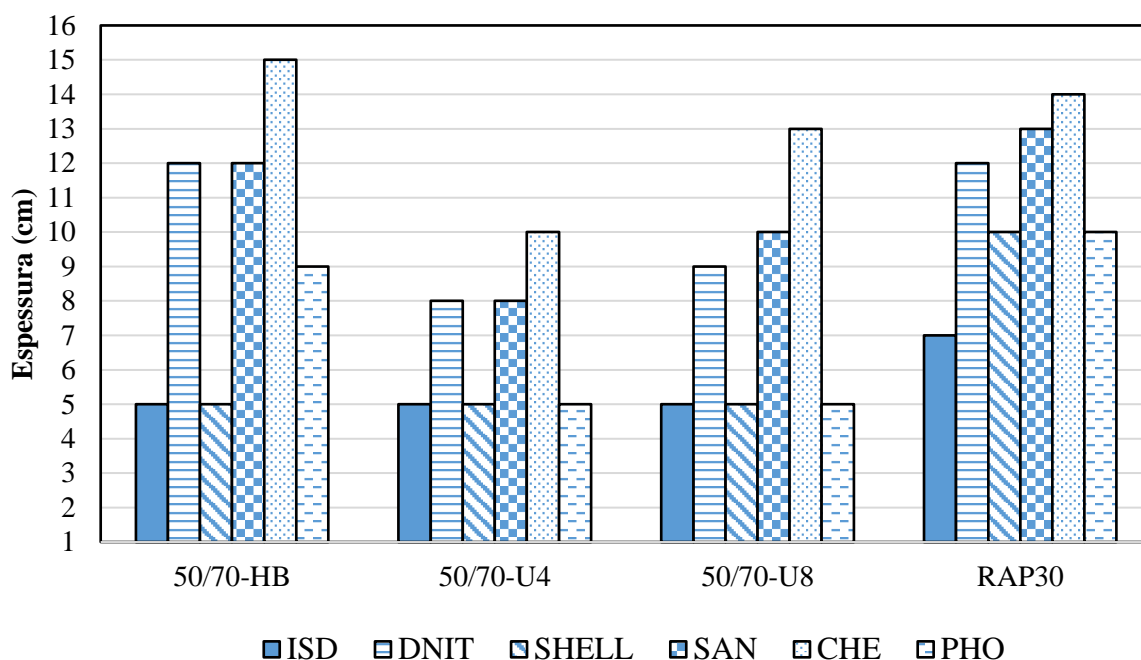
Figura 4.45 - Correlação entre a temperatura média e a vida à fadiga considerando a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento para as misturas com ligante convencional e mistura CA-RAP30



Fonte: Autor

A Figura 4.46 mostra que, para as misturas com ligante convencional e a mistura CA-RAP30, a hipótese de temperatura que resultaram em uma maior espessura admissível foi a hipótese CHE, seguida pela hipótese SAN e pela hipótese DNIT. Por outro lado, as hipóteses ISD e SHELL, com as maiores médias térmicas, resultaram em espessura mínima para todas as misturas com ligante convencional. Desse modo, fica evidente a influência da temperatura no processo de dimensionamento proposto na presente considerando as misturas com ligante convencional e a mistura RAP30.

Figura 4.46 – Espessuras admissíveis para as misturas com ligante convencional e a mistura CA-RAP30



Fonte: Autor

No caso das misturas com adição de SBS e da mistura CA-BOR, ainda que as diferentes hipóteses de temperatura não tenham resultado em mudança alguma na espessura admissível do revestimento para o tráfego escolhido, tais materiais estão inclusos na etapa de análise econômica. Dessa maneira, mesmo que não seja possível analisar a influência da temperatura na relação entre custo e benefício de pavimentos com tais misturas, pode-se realizar uma comparação de custo entre os diferentes materiais.

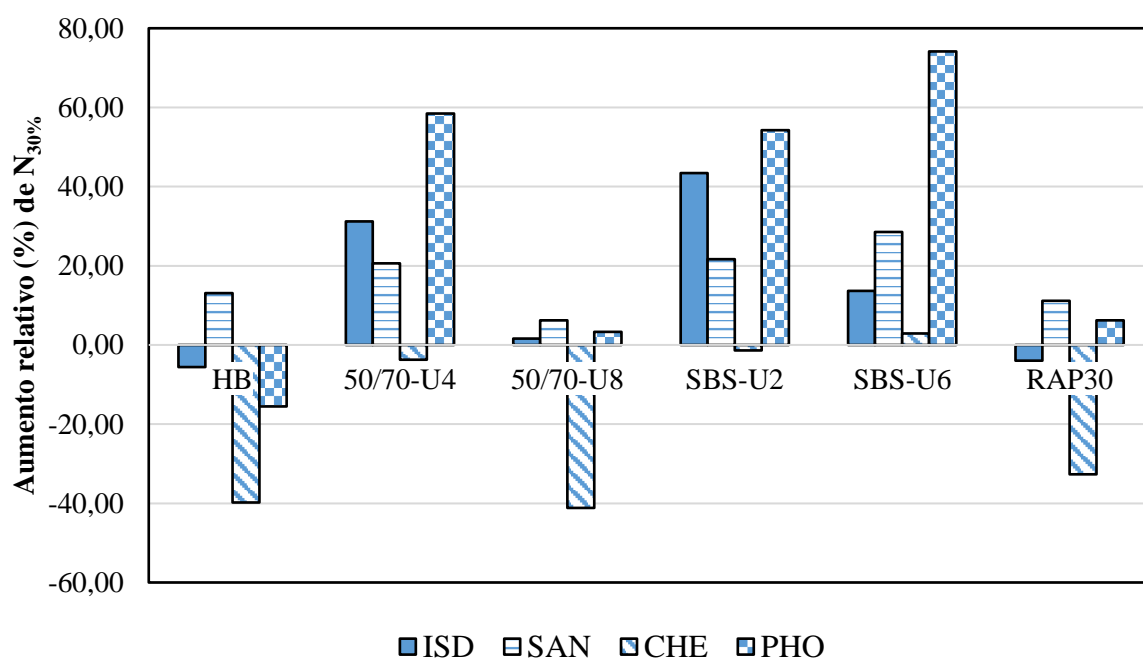
4.2.3.1 Influência da variação de temperatura

Além das análises citadas, também foi investigada a influência da variação da temperatura na vida à fadiga, visando compreender se medições contínuas de temperatura ao longo do ano e a diferentes profundidades exercem um impacto considerável na previsão de desempenho em relação à hipótese de temperatura constante.

Para alcançar tal objetivo, foi simulado o desempenho do pavimento considerando a média das temperaturas de cada uma das 4 hipóteses em que há variação de temperatura (ISD, SAN, CHE e PHO) para cada uma das misturas asfálticas, considerando 3 espessuras de

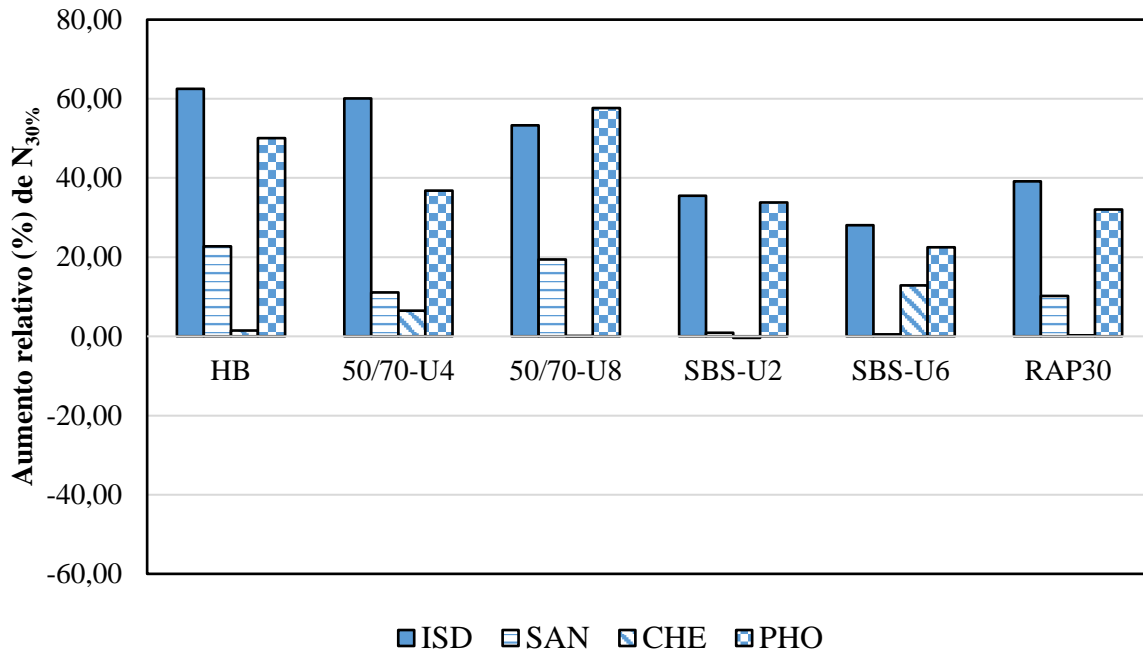
revestimento (5, 10 e 15 cm) e o mesmo tráfego adotado nas simulações HT. Como resultado, foram obtidas as variações relativas entre a vida à fadiga obtida com cada hipótese e sua respectiva temperatura média (ao longo da profundidade e do tempo), conforme mostrado na Figura 4.47, Figura 4.48 e Figura 4.49. Observa-se que valores positivos denotam um aumento da vida à fadiga ao se considerar a variação de temperatura e vice-versa.

Figura 4.47 Variação relativa da vida à fadiga considerando 5 cm de revestimento



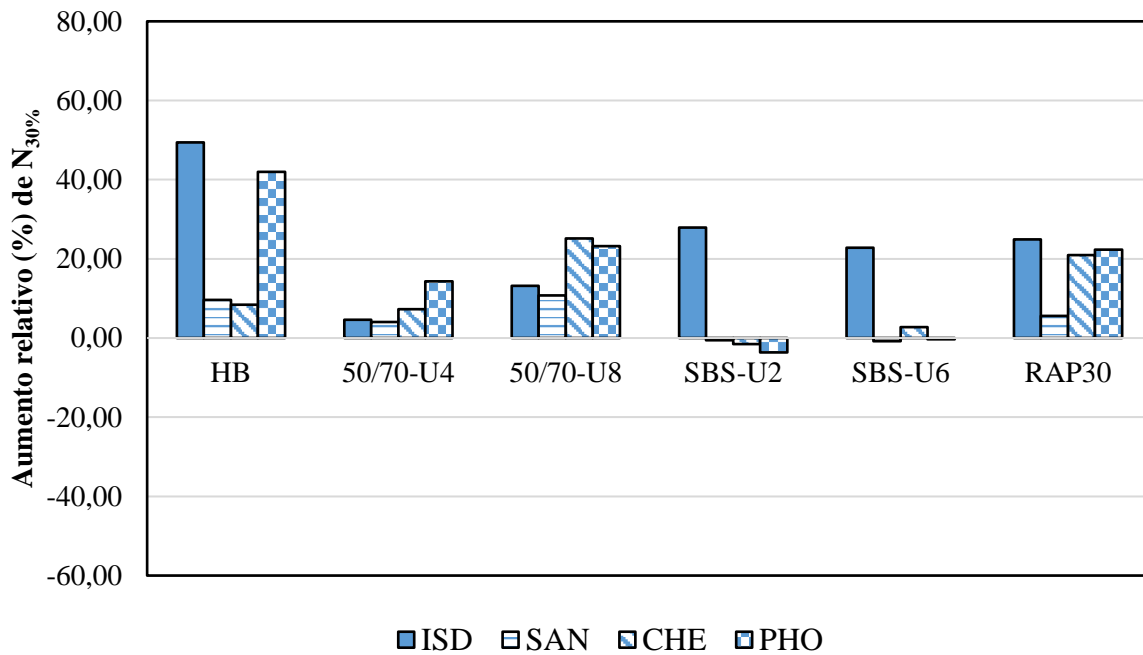
Fonte: Autor

Figura 4.48 Variação relativa da vida à fadiga considerando 10 cm de revestimento



Fonte: Autor

Figura 4.49 Variação relativa da vida à fadiga considerando 15 cm de revestimento



Fonte: Autor

Percebe-se que a consideração das variações de temperatura diárias, sazonais e ao longo da profundidade impacta consideravelmente, em alguns casos, a previsão da vida à fadiga considerando o critério de 30% de AT. Variações relativas de vida à fadiga mais de 60% foram observadas em algumas simulações, como, por exemplo, considerando a mistura CA-SBS-U6 com 5 cm. Como consequência, caso se tratasse de um dimensionamento real, poder-se-ia estar subdimensionando o pavimento (no caso de essa variação relativa da vida à fadiga ser negativa) ou superdimensionando (no caso de ser positiva).

Tais resultados estão em concordância com o achado por Lu et al. (2013). Ainda que os autores não tenham realizado comparações usando a vida à fadiga, chegaram à conclusão de que o dano por fadiga é previsto com mais acurácia quando são consideradas as variações da temperatura do pavimento ao longo do tempo.

Ressalta-se a importância de tais análises pelo fato de que tais variações na temperatura são obtidas mediante instalação de sensores em trechos experimentais (como na pesquisa de Blass (2011), por exemplo) ou por meio de modelagens computacionais a partir de dados climáticos (como é o caso do EICM). A partir dos resultados obtidos, fica evidente que tais pesquisas são fundamentais para o processo de dimensionamento de pavimentos asfálticos considerando a modelagem viscoelástica.

4.2.4 Síntese das análises

Pode-se resumir o que foi apresentado nas análises das simulações HT nos seguintes tópicos:

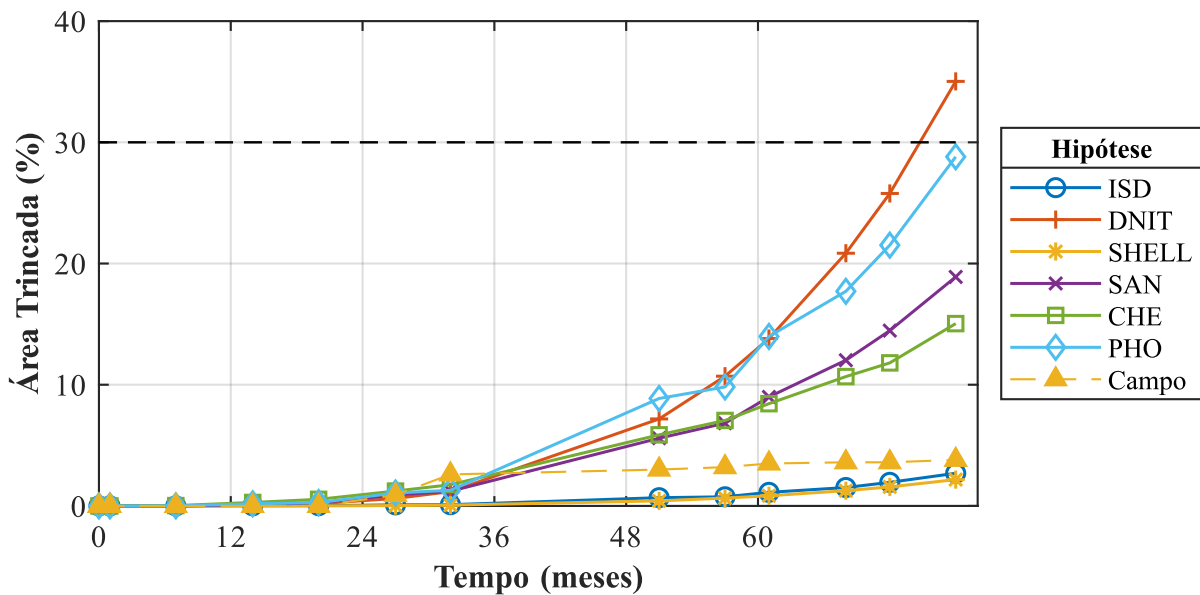
- a) Houve correlações significativas entre a média das temperaturas de cada hipótese e o dano por fadiga;
- b) Observou-se o mesmo *ranking* de dano das simulações TC, ou seja, a mistura CA-BOR teve a menor danificação, seguida das misturas com adição de SBS, as misturas com ligante convencional e a mistura CA-RAP30;
- c) Também foi observada a mesma tendência de maior danificação na face inferior do revestimento, caracterizando fissuras do tipo *bottom-up*;

- d) Houve razoável correlação entre a temperatura e a vida à fadiga considerando as misturas com ligante convencional e a mistura CA-RAP30;
- e) A consideração da variação de temperatura alterou a vida à fadiga em até 60% em comparação com a respectiva temperatura média;

4.3 SIMULAÇÕES CC

Segue, na Figura 4.50, a AT prevista a partir das simulações CC, utilizando a estrutura e tráfegos originais do trecho HB com 50% de confiabilidade (a explicação desse critério está na seção 3.5). No Apêndice H, está a AT das simulações CC em formato de tabela.

Figura 4.50 – Evolução temporal da AT do trecho HB medida em campo e prevista pela função de Nascimento (2015) com 50% de confiabilidade



Fonte: Autor

Comenta-se, primeiramente, que a AT observada no trecho HB até o 78º mês apresentou valores muito reduzidos (inferiores a 4%). Devido a isso, não é ainda possível determinar a vida à fadiga do trecho a partir do critério de 30% de AT. A partir da Figura 4.50, pode-se perceber que as hipóteses que resultaram nas previsões mais precisas foram ISD e SHELL, que apresentaram diferenças relativas de AT a 78 meses de 29% e 43%, respectivamente, em relação a AT medida em campo no mesmo período.

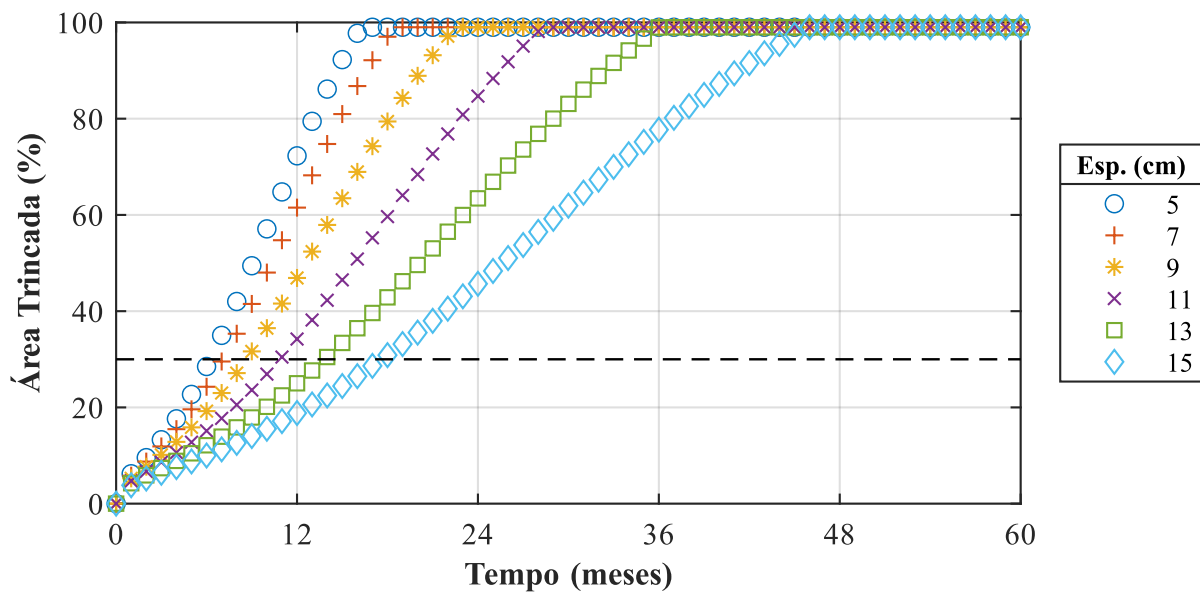
Além disso, verifica-se também que apenas essas duas hipóteses tiveram um comportamento, em geral, semelhante ao medido em campo, visto que a AT *in situ* ainda não teve acréscimos acentuados até 78 meses. No caso das demais hipóteses, inclusive a hipótese SAN, percebe-se que há uma superestimativa da AT e, no caso da hipótese DNIT, o limite de 30% foi atingido no tempo da medição mais recente. Ou seja, as hipóteses que estimam a temperatura da região central do estado (uma com temperatura variável e a outra com temperatura constante) foram as que resultaram na melhor previsão de AT.

É necessário fazer a ressalva de que tais resultados se aplicam somente ao trecho HB. Para que fosse verificada qual hipótese de temperatura gera uma melhor previsão de AT para a cidade de Santa Maria, seria preciso fazer a mesma análise aqui apresentada para outros trechos monitorados.

4.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO MEDINA

Após serem realizadas as simulações de desempenho do trecho HB com a mistura original (CA-50/70-HB) por intermédio do MeDiNa, foram obtidos os resultados de AT apresentados na Figura 4.51, onde são exibidos apenas os primeiros 60 meses de vida do pavimento para melhorar a visualização. Como foi abordado na seção 3.6, não foram feitas simulações no MeDiNa com as outras misturas asfálticas estudadas por não haver resultados de ensaios de fadiga à compressão diametral (que são dados de entrada do MeDiNa) para esses materiais até o presente momento.

Figura 4.51 - Evolução temporal da AT obtida pelo MeDiNa para a mistura CA-50/70-HB considerando diferentes espessuras de revestimento



Fonte: Autor

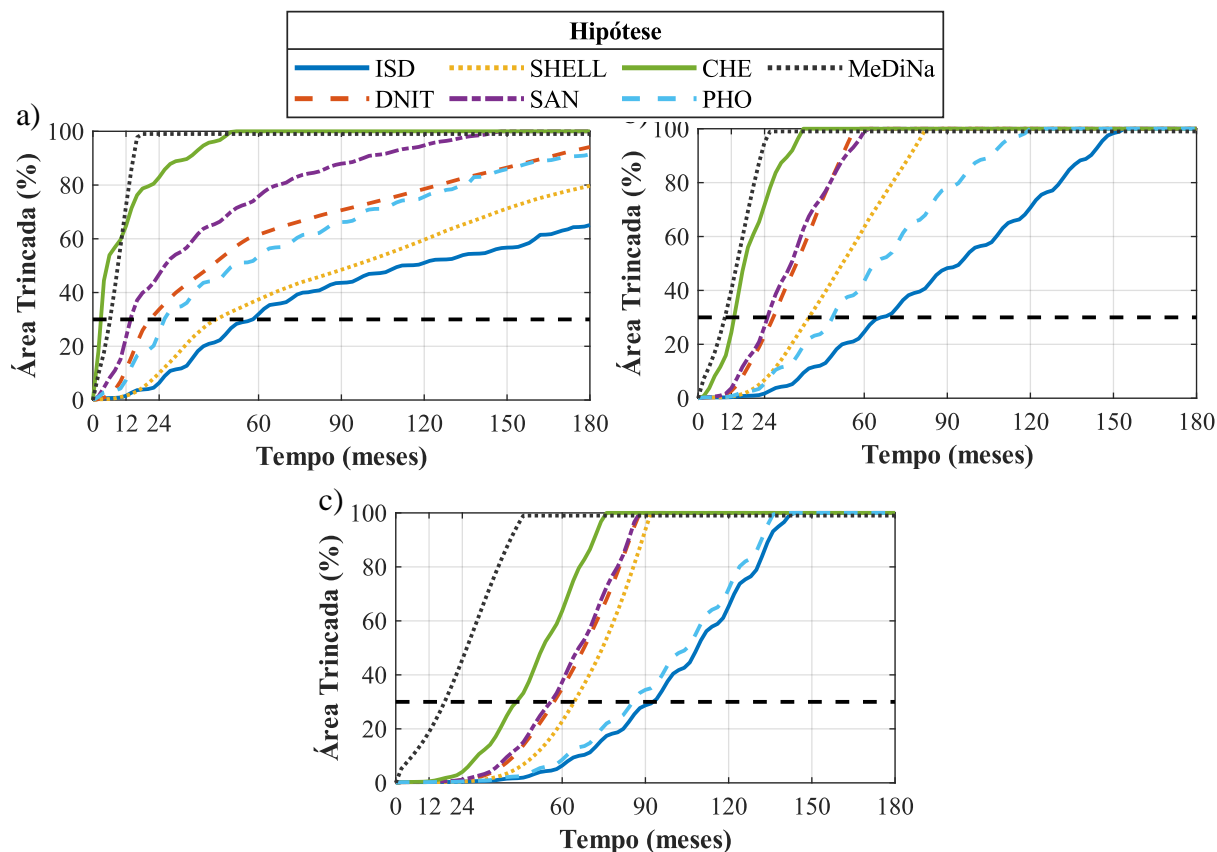
A Figura 4.51 não mostrou nenhuma aparente inconsistência na relação entre espessura e AT, isto é, quanto mais espessa a camada de revestimento, mais tardiamente evoluiu o trincamento por fadiga.

Na Figura 4.52, é comparada a AT obtida pelo FlexPAVE™ nas simulações HT e pelo MeDiNa para 5, 10 e 15 cm de espessura.

Observa-se que a AT obtida pelo MeDiNa atingiu o limite de 30% mais rapidamente que a AT obtida pela função de transferência de Nascimento (2015) utilizando as diferentes hipóteses de temperatura propostas, a não ser no caso da hipótese CHE com 5 cm de revestimento.

É importante relembrar que, como foi abordado na seção 3.5, o nível de confiabilidade adotado para a aplicação da função de transferência de Nascimento (2015) foi de 95%. Esse é o mesmo critério considerado nas simulações do MeDiNa para vias do tipo Sistema Arterial Primário, que foi a opção adotada nessa pesquisa.

Figura 4.52 - Evolução temporal da AT obtida pelo MeDiNa e pelo FlexPAVE™ para a mistura CA-50/70-HB considerando a) 5 cm, b) 10 cm e c) 15 cm de revestimento

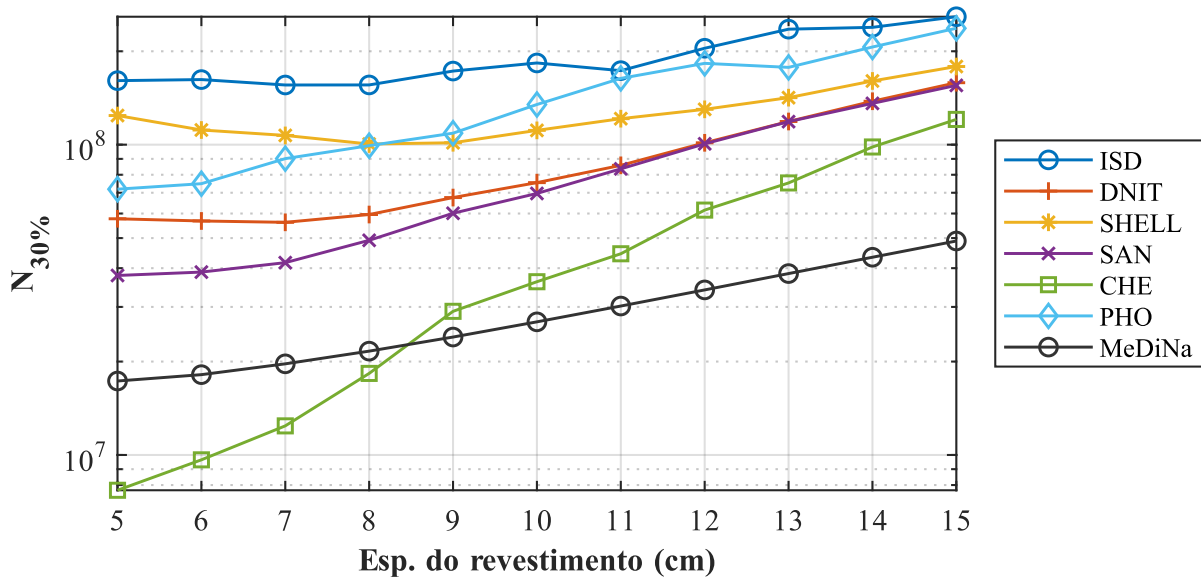


Fonte: Autor

Como também já foi comentado, a função de transferência de Fritzen (2016), integrada ao MeDiNa, leva em consideração o protocolo de ensaio de fadiga à tração diametral, cuja temperatura padrão de ensaio é 25 °C. Dessa maneira, as discrepâncias entre os resultados obtidos pelo MeDiNa e pela função de transferência de Nascimento (2015) considerando a hipótese DNIT (temperatura constante de 25 °C) se devem às diferenças nos protocolos de ensaio considerados em ambos os casos, visto que, no protocolo VECD, o ensaio de fadiga é homogêneo e, no protocolo usado no MeDiNa, é não-homogêneo. Como comentado na seção 2.4.2, ensaios não-homogêneos requerem soluções estruturais para se obter a resposta mecânica do material, ao passo que tal tapa não é necessária em ensaios homogêneos.

Na Figura 4.53, está a vida à fadiga obtida pelo MeDiNa para cada espessura de revestimento simulada. Foram plotadas também as vidas de fadiga obtidas pelo FlexPAVE™ para as diferentes hipóteses de temperatura (conforme Figura 4.43) para fins de comparação.

Figura 4.53 - Vida à fadiga obtida pelo MeDiNa e pelo FlexPAVE™ correspondente à AT de 30% para a mistura CA-50/70-HB considerando diferentes espessuras de revestimento



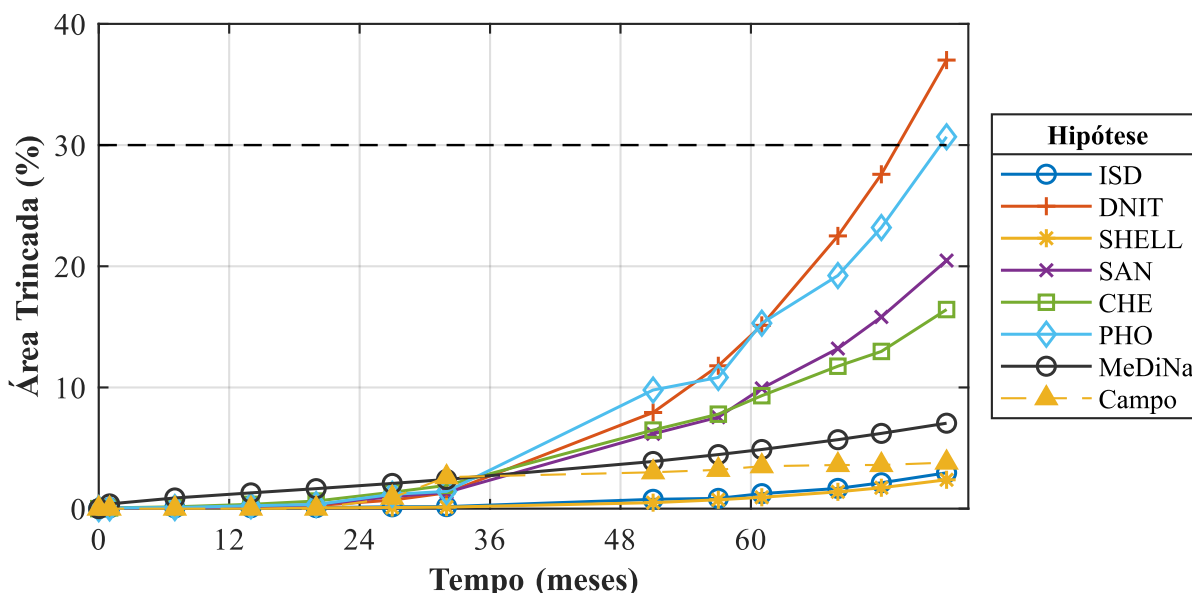
Fonte: Autor

Na Figura 4.53, percebe-se que a vida à fadiga (em escala logarítmica) obtida pelo MeDiNa cresce praticamente de forma linear com o aumento da espessura de revestimento. Tal resultado também vai ao encontro do esperado, visto que estruturas mais robustas tendem a oferecer uma maior vida útil ao pavimento.

Percebe-se também que a vida à fadiga obtida pelo MeDiNa é menor do que a obtida pelo do FlexPAVE™ em todas as simulações, com exceção da hipótese CHE com espessura de revestimento entre 5 e 8 cm. Devido a isso, não foi possível adotar um mesmo valor de N para o dimensionamento utilizando ambas as abordagens, visto que ou a estrutura (mesmo com 15 cm de revestimento) não atenderia à demanda no caso do MeDiNa ou resultaria na espessura mínima para todas as hipóteses de temperatura no caso do FlexPAVE™. Sendo assim, na etapa de análise econômica, foram obtidas as relações custo/N para cada espessura simulada no MeDiNa, sem ser adotada uma espessura admissível (espessura mínima de revestimento que atenda ao critério de falha proposto com o nível de tráfego em questão).

Por fim, também foram realizadas simulações com a estrutura e tráfego reais do trecho HB, com o objetivo de comparar os resultados com as simulações CC. A AT obtida pelos dois programas está na Figura 4.54. Para que o mesmo critério de confiabilidade fosse adotado em ambos (65%), foi utilizado na Equação (2.49) o valor de 0,4 para Z_p .

Figura 4.54 - Evolução temporal da AT obtida pelo MeDiNa e pelo FlexPAVE™ considerando estrutura e tráfego reais do trecho HB



Fonte: Autor

Da Figura 4.54, depreende-se que os comentários relativos às simulações do FlexPAVE™ da seção 4.3 se mantêm, ou seja, as hipóteses ISD e SHELL foram as que se resultaram em previsões mais próximas com as medições (diferenças relativas de 22% e 37%, respectivamente a 78 meses). A AT prevista pelo MeDiNa, apesar de ser 86% maior do que o medido em campo aos 78 meses, apresenta uma tendência de relativa estabilidade até o 78º mês, assim como as duas hipóteses citadas. Além disso, comenta-se que a AT prevista pelo MeDiNa poderia se aproximar mais ainda do valor de campo com o critério de confiabilidade de 50%.

Com isso, pode-se dizer que tanto a função de transferência de Nascimento (2015), utilizando as hipóteses de temperatura ISD e SHELL, como a função de Fritzen (2016), por meio do MeDiNa, apresentaram previsões razoáveis de AT para o trecho HB até o tempo disponível. Entretanto, como já foi destacado, tais comentários são válidos somente para o trecho em questão e com as condições de tráfego analisadas.

4.5 ANÁLISE ECONÔMICA

A partir dos quantitativos e custos expostos na seção 3.7, foram calculados os custos diretos por quilômetro dos serviços de terraplenagem, pavimentação e sinalização, conforme a Tabela 4.2, tendo como base os custos do estado do Rio Grande do Sul do mês de janeiro de 2021. Conforme foi exposto naquela seção, o custo da pavimentação possui uma parcela variável em função da espessura de revestimento e do tipo de mistura asfáltica.

Tabela 4.2 – Custo de implantação

	Custo/km
Terraplenagem	R\$ 277.595,08
Pavimentação	R\$ 1.202.371,05 + Variável
Sinalização	R\$ 17.952,92

Fonte: Autor

Os custos por quilômetro referentes à camada de revestimento, à pavimentação e à implantação do pavimento em função do tipo de mistura asfáltica e da espessura de revestimento, estão, respectivamente, na Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Tabela 4.5. Na Figura 4.55, está representada graficamente a relação entre o custo de implantação e a espessura do revestimento. Em relação às composições de cada um desses itens, as informações estão na seção 3.7.

Tabela 4.3 – Custo do revestimento por quilômetro tendo como base janeiro de 2021

Esp. (cm)	Quant. (t)	Custo/km			
		50/70	SBS	BOR	RAP
5	1464,0	R\$ 443.046,90	R\$ 512.105,69	R\$ 535.105,74	R\$ 438.261,27
6	1756,8	R\$ 531.656,28	R\$ 614.526,83	R\$ 642.126,89	R\$ 525.913,53
7	2049,6	R\$ 620.265,66	R\$ 716.947,97	R\$ 749.148,04	R\$ 613.565,78
8	2342,4	R\$ 708.875,04	R\$ 819.369,11	R\$ 856.169,19	R\$ 701.218,03
9	2635,2	R\$ 797.484,42	R\$ 921.790,24	R\$ 963.190,34	R\$ 788.870,29
10	2928,0	R\$ 886.093,80	R\$ 1.024.211,38	R\$ 1.070.211,49	R\$ 876.522,54
11	3220,8	R\$ 974.703,18	R\$ 1.126.632,52	R\$ 1.177.232,64	R\$ 964.174,80
12	3513,6	R\$ 1.063.312,56	R\$ 1.229.053,66	R\$ 1.284.253,78	R\$ 1.051.827,05
13	3806,4	R\$ 1.151.921,94	R\$ 1.331.474,80	R\$ 1.391.274,93	R\$ 1.139.479,30
14	4099,2	R\$ 1.240.531,33	R\$ 1.433.895,93	R\$ 1.498.296,08	R\$ 1.227.131,56
15	4392,0	R\$ 1.329.140,71	R\$ 1.536.317,07	R\$ 1.605.317,23	R\$ 1.314.783,81

Fonte: Autor

Tabela 4.4 – Custo da pavimentação por quilômetro

Esp. (cm)	Custo/km			
	50/70	SBS	BOR	RAP
5	R\$ 1.035.240,48	R\$ 1.104.299,27	R\$ 1.127.299,32	R\$ 1.030.454,85
6	R\$ 1.131.955,10	R\$ 1.214.825,65	R\$ 1.242.425,71	R\$ 1.126.212,34
7	R\$ 1.220.564,48	R\$ 1.317.246,79	R\$ 1.349.446,86	R\$ 1.213.864,60
8	R\$ 1.309.173,86	R\$ 1.419.667,92	R\$ 1.456.468,01	R\$ 1.301.516,85
9	R\$ 1.397.783,24	R\$ 1.522.089,06	R\$ 1.563.489,16	R\$ 1.389.169,11
10	R\$ 1.486.392,62	R\$ 1.624.510,20	R\$ 1.670.510,31	R\$ 1.476.821,36
11	R\$ 1.583.107,25	R\$ 1.735.036,58	R\$ 1.785.636,70	R\$ 1.572.578,86
12	R\$ 1.671.716,63	R\$ 1.837.457,72	R\$ 1.892.657,85	R\$ 1.660.231,11
13	R\$ 1.760.326,01	R\$ 1.939.878,86	R\$ 1.999.679,00	R\$ 1.747.883,37
14	R\$ 1.848.935,39	R\$ 2.042.300,00	R\$ 2.106.700,14	R\$ 1.835.535,62
15	R\$ 1.937.544,77	R\$ 2.144.721,14	R\$ 2.213.721,29	R\$ 1.923.187,88

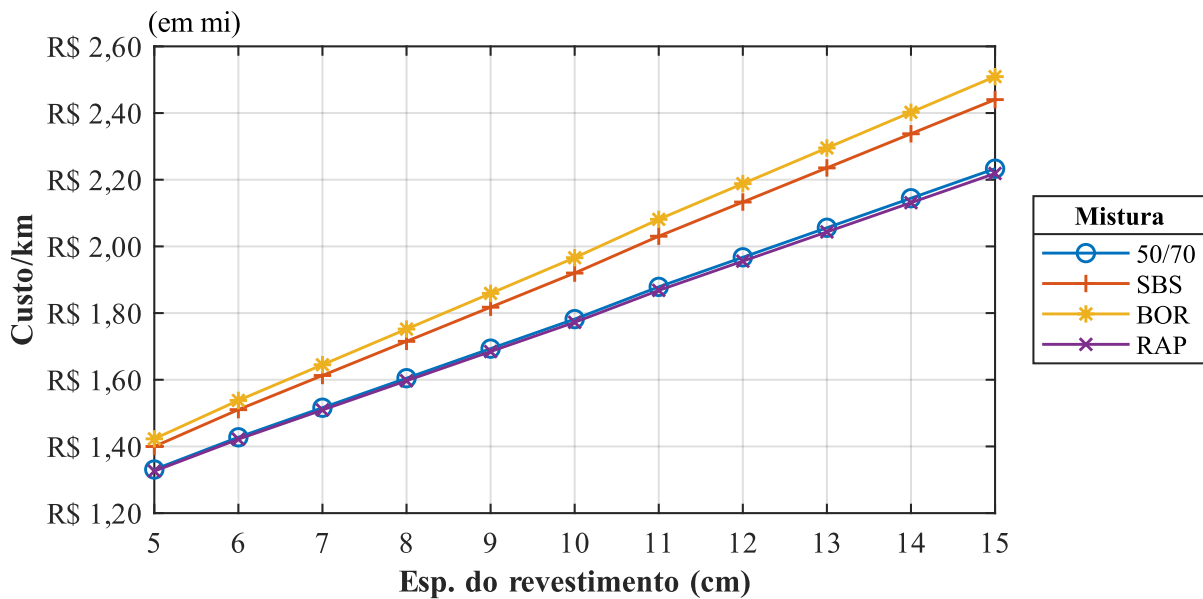
Fonte: Autor

Tabela 4.5 – Custo da implantação por quilômetro

Esp. (cm)	Custo/km			
	50/70	SBS	BOR	RAP
5	R\$ 1.330.788,48	R\$ 1.399.847,27	R\$ 1.422.847,32	R\$ 1.326.002,85
6	R\$ 1.427.503,11	R\$ 1.510.373,65	R\$ 1.537.973,72	R\$ 1.421.760,35
7	R\$ 1.516.112,49	R\$ 1.612.794,79	R\$ 1.644.994,87	R\$ 1.509.412,60
8	R\$ 1.604.721,87	R\$ 1.715.215,93	R\$ 1.752.016,01	R\$ 1.597.064,86
9	R\$ 1.693.331,25	R\$ 1.817.637,07	R\$ 1.859.037,16	R\$ 1.684.717,11
10	R\$ 1.781.940,63	R\$ 1.920.058,21	R\$ 1.966.058,31	R\$ 1.772.369,37
11	R\$ 1.878.655,25	R\$ 2.030.584,59	R\$ 2.081.184,71	R\$ 1.868.126,87
12	R\$ 1.967.264,63	R\$ 2.133.005,73	R\$ 2.188.205,85	R\$ 1.955.779,12
13	R\$ 2.055.874,01	R\$ 2.235.426,87	R\$ 2.295.227,00	R\$ 2.043.431,37
14	R\$ 2.144.483,39	R\$ 2.337.848,00	R\$ 2.402.248,15	R\$ 2.131.083,63
15	R\$ 2.233.092,78	R\$ 2.440.269,14	R\$ 2.509.269,30	R\$ 2.218.735,88

Fonte: Autor

Figura 4.55 - Custo da implantação por quilômetro em função do tipo de mistura asfáltica e da espessura de revestimento

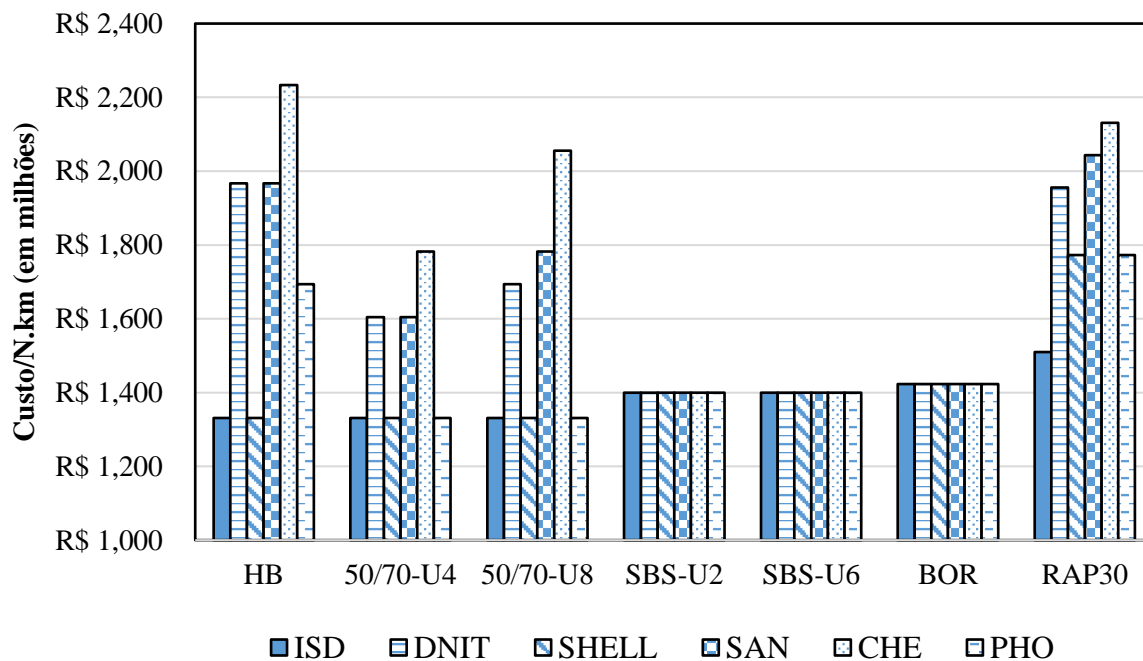


Fonte: Autor

Percebe-se na Figura 4.55 que o custo por quilômetro cresce de forma linear com o aumento da espessura de revestimento e que a mistura com maior custo foi aquela com adição de borracha, seguida da mistura com adição de polímero, da mistura com ligante convencional e, por último, da mistura com adição de RAP. Observa-se que a diferença de custo entre as duas últimas misturas citadas varia significativamente em função da DMT adotada para o transporte de material fresado.

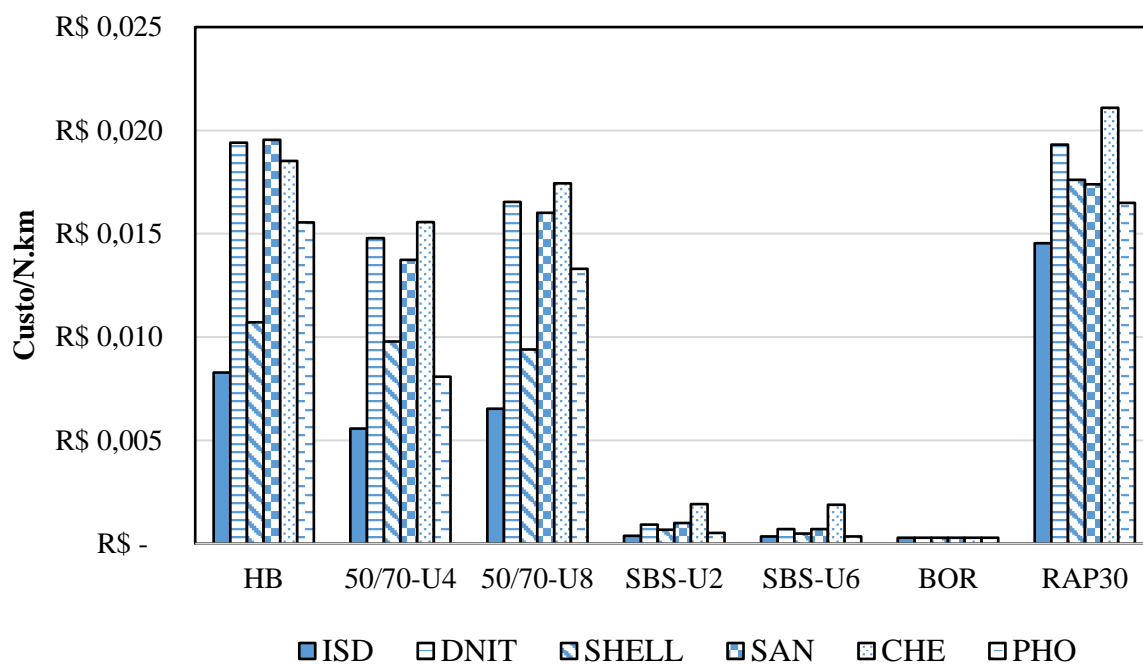
Partindo das espessuras admissíveis para a camada de revestimento obtidas pelo FlexPAVE™ (Figura 4.46), foram obtidos os custos da implantação por quilômetro (Figura 4.56) e a razão entre estes últimos e o número N para cada mistura e hipótese de temperatura (Figura 4.57).

Figura 4.56 – Custo da implantação por quilômetro obtido a partir das espessuras admissíveis



Fonte: Autor

Figura 4.57 – Custo da implantação por quilômetro por N obtido a partir das espessuras admissíveis



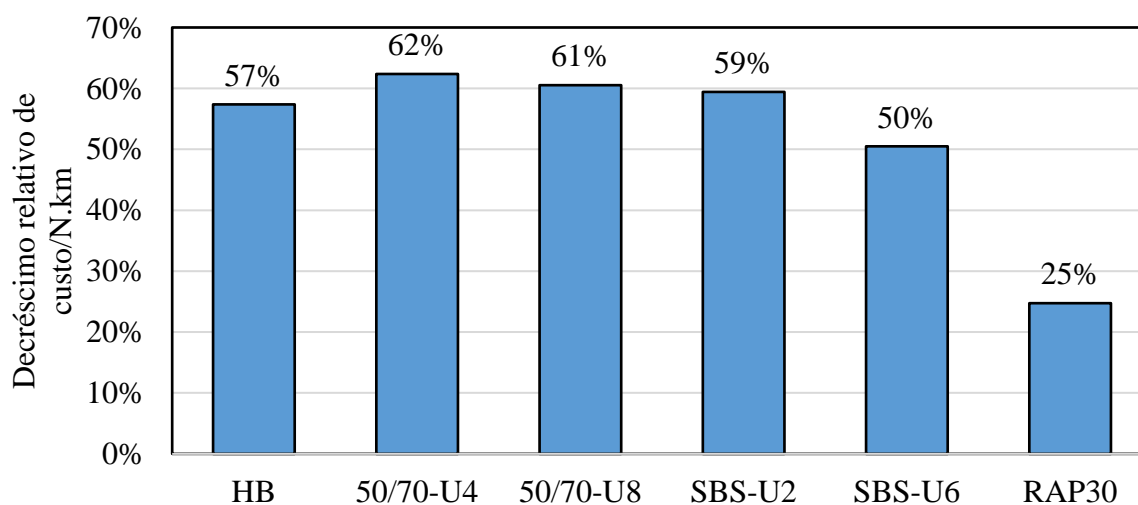
Fonte: Autor

Na Figura 4.56, os custos das misturas com adição de SBS e de borracha não variam em função da hipótese de temperatura porque, conforme comentado na seção 4.2.3, tais espessuras apresentaram uma vida à fadiga superior ao limite de 1×10^8 solicitações com 5 cm de revestimento. É importante notar que, mesmo não sendo considerada a relação de custo por N, as misturas com adição de SBS e BOR (que não atingiu a 30% de AT em nenhum caso, conforme comentado na seção 4.1.3) já apresentam custo menor em relação às demais ao se considerar temperaturas menores (no caso, hipóteses DNIT, SAN e CHE).

Contudo, uma visão mais acurada da relação entre custos e benefícios pode ser encontrada na Figura 4.57. Verifica-se que as hipóteses SAN e CHE, de maneira geral, resultaram nos maiores custos, ao passo que as hipóteses ISD e PHO resultaram nos menores. Tal observação confirma o que tem sido exposto no trabalho, a saber, que temperaturas maiores tendem a aumentar a vida à fadiga e, conseqüentemente, resultam em estruturas de menor custo.

Na Figura 4.58, está a variação relativa de custo por N entre as hipóteses DNIT e ISD, visto que a primeira é o padrão utilizado atualmente e a segunda é a proposta principal deste trabalho. A mistura CA-BOR não foi incluída, pois não se observaram diferenças de custo para diferentes hipóteses, visto que sempre a espessura mínima (5 cm) foi suficiente para suportar o tráfego máximo simulado.

Figura 4.58 - Decréscimo relativo no custo por quilômetro por N considerando hipóteses DNIT e ISD



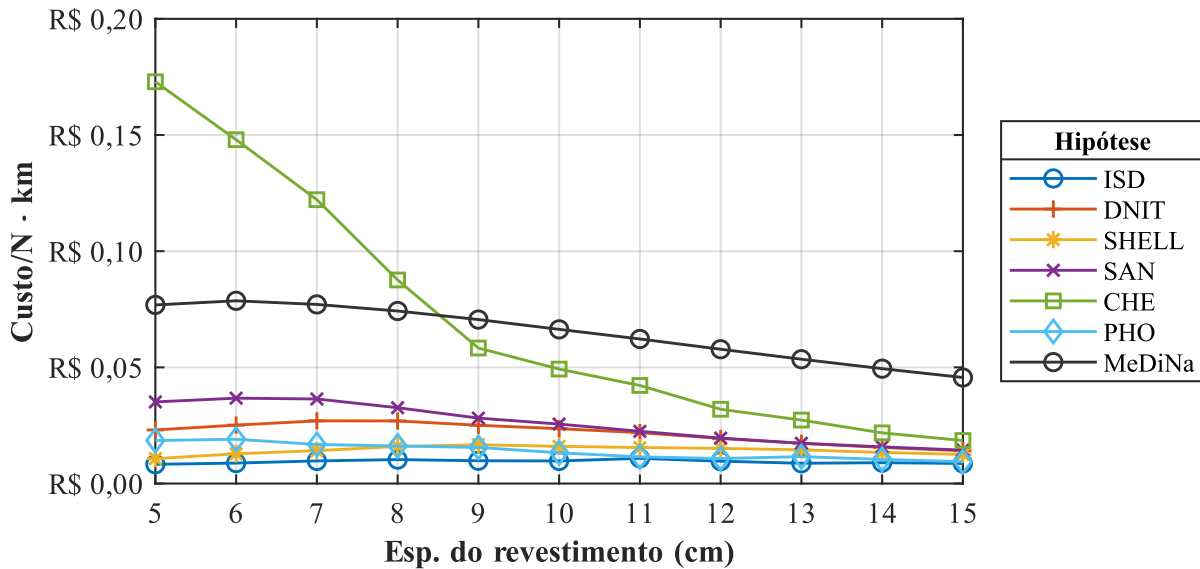
Observa-se que a adoção da hipótese ISD resultou em decréscimos de até 62% de custo por quilômetro em comparação com a hipótese DNIT. A partir disso, pode-se inferir que, para as condições de temperatura, tráfego e materiais utilizados nesta pesquisa, a consideração de diferentes hipóteses de temperatura impacta significativamente não somente na previsão de fadiga, como também em questões econômicas.

Além disso, ao comparar-se as misturas, também ficam evidentes as vantagens da utilização de misturas modificadas. Por mais que a adição de SBS ou de borracha represente um revestimento de custo maior e, conseqüentemente, um maior custo de implantação da rodovia em certos casos, verificou-se que a relação entre custo por quilômetro e a vida à fadiga foi sempre menor para tais misturas. Ou seja, o benefício (mensurado em passagens do eixo padrão) compensa o investimento em utilizar tais materiais.

Quanto à mistura CA-RAP30, verificou-se um custo de implantação maior do que no caso das misturas com ligante convencional. Isso se deve ao fato de que a diferença de custos foi muito pequena entre as composições com mistura convencional e com adição de RAP (conforme Figura 4.55), ao passo que as espessuras de revestimento admissíveis considerando a mistura com RAP foram maiores, o que gerou maiores custos. Apesar desses resultados, não se pode generalizar tais tendências para outras misturas com adição destes materiais. No caso da pesquisa de Correa (2020), foram observadas, inclusive, misturas com adição de RAP cujo desempenho superou o observado em misturas convencionais. Também é importante destacar que as DMTs adotadas para o RAP influenciam significativamente no seu custo.

Na Figura 4.59, estão os valores do custo por quilômetro por N obtidos para a mistura CA-50/70-HB considerando a vida à fadiga obtida pelo FlexPAVE™ e pelo MeDiNa e variando as espessuras entre 5 e 15 cm. Não foi adotado um único valor de N para se determinar as espessuras admissíveis porque, como comentado na seção 4.4, as simulações do MeDiNa alcançaram 30% de AT em níveis muito inferiores de tráfego em comparação com as simulações do FlexPAVE™.

Figura 4.59 – Custo da implantação por quilômetro por N para a mistura CA-50/70-HB a partir do FlexPAVE™ e do MeDiNa



Fonte: Autor

Conforme a Figura 4.59, o custo por quilômetro por N apresentou valores maiores utilizando-se o MeDiNa em quase todos os casos, com exceção da hipótese CHE com espessuras de revestimento menores que 9 cm. Em média, os custos obtidos com o MeDiNa são 75% maiores do que aqueles obtidos com o FlexPAVE™, o que reflete as diferenças de tipologia de ensaio e funções de transferência entre os dois métodos utilizados, como já foi abordado na seção 4.4.

Outra observação pertinente é que, tanto a partir dos resultados do FlexPAVE™ quanto do MeDiNa, o aumento da espessura de revestimento resultou em menores relações de custo por quilômetro por N. Ou seja, a previsão de desempenho à fadiga de estruturas de pavimento mais robustas indica um melhor custo/benefício em comparação com as mais esbeltas.

4.5.1 Síntese das análises

Na presente seção, é apresentado um resumo dos resultados obtidos a partir da análise econômica.

- A temperatura teve grande influência na análise econômica. Ao se comparar as hipóteses ISD e DNIT, há uma variação relativa de até 62% da relação custo/N.km, o que indica

que a condição de 25 °C constantes resulta em um superdimensionamento do ponto de vista da vida à fadiga;

- b) Apesar do maior custo, mistura CA-BOR apresentou a menor relação custo/N.km, seguida das misturas com adição de SBS, com ligante convencional e da mistura CA-RAP30;
- c) A relação custo/N.km obtida pelo MeDiNa foi, em média 75% maior do que aquela obtida pelo FlexPAVE™.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente seção trata das conclusões obtidas a partir da análise dos resultados deste trabalho e apresenta sugestões para pesquisas futuras

5.1 CONCLUSÕES

Da análise dos resultados alcançados nessa pesquisa, seguem-se as seguintes conclusões:

- a) Verificou-se, para os materiais, condições climáticas e tráfego adotados nas simulações, que a temperatura é um dos fatores preponderantes na análise viscoelástica de fadiga. Observou-se, como já era esperado, que o dano por fadiga diminui a maiores temperaturas e, conseqüentemente, a área trincada e a vida à fadiga previstas também. Especialmente no caso de pavimentos com revestimentos mais esbeltos, foi observado que a vida à fadiga prevista aumenta consideravelmente (podendo chegar a mais de 200%) aumentando-se a temperatura de 25°C para 35 °C, intervalo que corresponde a 30% das temperaturas das hipóteses estudadas nesta pesquisa. Também foram obtidas boas correlações entre a temperatura média de cada hipótese de temperatura e o dano por fadiga a 60, 120 e 180 meses considerando espessuras de revestimento de 5, 10 e 15 cm, com valores de R^2 superiores a 0,95. A vida à fadiga prevista também apresentou boa correlação (R^2 igual a 0,87) com a temperatura média de cada hipótese no caso de estruturas com 5 cm de revestimento e, no caso das misturas com ligante convencional e a mistura RAP30, foram obtidas correlações razoáveis (R^2 superior a 0,70) com 10 e 15 cm;
- b) A influência de diferentes hipóteses de temperatura na previsão de desempenho à fadiga também se refletiu na análise econômica. Percebeu-se que adotar diferentes condições climáticas pode impactar a relação de custo por N em até 62% (comparando-se as hipóteses DNIT e ISD);

- c) Ao serem comparadas as AT previstas com a função de Nascimento (2015) e com a função de Fritzen (2016), utilizando o MeDiNa, verificou-se que a última resultou em maiores AT e, como resultado, maiores custos por N (diferença relativa média de 75%) em relação àqueles obtidos pela função de Nascimento (2015). A tais disparidades, se atribuem as diferenças nos protocolos de ensaio à fadiga requeridos por ambos os programas, bem como as diferentes opções de análise, como a malha de pontos para o cálculo do dano médio;
- d) Verificou-se um mesmo *ranking* tanto de dano, como de AT e relação custo/N entre os diferentes tipos de mistura asfáltica adotados. A mistura com menor danificação foi a CA-BOR, seguida das misturas com adição de SBS (CA-SBS-U2 e CA-SBS-U6), das misturas com ligante convencional (CA-50/70-HB, CA-50/70-U4 e CA-50/70-U8) e, por fim, a mistura CA-RAP30. Contudo, o desempenho inferior da mistura com adição de RAP não pode ser generalizado para outros materiais similares;
- e) Simulando as mesmas condições verificadas em campo de tráfego e estrutura do trecho HB, foi observado que as hipóteses de temperatura que resultaram nas previsões mais precisas de AT, em comparação com os dados reais, foram ISD e SHELL. Ou seja, as hipóteses baseadas em condições de temperatura do centro do estado do Rio Grande do Sul (uma delas com temperatura variável e a outra com temperatura constante) proporcionaram melhores previsões de AT do que a condição de 25 °C constantes (hipótese DNIT) e a hipótese SAN, que já foi utilizada como estimativa para as temperaturas dessa região;
- f) Foi perceptível como a variação de temperatura ao longo do tempo e da profundidade influencia nas previsões de desempenho à fadiga. Conforme fica evidente da Figura 4.47 à Figura 4.49, a vida à fadiga variou em mais de 60% ao se considerar as variações de temperaturas em certos casos. É verdade que a média de temperaturas de uma hipótese não seria conhecida se não houvesse conhecimento do perfil de temperaturas ao longo do tempo e da profundidade. Porém, tais resultados mostram como a medição de temperaturas *in situ* ao longo de pelo menos 1 ano se faz necessária para uma previsão de desempenho à fadiga satisfatória.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, percebeu-se as seguintes possibilidades de trabalhos que podem complementar e dar continuidade ao que foi apresentado:

- a) Certamente a principal sugestão é que sejam realizadas medições de temperatura a cada hora e em diferentes profundidades em pavimentos asfálticos na região central do Rio Grande do Sul ao longo de pelo menos 1 ano. Somente assim será possível ir além das estimativas por meio de hipóteses de temperatura e alimentar o FlexPAVE™ (e outros *softwares* afins) com as condições climáticas de campo;
- b) Desenvolver algum programa semelhante ao EICM para a modelagem de temperaturas em pavimentos asfálticos no Brasil. Até que o estágio sugerido no item anterior se concretize, é fundamental que já se tenha um perfil de temperaturas estimado a partir das diversas estações meteorológicas disponíveis em território nacional;
- c) Levar em consideração as diferentes propriedades térmicas das misturas asfálticas na determinação do perfil de temperaturas por meio de medições *in situ* ou de um programa de modelagem;
- d) Avaliar a influência da distribuição do tráfego ao longo do dia na previsão de desempenho à fadiga, de forma a compreender a influência da interação entre a distribuição temporal da temperatura e do tráfego na danificação e, conseqüentemente, na AT;
- e) Utilizar dados de temperatura de cidades de diferentes climas brasileiros. Por exemplo, considerar uma cidade na região Nordeste, de clima semiárido, outra na região Norte, de clima equatorial, e outra na região Sul, de clima subtropical;
- f) Comparar a AT prevista por meio da função de transferência de Nascimento (2015) com a medida em campo para os demais trechos monitorados pelo GEPPASV;
- g) Refinar as correlações entre os parâmetros viscoelásticos das misturas e o dano. Pode-se, por exemplo, utilizar os polígonos de frequência das temperaturas medidas em campo e estimar melhor parâmetros como módulo dinâmico e ângulo de fase;
- h) Realizar análises de sensibilidade de outros dados de entrada do FlexPAVE™. Um exemplo seria a variação do módulo da camada de revestimento (como análise elástica) e comparar os resultados com a análise viscoelástica.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Preços médios ponderados (produto/estado) – 2013 a 2021** (atualizado em 24 jun 2021). Retirado de: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-de-distribuicao-de-produtos-asfalticos>. Acesso em 29 jun 2021. Rio de Janeiro, RJ. 2021.
- 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 Engineering** vol 8, no 3, p 203-212. 2007
- ÁLVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. A.; GONÇALVES, J. L de M., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brasil. **Meteorologische Zeitschrift**, vol. 22, no 6, 711-728. 2014.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide**. Washington, DC. 2008
- _____. AASHTO TP 107-18. **Determining the Damage Characteristic Curve and Failure Criterion Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT) Cyclic Fatigue Test**. Washington, DC. 2018.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **E 206-72 : standard definitions of terms relating to fatigue testing and statistical analysis of fatigue data**. USA, 1979.
- 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. **Avaliação do modelo viscoelástico linear aplicado a misturas asfálticas utilizadas em revestimentos de pavimentos do Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza/CE. 2013.
- 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.
- BAEK, C. M. **Investigation of Top-Down Cracking Mechanisms Using the Viscoelastic Continuum Damage Finite Element Program**. Dissertation (Doctor of Philosophy). North Carolina State University, Raleigh, NC. 2010.
- BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. 1. ed, 3ª reimpressão. São Paulo: Oficina de textos. 2007.
- BARBER, E. S. Calculation of maximum pavement temperature from weather reports. **Bulletin n. 168**. HRB (TRB), Washington, DC. p. 1-8. 1957.

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.

BODIN, D.; SOENEN, H.; DE LA ROCHE, C. Temperature effects in binder fatigue and healing tests. **3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress**. 2004.

BOEIRA, F. D. **Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes modificados**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2018.

BORDIN, D. T. **Implantação e Análise de Desempenho de Trechos Monitorados em Santa Maria – RS**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2020.

BREITHAUPT, J. **Física**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC. 2018.

BROWN, S. F. Determination of Young's modulus for bituminous materials in pavement design. **52nd Annual Meeting of the Highway Research Board**. 1973.

BUENO, L. D. **Avaliação Deflectométrica e de Rigidez: Estudo de Caso em Três Trechos Monitorados em Santa Maria/RS**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2016.

_____. **Contribuição para a previsão da irregularidade longitudinal e seus desdobramentos econômicos em pavimentos asfálticos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS. 2019.

BUENO, L. D.; KIM, Y. R.; SHUSTER, S. L.; SPECHT, L. P.; PEREIRA, D. S.; NASCIMENTO, L. A. H.; BRENNER, M. G. B. Asphalt pavement design optimisation: a case study using viscoelastic continuum damage theory. **International Journal of Pavement Engineering**. DOI:10.1080/10298436.2020.1788030. 2020.

BURIOL, G. A.; ESTEFANEL, V.; CHAGAS, A. C.; EBERHARDT, D. Clima e vegetação natural do estado do Rio Grande do Sul seguindo o diagrama climático de Walter e Lieth. **Ciência Florestal**, v. 17, n. 2, p. 91-100. 2007.

CANESTRARI, F.; INGRASSIA, L. P. A review of top-down cracking in asphalt pavements : Causes, models, experimental tools and future challenges. **Journal of Traffic and Transportation Engineering** 7 (5), p. 541-572. DOI : 10.1016/j.jtte.2020.08.002. 2020.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABEDA. 2015

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.

CORREA, B. M. **Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de RAP**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2020.

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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Método de projeto de pavimentos flexíveis**. IPR 667. Rio de Janeiro. 1981.

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

_____. **Pavimentação asfáltica – Ensaio de fadiga à tensão controlada**. DNIT 183/2018 – ME. Rio de Janeiro, RJ. 2018a.

_____. **Pavimentação asfáltica – Determinação do módulo de resiliência**. DNIT 135/2018 – ME. Rio de Janeiro, RJ. 2018b.

_____. **Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico**. DNIT 416/2019 – ME. Rio de Janeiro, RJ. 2019.

_____. **Guia para execução de segmentos experimentais – PRO-MeDiNa**. IPR 749. Rio de Janeiro, RJ. 2020.

_____. **Relatório Analítico de Composição de Custos – Rio Grande do Sul – janeiro/2021**. Retirado de: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro/sul/sul>. Acesso em 29 jun. 2021. Rio de Janeiro, RJ. 2021.

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

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.

DIEFENDERFER, B. K. **Moisture content determination and temperature profile modeling of flexible pavement structures**. Dissertation (Doctor of Philosophy). Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. 2002.

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**, pp. 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

FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers**. John Wiley, New York, 1980.

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.

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Execução de Estudos e Pesquisa para Elaboração de Método Mecanístico – Empírico de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos**. Relatório Parcial IV (A). Projeto DNIT TED n° 682/2014. Processo n° 50607.002043/2013-00. Convênio UFRJ-DNIT, Rio de Janeiro, RJ. 2018.

FREITAS, E.; PEREIRA, P.; PICADO-SANTOS, L. Assessment of Top-Down Cracking Causes in Asphalt Pavements. **Proceedings of the 3rd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control**. p. 555-564. Guimarães, Portugal. 2003.

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.

HOLANDA, A. S. de; PARENTE JUNIOR, E.; ARAÚJO, T. D. P. de; MELO, L. T. B. de; EVANGELISTA JUNIOR, F.; SOARES, J. B. Finite Element Modelling of Flexible Pavements. **XXVII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)**. Belém, Pará. 2006.

HOU, T., **Fatigue Performance Prediction of North Carolina Mixtures Using Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model**. Thesis (Master of Science). North Carolina State University, Raleigh, NC. 2009.

HVEEM, F. N.; CARMANY, R. M. The factors underlying the rational design of pavements. **Highway Research Board**, v.28, p. 101-136. 1948

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Anuário Estatístico do Brasil**. Rio de Janeiro, RJ. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA.
<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em 12 fev 2020.

ISLAM, M. R.; AHSAN, S.; TAREFDER, R. A. Modeling Temperature Profile of Hot-Mix Asphalt in Flexible Pavement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, vol. 8 no. 1. P. 47-52. 2015.

KHAN, Z. H.; ISLAM, M. R.; TAREFDER, R. A. Determining Asphalt surface temperature weather parameters. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, 6 (6): 577 – 588. 2019.

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.

KTARI, R.; SAINT-LAURENT, D.; HORNYCH, P.; HAMMOUM, F.; MARSAC, P.; NGUYEN, M. N. Effect of climate on asphalt pavement performance using two mechanistic-empirical methods. **International Journal of Pavement Engineering, Taylor & Francis (Routledge)**, 27. 2020

KUCHIISHI, A. K.; CARVALHO, J. P. B.; BESSA, I. S.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L, L. B. Effect of temperature on the fatigue behavior of asphalt binder. **Applied Rheology** 29(1):30-40. DOI: 10.1515/arh-2019-0004. 2019

LEE, H. J.; KIM, Y. R. A Uniaxial Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading. **ASCE Journal of Engineering Mechanics**, Vol. 124, No. 1, p. 32–40. 1998a.

_____. A Viscoelastic Continuum Damage Model of Asphalt Concrete with Healing. **ASCE Journal of Engineering Mechanics**, Vol. 124, No. 11, p. 1224–1232. 1998b.

LU, W.; KAYSER, S.; WELLNER, F. Impact of Surface Temperature on Fatigue Damage in Asphalt Pavement. **Journal of Highway and Transportation Research and Development** Vol. 7, No. 3 (2013) 1. 2013.

LUKANEN, E. O.; STUBSTAD, R.; BRIGGS, R. **Temperature Predictions and Adjustment Factors for Asphalt Pavement**. Publication No. FHWA-RD-98-085. 2000

LUZZI, F. C. **Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2019.

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.

MANNAN, U. A.; ISLAM, M. R.; TAREFDER, R. A. Effects of recycled asphalt pavements on the fatigue life of asphalt under different strain levels and loading frequencies. **International Journal of Fatigue** **78** (2015) 72–80. 2015.

MEDINA, J de. Mecânica dos Pavimentos: Aspectos Geotécnicos. **Solos e Rochas**, **29**, (2). p. 137-158. 2006.

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

MOCELIN, D. M. **Avaliação do comportamento à fadiga de misturas asfálticas quentes e mornas através do modelo de dano contínuo viscoelástico.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2018.

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). North Carolina State University, Raleigh, NC. 2015.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Summary report on fatigue response of asphalt mixtures. TM-UCB-A-003A-89-3.** Berkeley, USA. 1990.

_____. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures.** Final Report, NCHRP 1-37^a Part 2. Design Inputs. Chapter 3. Environmental Effects, ARA, In. and ERES Consultants Division. 2004a.

_____. **Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures.** Final Report, NCHRP 1-37^a Part 2. Design Inputs. Chapter 2. Material Characterization, ARA, In. and ERES Consultants Division. 2004b.

_____. **Top-Down Cracking of Hot-Mix Asphalt Layers : Models for Initiation and Propagation.** NCHRP Web-Only Document 162. 2010.

_____. **A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary.** Transportation Research Board. NCHRP Report 673. Washington, D.C. 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.

NOROUZI, A. **Investigation of Specimen Geometries for the VECD Model and Calibration of the FlexPAVE™ Program for Fatigue Performance of Asphalt Pavements**. Dissertation (Doctor of Philosophy). North Carolina State University, Raleigh, NC. 2015.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica 2: fluidos, oscilações e ondas, calor** [livro eletrônico]. 5 ed. São Paulo: Blucher. 2018.

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.

PARK, H. J.; ESLAMINIA, E.; KIM, Y. R. Mechanistic evaluation of cracking in in-service asphalt pavements. **Materials and Structures**. DOI 10.1617/s11527-014-0307-6. 2014.

PELLINEN, T. **Investigation of the Use of Dynamic Modulus as an Indicator of Hot-Mix Asphalt Performance**. Dissertação apresentada em cumprimento parcial dos requisitos ao grau de PhD. Submetida à Faculty of Graduate School of the Arizona State University, Tempe, Arizona. 2001.

PELLINEN, T.; WITCZAK, M. W. ; BONAQUIST, R. Master Curve Construction Using Sigmoidal Fitting Function with Non-linear Least Squares Optimization Technique. **Proceedings of the 15th ASCE Engineering Mechanics Division Conference**, Columbia University, June 2–5, 2002, New York. 2002.

PELLINEN, T.; ROWE, G.; BISWAS, K. Evaluation of Surface (Top Down) Longitudinal Wheel Path Cracking. **Joint Transportation Research Program**. Paper 93. 2004.

PIERCE, L. M.; MCGOVERN, G. **Implementation of the AASHTO Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide and Software**. NCHRP Synthesis 457. Washington, DC. 2014.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ. 1991.

PROCERGS - CENTRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL S.A. <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/clima-temperatura-e-precipitacao>. Acesso em 12 fev 2020.

QABUR, A. **Fatigue Characterization of Asphalt Mixes with Polymer Modified Asphalt Cement**. Thesis (Master of Applied Science). University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada. 2018.

QIAO, Y.; DAWSON, A. R.; PARRY, T.; FLINTSCH, G.; WANG, W. Flexible Pavements and Climate Change: A Comprehensive Review and Implications. **Sustainability**. 2020; **12(3):1057**. <https://doi.org/10.3390/su12031057>. 2020a.

QIAO, Y.; SANTOS, J.; STONER, A. M. K.; FLINTSCH, G. "Climate change impacts on asphalt road pavement construction and maintenance: An economic life cycle assessment of adaptation measures in the State of Virginia, United States," **Journal of Industrial Ecology, Yale University**, vol. **24(2)**, pages 342-355. 2020b.

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. **Development of a Unified Fatigue Failure Criterion for Asphalt Mixtures and Its Applications to Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Mixtures**. Dissertation (Doctor of Philosophy). North Carolina State University, Raleigh, NC. 2014.

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.

SANTIAGO, L. S.; TORQUATO E SILVA, S. A.; SOARES, J. B. Determinação do dano em pavimentos asfálticos por meio de combinação do modelo S-VECD com análises elásticas. **Revista TRANSPORTES**, v. **26**, n. **2**. ISSN: 2237-1346. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v26i2.1446>. 2018

SANTIAGO, L. S.; BABADOPOULOS, L. F. A. L.; SOARES, J. B. Desenvolvimento de função de transferência para previsão de área trincada em pavimentos asfálticos por meio da simulação do dano por fadiga utilizando modelo S-VECD e análises elásticas. **Revista TRANSPORTES**, v. **28**, n. **3**. ISSN: 2237-1346. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i3.1900>. 2020

SANTOS, M. S. **Desenvolvimento de modelos 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.

SCHAPERLY, R. A. On viscoelastic deformation and failure behavior of composite materials with distributed flaws. *Advances in Aerospace Structures and Materials*, **Aerospace Structures and Materials**, 01, S. S. Wang and W. J. Renton, eds., 5-20. 1981.

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.

SHELL. **Pavement design manual: asphalt pavements and overlays for road traffic**, Shell International Petroleum Co. Ltd, London, UK. 1978.

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.

SILVA, H. M. R. D.; OLIVEIRA, J. R. M.; SANTOS, L. P. Influence of Temperature on the Fatigue Life of Flexible Pavements. **3rd European Pavement and Asset Management Conference. EPAM3 7-9**. Coimbra, Portugal. 2008.

SOLAIMANIAN, M.; KENNEDY, T. W. Predicting Maximum Pavement Surface Temperature Using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation. **Transportation Research Record** **147**. 1993.

SOUZA, T. P.; OTTO, G. G.; ALMEIDA, A. J. de.; SOUZA R. A. de.; MORI, F. de; VALENTE, A. M. Efeito da condição climática na temperatura de pavimento de concreto asfáltico espesso. **33^o ANPET**. 2019.

SUN, L.; WANG, G.; ZHANG, H.; LIU, L. Initiation and Propagation of Top-Down Cracking in Asphalt Pavement. **Applied Sciences** **8(5)**: 774. DOI: 10.3390/app8050774. 2018.

TAPSOBA, N.; SAUZÉAT, C.; DI BENEDETTO, H. Analysis of fatigue test for bituminous mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**. 2012

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.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel. 1980.

UNDERWOOD, B. S. **Multiscale Constitutive Modeling of Asphalt Concrete**. Dissertation (Doctor of Philosophy). North Carolina State University, Raleigh, NC. 2011.

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.; KIM, Y. R. Effect of volumetric factors on the mechanical behavior of asphalt fine aggregate matrix and the relationship to asphalt mixture properties. **Construction and Building Materials** 49: 672-681. 2013

UNDERWOOD, B.; GUIDO, Z.; GUDIPUDI, P.; FEINBERG, Y. Increased costs to US pavement infrastructure from future temperature rise. **Nature Climate Change** 7, 704–707. <https://doi.org/10.1038/nclimate3390>. 2017

WANG, C.; CASTORENA, C.; ZHANG, J.; KIM, Y. R. Unified failure criterion for asphalt binder under cyclic fatigue loading. **Road Materials and Pavement Design**. DOI: 10.1080/14680629.2015.1077010. 2015

WANG, Y. D.; KESHAVARZI, KIM, Y. R. Fatigue Performance Prediction of Asphalt Pavements with FlexPAVE™, the S-VECD Model, and D^R Failure Criterion. **Journal of the Transportation Research Board**. DOI: 10.1177/0361198118756873. 2018.

WEATHER SPARK. **Condições meteorológicas médias de Santa Maria**. <https://pt.weatherspark.com/y/29563/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Santa-Maria-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em 01 fev 2021. 2021a.

_____. **Comparação das características meteorológicas em San Diego, Cheyenne e Phoenix**. <https://pt.weatherspark.com/compare/y/1816~3765~2460/Compara%C3%A7%C3%A3o-das-caracter%C3%ADsticas-meteorol%C3%B3gicas-m%C3%A9dias-em-San-Diego-Cheyenne-e-Phoenix>. Acesso em 03 mai 2021. 2021b.

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.

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.

WOOD, J. H. **Pavement Temperature Models**. Transfund New Zealand Research Report No. 101. 1998.

XIAO, F.; AMIRKHANIAN, S. N.; WU, B. Fatigue and Stiffness Evaluations of Reclaimed Asphalt Pavement in Hot Mix Asphalt Mixtures. **Journal of Testing and Evaluation**, Vol. 39, No. 1. ID JTE102699. 2011.

APÊNDICE A

Apêndice A₁ – Temperaturas (°C) da hipótese ISD de janeiro e fevereiro

Hora\Prof. (cm)	JANEIRO						FEVEREIRO					
	0	3	6	9	12	15	0	3	6	9	12	15
00:00	30,86	31,97	30,87	30,07	29,57	28,22	34,79	35,52	34,77	33,02	32,10	28,79
01:00	30,89	31,83	30,64	29,82	29,34	28,03	34,64	35,32	34,55	32,81	31,91	28,63
02:00	30,81	31,72	30,49	29,64	29,16	27,90	34,47	35,17	34,39	32,64	31,76	28,52
03:00	30,83	31,65	30,38	29,52	29,03	27,76	34,15	34,89	34,17	32,47	31,61	28,41
04:00	30,83	31,62	30,30	29,43	28,95	27,66	34,20	34,83	34,03	32,34	31,46	28,29
05:00	30,99	31,66	30,30	29,37	28,85	27,58	34,18	34,79	33,96	32,23	31,35	28,20
06:00	33,44	32,83	30,73	29,51	28,84	27,53	35,59	35,28	34,06	32,21	31,28	28,11
07:00	37,69	35,46	32,17	30,27	29,21	27,65	40,68	38,20	35,53	32,87	31,53	28,18
08:00	43,56	39,44	34,60	31,72	30,01	28,03	46,70	42,47	38,19	34,40	32,37	28,53
09:00	49,37	44,09	37,77	33,79	31,30	28,70	51,87	46,69	41,26	36,43	33,64	29,16
10:00	53,43	47,80	40,72	35,97	32,77	29,56	55,38	50,15	44,11	38,51	35,04	29,93
11:00	56,17	50,64	43,17	37,90	34,16	30,40	57,68	52,46	46,23	40,22	36,32	30,68
12:00	57,37	52,39	44,92	39,40	35,35	31,15	58,87	54,10	47,87	41,59	37,37	31,31
13:00	57,24	52,93	45,81	40,36	36,16	31,74	59,08	54,72	48,77	42,49	38,13	31,80
14:00	59,73	55,70	48,10	42,23	38,34	33,42	63,21	57,83	51,57	44,72	40,30	33,06
15:00	56,64	53,12	48,66	43,79	40,04	34,98	61,76	56,69	52,31	46,63	41,94	34,24
16:00	53,07	50,82	48,03	44,24	40,87	36,68	56,44	52,54	50,98	47,45	43,02	35,64
17:00	48,59	47,80	46,13	43,12	40,27	36,45	51,96	49,79	49,22	46,42	42,51	35,45
18:00	43,05	43,89	43,52	41,46	39,27	35,96	45,91	45,71	46,49	44,70	41,54	35,01
19:00	36,71	39,29	40,24	39,26	37,88	35,22	39,82	41,05	43,00	42,35	40,11	34,31
20:00	33,92	36,00	37,22	36,92	36,27	34,28	37,49	38,27	40,27	40,10	38,51	33,46
21:00	32,96	34,42	35,41	35,26	34,95	33,42	36,83	36,95	38,61	38,54	37,27	32,72
22:00	32,23	33,39	34,23	34,15	34,03	32,81	36,41	36,22	37,67	37,58	36,46	32,20
23:00	32,04	32,87	33,53	33,44	33,39	32,36	36,22	35,77	37,08	36,96	35,93	31,86

Fonte: Autor

Apêndice A₂ – Temperaturas (°C) da hipótese ISD de março e abril

Hora\Prof. (cm)	MARÇO						ABRIL					
	0	3	6	9	12	15	0	3	6	9	12	15
00:00	30,48	31,10	29,76	27,30	26,17	25,07	27,39	27,01	25,18	23,12	21,51	20,95
01:00	30,39	30,88	29,47	27,06	25,95	24,91	27,06	26,76	24,94	22,93	21,36	20,83
02:00	30,20	30,68	29,27	26,87	25,79	24,77	26,78	26,51	24,72	22,75	21,23	20,73
03:00	30,00	30,48	29,10	26,72	25,67	24,67	26,49	26,25	24,51	22,59	21,09	20,63
04:00	29,91	30,34	28,95	26,58	25,55	24,56	26,36	26,06	24,36	22,44	20,97	20,53
05:00	29,85	30,25	28,83	26,46	25,43	24,47	26,35	25,99	24,23	22,33	20,89	20,45
06:00	30,66	30,58	28,91	26,45	25,37	24,39	26,53	26,03	24,21	22,27	20,81	20,39
07:00	34,51	32,56	29,77	26,80	25,47	24,40	28,39	26,87	24,51	22,36	20,80	20,34
08:00	40,44	36,44	31,99	27,94	26,05	24,65	32,48	29,25	25,73	22,93	21,04	20,43
09:00	45,89	40,75	34,93	29,74	27,12	25,19	37,36	32,63	27,78	24,12	21,68	20,74
10:00	49,60	44,20	37,63	31,64	28,39	25,92	41,36	35,89	30,09	25,62	22,59	21,24
11:00	51,92	46,59	39,78	33,27	29,56	26,65	43,94	38,30	32,07	27,05	23,56	21,83
12:00	53,40	48,27	41,38	34,56	30,53	27,26	45,29	40,02	33,60	28,24	24,42	22,38
13:00	53,78	49,18	42,43	35,47	31,28	27,79	45,09	40,44	34,37	29,03	25,03	22,82
14:00	56,30	51,35	45,01	38,08	33,31	29,27	47,23	42,42	36,91	31,46	27,38	23,92
15:00	53,96	50,04	45,44	39,77	35,14	30,62	44,81	41,29	37,40	32,65	28,58	25,33
16:00	50,91	48,08	44,20	40,21	36,67	32,75	40,36	38,16	36,28	32,53	29,41	25,60
17:00	45,88	44,84	42,25	39,07	36,05	32,50	35,98	35,35	34,54	31,54	28,87	25,39
18:00	39,61	40,55	39,47	37,30	35,02	31,97	31,54	32,04	32,19	30,05	27,99	24,96
19:00	35,91	36,92	36,48	35,19	33,64	31,22	29,88	30,03	30,28	28,57	26,98	24,40
20:00	34,75	35,17	34,61	33,56	32,40	30,47	29,43	29,13	29,18	27,59	26,21	23,90
21:00	34,15	34,20	33,50	32,50	31,52	29,90	28,88	28,49	28,48	26,94	25,69	23,58
22:00	33,66	33,54	32,78	31,82	30,96	29,51	28,51	28,03	27,97	26,48	25,32	23,33
23:00	33,31	33,09	32,27	31,35	30,54	29,21	28,04	27,58	27,56	26,14	25,02	23,15

Fonte: Autor

Apêndice A₃ – Temperaturas (°C) da hipótese ISD de maio e junho

Hora\Prof. (cm)	MAIO						JUNHO					
	0	3	6	9	12	15	0	3	6	9	12	15
00:00	18,16	18,70	17,98	17,35	16,21	15,25	15,27	15,57	15,16	14,14	13,43	12,49
01:00	17,80	18,33	17,66	17,05	16,00	15,10	14,83	15,17	14,80	13,87	13,24	12,35
02:00	17,28	17,89	17,34	16,80	15,80	14,97	14,47	14,83	14,49	13,63	13,05	12,25
03:00	16,78	17,47	17,00	16,54	15,61	14,84	13,91	14,40	14,19	13,40	12,88	12,13
04:00	16,54	17,19	16,71	16,30	15,43	14,71	13,95	14,26	13,97	13,21	12,73	12,02
05:00	16,15	16,86	16,47	16,10	15,29	14,59	13,91	14,17	13,86	13,09	12,62	11,92
06:00	16,54	16,93	16,38	15,96	15,15	14,48	13,99	14,16	13,79	13,01	12,54	11,87
07:00	18,39	17,86	16,75	16,08	15,15	14,44	14,95	14,62	13,96	13,04	12,51	11,82
08:00	22,57	20,12	17,86	16,61	15,36	14,50	17,78	16,12	14,69	13,37	12,64	11,85
09:00	28,83	24,27	20,25	17,95	16,03	14,81	22,48	19,06	16,36	14,26	13,08	12,05
10:00	34,20	28,54	23,21	19,87	17,15	15,39	27,09	22,55	18,68	15,67	13,91	12,45
11:00	37,27	31,72	25,81	21,78	18,40	16,11	30,28	25,38	20,88	17,20	14,92	13,00
12:00	38,19	33,18	27,41	23,20	19,47	16,75	31,64	27,14	22,58	18,53	15,85	13,57
13:00	38,19	33,78	28,30	24,10	20,19	17,25	31,67	27,72	23,45	19,38	16,54	14,02
14:00	41,01	36,74	31,30	26,19	22,01	18,16	34,80	30,84	26,12	21,88	18,15	15,22
15:00	40,15	37,07	32,41	27,32	23,39	19,28	33,55	31,01	27,63	23,26	19,60	16,51
16:00	36,08	34,16	31,64	27,62	24,01	19,91	30,13	28,88	27,43	23,96	20,54	17,71
17:00	30,02	30,33	29,32	26,32	23,34	19,63	25,10	25,63	25,37	22,80	19,94	17,44
18:00	26,09	26,72	26,53	24,47	22,24	19,09	22,81	23,13	23,20	21,31	19,04	16,98
19:00	25,02	25,11	24,82	23,05	21,23	18,53	21,76	21,80	21,85	20,19	18,23	16,52
20:00	23,93	23,97	23,66	22,09	20,49	18,09	20,91	20,90	20,92	19,41	17,66	16,17
21:00	23,09	23,09	22,82	21,37	19,96	17,77	20,21	20,16	20,22	18,82	17,23	15,89
22:00	22,24	22,30	22,12	20,81	19,54	17,50	19,25	19,38	19,56	18,33	16,88	15,67
23:00	21,57	21,64	21,53	20,36	19,19	17,29	18,75	18,83	19,03	17,90	16,58	15,47

Fonte: Autor

Apêndice A₄ – Temperaturas (°C) da hipótese ISD de julho e agosto

Hora\Prof. (cm)	JULHO						AGOSTO					
	0	3	6	9	12	15	0	3	6	9	12	15
00:00	18,46	18,65	18,38	16,37	14,80	14,20	16,34	16,16	15,18	13,63	13,58	13,38
01:00	17,78	18,13	17,97	16,08	14,61	14,08	16,15	15,94	14,97	13,46	13,44	13,29
02:00	17,45	17,75	17,61	15,82	14,42	13,95	15,85	15,70	14,79	13,32	13,33	13,20
03:00	17,06	17,40	17,30	15,59	14,26	13,82	15,54	15,45	14,60	13,18	13,21	13,12
04:00	16,69	17,08	17,05	15,38	14,10	13,73	15,27	15,21	14,39	13,04	13,10	13,04
05:00	16,24	16,75	16,76	15,18	13,96	13,62	15,03	14,99	14,23	12,90	12,99	12,95
06:00	16,46	16,69	16,60	15,03	13,83	13,52	15,16	14,97	14,13	12,81	12,90	12,87
07:00	17,37	17,09	16,73	15,02	13,77	13,45	16,48	15,56	14,33	12,84	12,88	12,83
08:00	20,73	18,85	17,56	15,35	13,88	13,47	19,68	17,36	15,24	13,25	13,06	12,89
09:00	25,77	22,13	19,49	16,34	14,36	13,68	23,33	19,84	16,74	14,10	13,54	13,13
10:00	30,29	25,59	21,95	17,82	15,19	14,12	26,71	22,42	18,53	15,20	14,24	13,53
11:00	33,25	28,42	24,25	19,38	16,17	14,69	29,24	24,73	20,29	16,39	15,07	14,01
12:00	34,47	30,00	25,85	20,62	17,05	15,24	30,21	25,97	21,50	17,34	15,81	14,49
13:00	34,59	30,70	26,80	21,47	17,70	15,69	30,34	26,54	22,21	18,00	16,35	14,88
14:00	36,70	32,84	28,48	23,33	19,42	16,78	33,48	29,00	24,38	20,04	18,17	16,20
15:00	35,02	32,80	29,10	24,73	20,61	17,77	32,42	30,06	27,05	22,57	20,18	17,34
16:00	32,16	30,99	28,79	24,89	21,53	18,52	30,80	28,62	26,89	24,51	22,36	18,64
17:00	27,45	27,99	26,95	23,87	21,01	18,30	27,13	26,21	25,32	23,55	21,81	18,41
18:00	25,17	25,52	24,92	22,52	20,19	17,89	24,07	23,75	23,47	22,29	21,03	18,03
19:00	23,94	24,18	23,61	21,47	19,47	17,48	22,91	22,33	22,11	21,18	20,23	17,59
20:00	23,21	23,28	22,71	20,70	18,90	17,13	22,12	21,44	21,19	20,38	19,61	17,23
21:00	22,32	22,45	21,97	20,14	18,47	16,88	21,55	20,83	20,56	19,83	19,18	16,97
22:00	21,71	21,83	21,40	19,69	18,14	16,67	21,04	20,32	20,07	19,40	18,85	16,76
23:00	20,84	21,13	20,85	19,26	17,86	16,48	20,65	19,90	19,67	19,06	18,58	16,60

Fonte: Autor

Apêndice A₅ – Temperaturas (°C) da hipótese ISD de setembro e outubro

Hora\Prof. (cm)	SETEMBRO						OUTUBRO					
	0	3	6	9	12	15	0	3	6	9	12	15
00:00	18,50	19,13	18,20	16,24	16,24	15,89	24,04	24,14	23,30	21,87	20,25	19,45
01:00	18,16	18,78	17,89	15,99	16,04	15,74	23,73	23,78	22,95	21,57	20,02	19,28
02:00	17,91	18,51	17,62	15,78	15,86	15,62	23,50	23,55	22,70	21,36	19,83	19,14
03:00	17,42	18,13	17,37	15,59	15,72	15,51	23,51	23,45	22,55	21,19	19,70	19,02
04:00	17,40	17,98	17,18	15,43	15,57	15,39	23,53	23,39	22,45	21,08	19,59	18,92
05:00	17,33	17,88	17,04	15,32	15,46	15,29	23,46	23,33	22,37	20,99	19,51	18,84
06:00	17,64	17,97	17,03	15,25	15,38	15,21	24,54	23,68	22,45	20,98	19,45	18,78
07:00	20,65	19,40	17,56	15,42	15,41	15,20	29,47	26,32	23,65	21,49	19,63	18,81
08:00	25,96	22,75	19,37	16,29	15,83	15,36	35,37	30,24	26,02	22,81	20,30	19,11
09:00	31,11	26,63	21,89	17,75	16,70	15,81	41,20	34,76	29,10	24,72	21,39	19,69
10:00	34,98	30,11	24,48	19,42	17,82	16,46	44,88	38,11	31,81	26,67	22,66	20,44
11:00	37,24	32,43	26,49	20,89	18,91	17,13	46,89	40,45	33,94	28,33	23,82	21,14
12:00	38,40	33,91	27,93	22,02	19,81	17,72	47,87	41,60	35,22	29,49	24,70	21,74
13:00	38,66	34,69	28,85	22,82	20,48	18,18	48,79	42,69	36,26	30,37	25,38	22,19
14:00	40,70	36,62	30,92	25,53	22,78	19,86	50,51	45,20	39,09	33,04	27,74	24,18
15:00	39,66	37,03	32,89	27,37	24,06	21,03	47,41	44,28	39,99	34,93	29,37	25,22
16:00	37,49	35,01	32,31	28,63	25,68	22,60	43,56	42,24	40,13	35,99	30,80	26,42
17:00	32,94	32,09	30,53	27,61	25,13	22,36	38,98	39,22	38,28	34,94	30,29	26,22
18:00	27,17	28,15	27,95	26,02	24,23	21,91	33,02	35,10	35,52	33,23	29,35	25,79
19:00	24,96	25,52	25,54	24,25	23,02	21,25	27,89	30,64	32,11	30,95	28,00	25,09
20:00	23,73	24,05	24,06	22,98	22,06	20,66	26,05	28,23	29,62	28,92	26,60	24,28
21:00	22,87	23,05	23,03	22,06	21,34	20,19	25,65	27,19	28,26	27,61	25,57	23,64
22:00	22,31	22,36	22,30	21,42	20,83	19,85	25,35	26,57	27,46	26,81	24,93	23,20
23:00	21,74	21,78	21,74	20,95	20,43	19,59	24,79	25,98	26,85	26,26	24,50	22,90

Fonte: Autor

Apêndice A₆ – Temperaturas (°C) da hipótese ISD de novembro e dezembro

Hora\Prof. (cm)	NOVEMBRO						DEZEMBRO					
	0	3	6	9	12	15	0	3	6	9	12	15
00:00	29,22	30,00	29,14	26,66	24,03	22,01	31,95	32,17	30,81	27,71	25,87	25,87
01:00	28,82	29,59	28,76	26,37	23,81	21,84	32,01	32,09	30,63	27,52	25,68	25,70
02:00	28,70	29,39	28,52	26,13	23,62	21,70	31,70	31,83	30,45	27,35	25,54	25,58
03:00	28,46	29,16	28,31	25,95	23,47	21,58	31,83	31,82	30,34	27,23	25,42	25,45
04:00	28,31	28,98	28,13	25,80	23,33	21,48	31,73	31,70	30,24	27,13	25,32	25,37
05:00	28,44	28,98	28,04	25,68	23,22	21,39	32,03	31,82	30,25	27,08	25,25	25,27
06:00	30,85	30,04	28,40	25,76	23,20	21,33	34,80	33,12	30,73	27,24	25,27	25,24
07:00	35,39	32,85	29,92	26,48	23,49	21,41	39,49	35,95	32,29	28,00	25,60	25,37
08:00	40,61	36,61	32,32	27,85	24,21	21,74	45,61	40,31	34,99	29,48	26,39	25,76
09:00	45,43	40,35	35,00	29,57	25,21	22,26	50,57	44,07	37,74	31,25	27,49	26,40
10:00	49,49	44,03	37,80	31,46	26,37	22,90	55,41	48,29	40,82	33,25	28,74	27,14
11:00	51,60	46,40	39,97	33,09	27,48	23,54	57,93	51,02	43,22	35,04	29,99	27,94
12:00	52,92	47,83	41,44	34,32	28,36	24,10	59,17	52,57	44,85	36,37	30,98	28,61
13:00	53,47	48,91	42,55	35,25	29,05	24,55	59,21	53,41	45,89	37,28	31,72	29,14
14:00	56,40	51,21	45,05	37,60	30,90	27,04	61,92	54,70	47,31	39,38	33,62	30,88
15:00	54,10	51,24	46,29	39,89	33,02	29,73	59,91	55,45	49,13	41,82	35,54	32,61
16:00	50,49	48,85	45,64	41,41	34,85	31,07	58,01	54,31	49,21	43,62	38,28	34,22
17:00	46,25	46,03	43,92	40,43	34,39	30,90	53,36	51,23	47,34	42,56	37,76	34,01
18:00	40,99	42,27	41,43	38,88	33,56	30,50	47,58	47,25	44,79	40,98	36,87	33,57
19:00	35,38	38,02	38,38	36,85	32,40	29,88	40,54	42,37	41,49	38,87	35,61	32,91
20:00	33,00	35,14	35,72	34,79	31,06	29,12	37,14	38,61	38,29	36,53	34,08	32,03
21:00	31,52	33,36	33,91	33,23	29,96	28,42	35,85	36,74	36,28	34,80	32,79	31,22
22:00	31,29	32,61	32,90	32,24	29,20	27,91	35,12	35,63	35,04	33,65	31,88	30,61
23:00	30,87	32,01	32,21	31,58	28,67	27,55	34,72	34,96	34,26	32,91	31,25	30,18

Fonte: Autor

APÊNDICE B

Apêndice B₁ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações TC com 5 cm de espessura de revestimento (continua)

Mistura	T (°C)	Tempo (meses)								
		0	1	6	12	24	36	60	120	180
CA-50/70-HB	0	0,000	0,681	0,897	0,927	0,953	0,966	0,979	0,993	0,995
	5	0,000	0,648	0,876	0,913	0,940	0,954	0,969	0,987	0,992
	10	0,000	0,593	0,850	0,895	0,926	0,938	0,954	0,974	0,984
	15	0,000	0,524	0,795	0,876	0,906	0,921	0,937	0,958	0,970
	20	0,000	0,420	0,700	0,818	0,872	0,894	0,920	0,941	0,952
	25	0,000	0,302	0,574	0,702	0,807	0,838	0,874	0,903	0,924
	30	0,000	0,180	0,419	0,540	0,668	0,741	0,791	0,843	0,876
	35	0,000	0,060	0,212	0,315	0,435	0,514	0,622	0,737	0,775
	40	0,000	0,016	0,089	0,142	0,219	0,281	0,377	0,507	0,600
	45	0,000	0,003	0,022	0,044	0,081	0,106	0,152	0,246	0,326
50	0,000	0,001	0,007	0,014	0,028	0,042	0,070	0,116	0,155	
CA-50/70-U4	0	0,000	0,483	0,751	0,865	0,914	0,933	0,955	0,979	0,988
	5	0,000	0,456	0,719	0,834	0,901	0,920	0,945	0,968	0,982
	10	0,000	0,424	0,677	0,788	0,878	0,906	0,928	0,954	0,968
	15	0,000	0,386	0,623	0,744	0,851	0,884	0,914	0,940	0,953
	20	0,000	0,329	0,561	0,673	0,806	0,865	0,896	0,922	0,937
	25	0,000	0,256	0,490	0,597	0,730	0,807	0,859	0,903	0,920
	30	0,000	0,168	0,386	0,507	0,617	0,698	0,793	0,850	0,876
	35	0,000	0,075	0,244	0,342	0,464	0,538	0,628	0,757	0,795
	40	0,000	0,017	0,108	0,162	0,245	0,307	0,397	0,535	0,624
	45	0,000	0,004	0,024	0,050	0,092	0,122	0,173	0,271	0,348
50	0,000	0,001	0,005	0,011	0,023	0,035	0,058	0,103	0,136	
CA-50/70-U8	0	0,000	0,643	0,895	0,931	0,962	0,975	0,987	0,994	0,995
	5	0,000	0,604	0,872	0,918	0,949	0,964	0,982	0,993	0,994
	10	0,000	0,544	0,827	0,898	0,932	0,950	0,966	0,988	0,993
	15	0,000	0,477	0,755	0,859	0,909	0,927	0,947	0,970	0,981
	20	0,000	0,396	0,648	0,779	0,872	0,898	0,919	0,945	0,958
	25	0,000	0,283	0,524	0,638	0,774	0,834	0,874	0,913	0,928
	30	0,000	0,164	0,371	0,493	0,604	0,684	0,781	0,840	0,871
	35	0,000	0,059	0,206	0,290	0,408	0,483	0,572	0,710	0,768
	40	0,000	0,012	0,078	0,132	0,198	0,253	0,342	0,466	0,549
	45	0,000	0,003	0,020	0,041	0,080	0,108	0,155	0,246	0,320
50	0,000	0,001	0,007	0,013	0,027	0,042	0,070	0,117	0,158	

Apêndice B₁ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações TC com 5 cm de espessura de revestimento (continuação)

Mistura	T (°C)	Tempo (meses)								
		0	1	6	12	24	36	60	120	180
CA-RAP30	0	0,000	0,628	0,889	0,928	0,961	0,973	0,988	0,995	0,997
	5	0,000	0,597	0,872	0,917	0,952	0,966	0,981	0,994	0,996
	10	0,000	0,565	0,844	0,902	0,937	0,955	0,972	0,989	0,994
	15	0,000	0,527	0,798	0,879	0,916	0,937	0,956	0,979	0,987
	20	0,000	0,468	0,735	0,839	0,899	0,913	0,936	0,964	0,976
	25	0,000	0,353	0,632	0,768	0,845	0,875	0,907	0,938	0,955
	30	0,000	0,232	0,508	0,637	0,778	0,819	0,855	0,899	0,920
	35	0,000	0,105	0,312	0,444	0,598	0,698	0,775	0,833	0,871
	40	0,000	0,039	0,179	0,275	0,413	0,499	0,623	0,761	0,795
	45	0,000	0,009	0,056	0,113	0,191	0,258	0,361	0,523	0,632
	50	0,000	0,003	0,020	0,041	0,083	0,125	0,193	0,320	0,412
CA-SBS-U2 (N estendido)	0	0,000	0,478	0,678	0,764	0,859	0,887	0,911	0,937	0,951
	5	0,000	0,456	0,651	0,729	0,831	0,869	0,898	0,925	0,940
	10	0,000	0,429	0,616	0,699	0,795	0,844	0,881	0,910	0,925
	15	0,000	0,390	0,573	0,667	0,769	0,822	0,865	0,900	0,915
	20	0,000	0,340	0,519	0,609	0,720	0,790	0,851	0,888	0,902
	25	0,000	0,264	0,450	0,540	0,639	0,711	0,799	0,863	0,888
	30	0,000	0,188	0,360	0,460	0,553	0,617	0,710	0,809	0,836
	35	0,000	0,107	0,260	0,343	0,452	0,509	0,578	0,700	0,766
	40	0,000	0,048	0,162	0,221	0,301	0,360	0,441	0,545	0,615
	45	0,000	0,011	0,074	0,115	0,170	0,205	0,267	0,374	0,439
50	0,000	0,003	0,019	0,039	0,078	0,104	0,140	0,203	0,258	
CA-SBS-U6 (N estendido)	0	0,000	0,488	0,701	0,797	0,876	0,896	0,916	0,941	0,953
	5	0,000	0,447	0,671	0,756	0,853	0,881	0,904	0,931	0,944
	10	0,000	0,408	0,616	0,706	0,808	0,852	0,885	0,913	0,928
	15	0,000	0,372	0,542	0,635	0,742	0,804	0,852	0,891	0,908
	20	0,000	0,316	0,479	0,562	0,665	0,735	0,815	0,872	0,889
	25	0,000	0,234	0,407	0,495	0,586	0,652	0,744	0,821	0,849
	30	0,000	0,143	0,296	0,390	0,488	0,542	0,619	0,746	0,790
	35	0,000	0,061	0,189	0,253	0,342	0,408	0,486	0,587	0,655
	40	0,000	0,014	0,084	0,134	0,189	0,233	0,306	0,416	0,479
	45	0,000	0,004	0,024	0,049	0,093	0,123	0,161	0,238	0,305
50	0,000	0,001	0,009	0,018	0,036	0,055	0,083	0,135	0,174	

Apêndice B₁ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações TC com 5 cm de espessura de revestimento (conclusão)

Mistura	T (°C)	Tempo (meses)								
		0	1	6	12	24	36	60	120	180
CA-BOR (N estendido)	0	0,000	0,217	0,322	0,358	0,408	0,440	0,491	0,567	0,612
	5	0,000	0,199	0,305	0,347	0,398	0,437	0,492	0,565	0,613
	10	0,000	0,166	0,255	0,305	0,361	0,395	0,445	0,520	0,564
	15	0,000	0,110	0,195	0,233	0,288	0,322	0,369	0,448	0,489
	20	0,000	0,053	0,121	0,152	0,194	0,223	0,258	0,318	0,361
	25	0,000	0,010	0,049	0,070	0,095	0,120	0,157	0,199	0,224
	30	0,000	0,001	0,007	0,015	0,029	0,041	0,056	0,083	0,105
	35	0,000	0,000	0,001	0,002	0,003	0,005	0,008	0,015	0,023
	40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004
	45	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001
	50	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autor

Apêndice B₂ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações TC com 10 cm de espessura de revestimento (continua)

Mistura	T (°C)	Tempo (meses)								
		0	1	6	12	24	36	60	120	180
CA-50/70-HB	0	0,000	0,435	0,745	0,893	0,957	0,981	0,992	0,997	1,000
	5	0,000	0,408	0,695	0,849	0,938	0,969	0,988	0,995	0,998
	10	0,000	0,373	0,641	0,794	0,916	0,949	0,981	0,993	0,996
	15	0,000	0,332	0,588	0,739	0,890	0,931	0,967	0,986	0,991
	20	0,000	0,285	0,516	0,692	0,846	0,907	0,954	0,980	0,987
	25	0,000	0,202	0,424	0,580	0,746	0,829	0,912	0,964	0,980
	30	0,000	0,123	0,296	0,445	0,609	0,708	0,809	0,912	0,949
	35	0,000	0,034	0,152	0,236	0,364	0,454	0,590	0,744	0,826
	40	0,000	0,007	0,047	0,095	0,174	0,238	0,338	0,504	0,614
	45	0,000	0,002	0,013	0,026	0,052	0,079	0,131	0,236	0,320
	50	0,000	0,001	0,007	0,014	0,028	0,041	0,069	0,135	0,187
CA-50/70-U4	0	0,000	0,271	0,511	0,640	0,780	0,869	0,938	0,984	0,992
	5	0,000	0,255	0,476	0,600	0,737	0,833	0,922	0,976	0,990
	10	0,000	0,242	0,434	0,546	0,683	0,773	0,892	0,961	0,984
	15	0,000	0,228	0,399	0,504	0,639	0,730	0,853	0,944	0,974
	20	0,000	0,202	0,362	0,452	0,596	0,684	0,810	0,926	0,958
	25	0,000	0,171	0,326	0,407	0,540	0,648	0,771	0,906	0,948
	30	0,000	0,114	0,253	0,351	0,475	0,573	0,700	0,849	0,915
	35	0,000	0,047	0,167	0,233	0,335	0,430	0,555	0,728	0,811
	40	0,000	0,009	0,061	0,111	0,179	0,236	0,330	0,490	0,599
	45	0,000	0,002	0,012	0,025	0,050	0,076	0,127	0,229	0,306
	50	0,000	0,001	0,004	0,008	0,017	0,025	0,042	0,085	0,127
CA-50/70-U8	0	0,000	0,409	0,692	0,834	0,939	0,970	0,989	0,997	0,999
	5	0,000	0,369	0,650	0,791	0,924	0,958	0,986	0,995	0,997
	10	0,000	0,328	0,588	0,726	0,885	0,936	0,974	0,993	0,996
	15	0,000	0,293	0,506	0,642	0,804	0,894	0,948	0,987	0,993
	20	0,000	0,240	0,423	0,555	0,713	0,817	0,913	0,968	0,984
	25	0,000	0,184	0,348	0,441	0,600	0,710	0,827	0,933	0,963
	30	0,000	0,112	0,245	0,341	0,469	0,570	0,696	0,843	0,911
	35	0,000	0,037	0,141	0,206	0,289	0,367	0,495	0,669	0,761
	40	0,000	0,007	0,045	0,089	0,147	0,192	0,271	0,418	0,521
	45	0,000	0,002	0,011	0,022	0,044	0,067	0,112	0,206	0,283
	50	0,000	0,001	0,004	0,009	0,018	0,027	0,045	0,092	0,140

Apêndice B₂ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações TC com 10 cm de espessura de revestimento (continuação)

Mistura	T (°C)	Tempo (meses)								
		0	1	6	12	24	36	60	120	180
CA-RAP30	0	0,000	0,419	0,733	0,863	0,948	0,974	0,992	0,997	1,000
	5	0,000	0,386	0,695	0,838	0,937	0,967	0,988	0,996	0,998
	10	0,000	0,357	0,635	0,792	0,916	0,952	0,981	0,995	0,996
	15	0,000	0,326	0,573	0,728	0,884	0,929	0,967	0,988	0,995
	20	0,000	0,286	0,523	0,668	0,841	0,904	0,950	0,980	0,988
	25	0,000	0,219	0,451	0,578	0,756	0,852	0,919	0,967	0,978
	30	0,000	0,142	0,341	0,474	0,637	0,745	0,861	0,938	0,956
	35	0,000	0,076	0,224	0,320	0,474	0,579	0,725	0,871	0,917
	40	0,000	0,025	0,128	0,199	0,317	0,413	0,561	0,743	0,825
	45	0,000	0,006	0,038	0,077	0,145	0,201	0,300	0,481	0,606
	50	0,000	0,002	0,014	0,029	0,059	0,089	0,150	0,284	0,394
CA-SBS-U2 (N estendido)	0	0,000	0,269	0,427	0,515	0,611	0,670	0,763	0,889	0,928
	5	0,000	0,263	0,401	0,475	0,575	0,634	0,720	0,858	0,910
	10	0,000	0,252	0,374	0,442	0,535	0,592	0,676	0,815	0,886
	15	0,000	0,233	0,351	0,420	0,511	0,569	0,654	0,794	0,874
	20	0,000	0,205	0,326	0,383	0,481	0,550	0,635	0,786	0,866
	25	0,000	0,172	0,293	0,345	0,422	0,492	0,602	0,748	0,831
	30	0,000	0,132	0,240	0,304	0,374	0,429	0,531	0,693	0,774
	35	0,000	0,085	0,177	0,225	0,304	0,359	0,444	0,597	0,683
	40	0,000	0,032	0,112	0,158	0,204	0,240	0,310	0,452	0,543
	45	0,000	0,007	0,050	0,082	0,119	0,147	0,195	0,281	0,353
	50	0,000	0,002	0,011	0,022	0,044	0,066	0,096	0,154	0,201
CA-SBS-U6 (N estendido)	0	0,000	0,301	0,462	0,562	0,658	0,727	0,820	0,916	0,945
	5	0,000	0,261	0,426	0,515	0,616	0,679	0,775	0,895	0,930
	10	0,000	0,232	0,381	0,455	0,557	0,621	0,708	0,851	0,903
	15	0,000	0,222	0,340	0,403	0,489	0,552	0,634	0,773	0,857
	20	0,000	0,200	0,310	0,358	0,438	0,505	0,591	0,724	0,813
	25	0,000	0,165	0,279	0,328	0,393	0,454	0,554	0,706	0,789
	30	0,000	0,110	0,206	0,270	0,341	0,394	0,480	0,636	0,716
	35	0,000	0,056	0,142	0,181	0,234	0,284	0,370	0,509	0,602
	40	0,000	0,011	0,069	0,101	0,142	0,176	0,228	0,328	0,412
	45	0,000	0,002	0,015	0,031	0,063	0,085	0,120	0,191	0,248
	50	0,000	0,001	0,005	0,010	0,020	0,030	0,050	0,097	0,134

Apêndice B₂ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações TC com 10 cm de espessura de revestimento (conclusão)

Mistura	T (°C)	Tempo (meses)								
		0	1	6	12	24	36	60	120	180
CA-BOR (N estendido)	0	0,000	0,108	0,182	0,218	0,264	0,282	0,309	0,351	0,378
	5	0,000	0,109	0,182	0,220	0,265	0,282	0,309	0,351	0,388
	10	0,000	0,095	0,167	0,197	0,247	0,268	0,290	0,328	0,356
	15	0,000	0,074	0,145	0,164	0,194	0,218	0,257	0,294	0,319
	20	0,000	0,032	0,093	0,123	0,149	0,160	0,179	0,217	0,249
	25	0,000	0,006	0,046	0,068	0,084	0,095	0,115	0,148	0,160
	30	0,000	0,001	0,005	0,010	0,019	0,028	0,046	0,066	0,079
	35	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,004	0,007	0,011
	40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001
	45	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	50	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autor

Apêndice B₃ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações TC com 15 cm de espessura de revestimento (continua)

Mistura	T (°C)	Tempo (meses)								
		0	1	6	12	24	36	60	120	180
CA-50/70-HB	0	0,000	0,234	0,458	0,595	0,744	0,844	0,945	0,991	0,997
	5	0,000	0,223	0,416	0,536	0,696	0,793	0,918	0,984	0,994
	10	0,000	0,212	0,383	0,480	0,638	0,740	0,875	0,970	0,987
	15	0,000	0,193	0,350	0,436	0,580	0,688	0,832	0,955	0,978
	20	0,000	0,166	0,323	0,408	0,538	0,654	0,805	0,945	0,969
	25	0,000	0,114	0,251	0,348	0,463	0,558	0,713	0,888	0,943
	30	0,000	0,058	0,182	0,246	0,356	0,451	0,597	0,804	0,873
	35	0,000	0,014	0,089	0,136	0,212	0,274	0,374	0,580	0,712
	40	0,000	0,003	0,021	0,043	0,086	0,130	0,204	0,350	0,474
	45	0,000	0,001	0,008	0,016	0,032	0,049	0,081	0,162	0,238
	50	0,000	0,001	0,007	0,013	0,026	0,040	0,066	0,124	0,178
CA-50/70-U4	0	0,000	0,105	0,297	0,385	0,491	0,574	0,684	0,844	0,936
	5	0,000	0,100	0,271	0,358	0,456	0,532	0,651	0,812	0,911
	10	0,000	0,104	0,248	0,328	0,412	0,475	0,587	0,753	0,864
	15	0,000	0,105	0,234	0,308	0,384	0,438	0,536	0,712	0,819
	20	0,000	0,098	0,216	0,282	0,355	0,406	0,488	0,665	0,783
	25	0,000	0,082	0,193	0,250	0,331	0,380	0,459	0,633	0,757
	30	0,000	0,043	0,150	0,204	0,274	0,336	0,416	0,575	0,704
	35	0,000	0,015	0,093	0,134	0,200	0,241	0,314	0,475	0,596
	40	0,000	0,004	0,024	0,049	0,100	0,132	0,183	0,297	0,384
	45	0,000	0,001	0,006	0,012	0,024	0,037	0,063	0,127	0,191
50	0,000	0,000	0,003	0,006	0,012	0,018	0,030	0,060	0,091	
CA-50/70-U8	0	0,000	0,212	0,427	0,546	0,686	0,771	0,889	0,981	0,995
	5	0,000	0,181	0,393	0,500	0,649	0,732	0,853	0,970	0,993
	10	0,000	0,148	0,349	0,443	0,583	0,677	0,798	0,952	0,984
	15	0,000	0,136	0,303	0,386	0,495	0,590	0,720	0,905	0,962
	20	0,000	0,119	0,258	0,338	0,427	0,499	0,629	0,829	0,926
	25	0,000	0,091	0,208	0,273	0,360	0,417	0,513	0,719	0,839
	30	0,000	0,042	0,145	0,201	0,269	0,331	0,418	0,581	0,712
	35	0,000	0,013	0,079	0,117	0,175	0,216	0,279	0,421	0,536
	40	0,000	0,003	0,019	0,038	0,077	0,112	0,154	0,250	0,327
	45	0,000	0,001	0,005	0,010	0,021	0,032	0,055	0,113	0,171
50	0,000	0,000	0,002	0,005	0,010	0,016	0,027	0,057	0,087	

Apêndice B₃ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações TC com 15 cm de espessura de revestimento (continuação)

Mistura	T (°C)	Tempo (meses)								
		0	1	6	12	24	36	60	120	180
CA-RAP30	0	0,000	0,193	0,473	0,598	0,748	0,835	0,931	0,988	0,997
	5	0,000	0,158	0,436	0,565	0,713	0,805	0,914	0,983	0,994
	10	0,000	0,143	0,383	0,511	0,657	0,761	0,882	0,974	0,989
	15	0,000	0,133	0,333	0,450	0,593	0,691	0,829	0,957	0,979
	20	0,000	0,120	0,298	0,406	0,541	0,639	0,781	0,939	0,970
	25	0,000	0,098	0,251	0,341	0,463	0,557	0,699	0,902	0,949
	30	0,000	0,059	0,192	0,272	0,383	0,467	0,604	0,829	0,918
	35	0,000	0,025	0,120	0,182	0,275	0,347	0,467	0,676	0,799
	40	0,000	0,009	0,054	0,108	0,168	0,221	0,318	0,499	0,633
	45	0,000	0,003	0,018	0,036	0,073	0,111	0,179	0,308	0,421
	50	0,000	0,001	0,008	0,016	0,032	0,049	0,084	0,171	0,260
CA-SBS-U2 (N estendido)	0	0,000	0,096	0,228	0,290	0,354	0,394	0,458	0,577	0,640
	5	0,000	0,100	0,214	0,270	0,331	0,369	0,426	0,532	0,608
	10	0,000	0,103	0,205	0,255	0,309	0,342	0,387	0,482	0,557
	15	0,000	0,104	0,199	0,247	0,300	0,328	0,370	0,455	0,529
	20	0,000	0,097	0,189	0,234	0,289	0,316	0,357	0,436	0,512
	25	0,000	0,083	0,172	0,208	0,267	0,298	0,338	0,411	0,478
	30	0,000	0,058	0,145	0,179	0,222	0,262	0,311	0,384	0,444
	35	0,000	0,025	0,100	0,138	0,178	0,205	0,247	0,337	0,394
	40	0,000	0,009	0,059	0,087	0,119	0,148	0,184	0,244	0,296
	45	0,000	0,002	0,016	0,032	0,066	0,088	0,111	0,162	0,207
	50	0,000	0,001	0,004	0,008	0,017	0,026	0,043	0,087	0,117
CA-SBS-U6 (N estendido)	0	0,000	0,129	0,259	0,326	0,394	0,441	0,516	0,630	0,699
	5	0,000	0,108	0,236	0,299	0,361	0,403	0,469	0,592	0,656
	10	0,000	0,089	0,207	0,264	0,324	0,361	0,416	0,524	0,605
	15	0,000	0,096	0,192	0,237	0,294	0,323	0,366	0,448	0,519
	20	0,000	0,095	0,182	0,221	0,276	0,301	0,337	0,401	0,461
	25	0,000	0,082	0,165	0,199	0,252	0,285	0,321	0,385	0,444
	30	0,000	0,048	0,126	0,164	0,201	0,231	0,287	0,358	0,411
	35	0,000	0,015	0,080	0,107	0,153	0,174	0,208	0,281	0,348
	40	0,000	0,004	0,024	0,051	0,086	0,102	0,133	0,197	0,235
	45	0,000	0,001	0,006	0,012	0,025	0,037	0,063	0,112	0,142
	50	0,000	0,000	0,002	0,004	0,009	0,013	0,022	0,045	0,068

Apêndice B₃ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações TC com 15 cm de espessura de revestimento (conclusão)

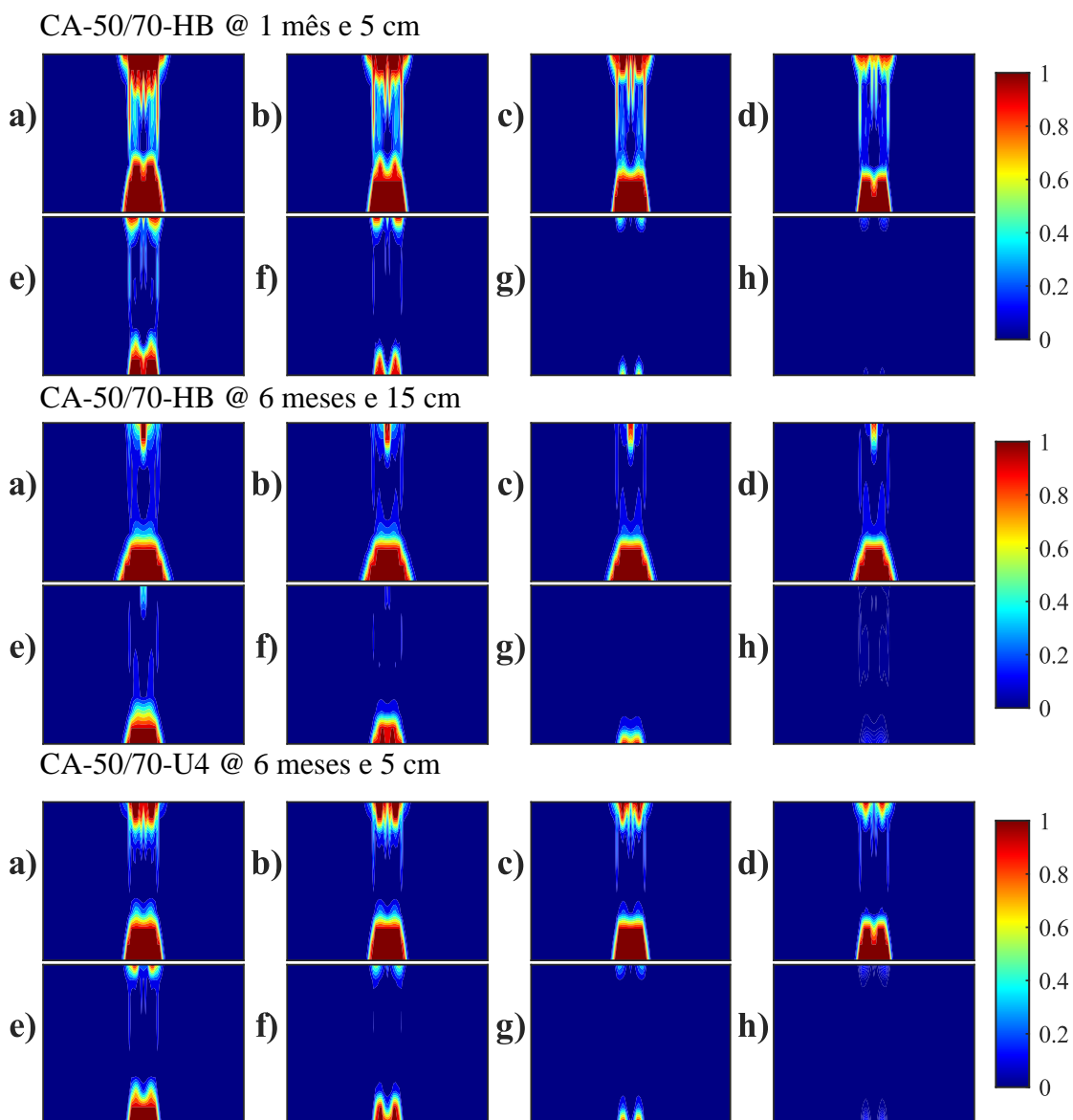
Mistura	T (°C)	Tempo (meses)								
		0	1	6	12	24	36	60	120	180
CA-BOR (N estendido)	0	0,000	0,016	0,074	0,093	0,123	0,146	0,166	0,196	0,219
	5	0,000	0,021	0,080	0,102	0,139	0,155	0,174	0,208	0,234
	10	0,000	0,018	0,078	0,098	0,133	0,150	0,169	0,199	0,225
	15	0,000	0,011	0,066	0,082	0,105	0,127	0,149	0,175	0,192
	20	0,000	0,004	0,029	0,059	0,075	0,086	0,102	0,138	0,153
	25	0,000	0,001	0,007	0,014	0,027	0,041	0,064	0,079	0,090
	30	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004	0,006	0,010	0,019	0,028
	35	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003
	40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
	45	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	50	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autor

APÊNDICE C

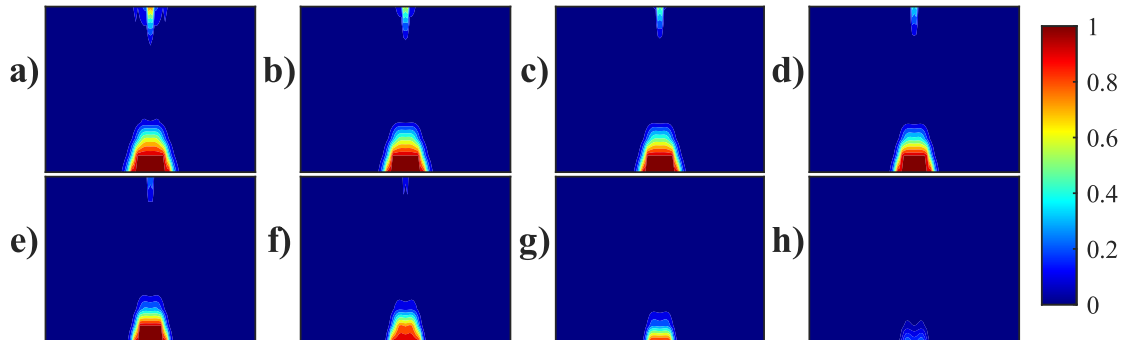
Apêndice C₁ – Distribuição do dano por fadiga ao longo da seção transversal (simulações TC)

a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C (continua)

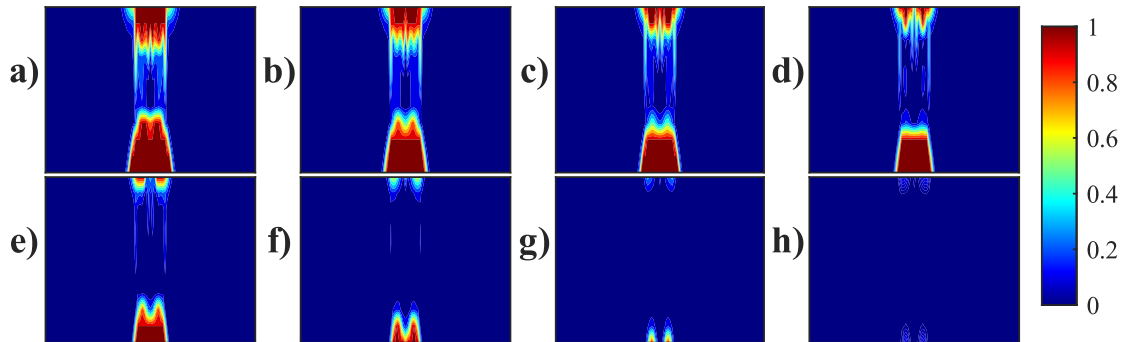


Apêndice C₁ – Distribuição do dano por fadiga ao longo da seção transversal (simulações TC)
a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C (continuação)

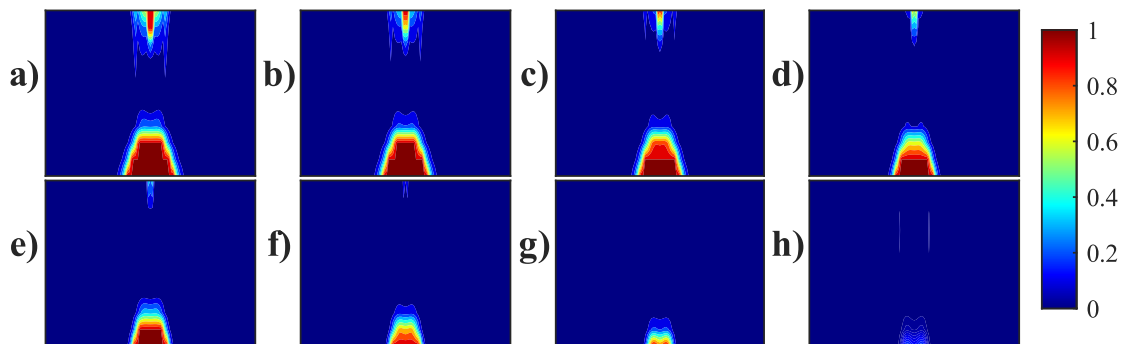
CA-50/70-U4 @ 6 meses e 15 cm



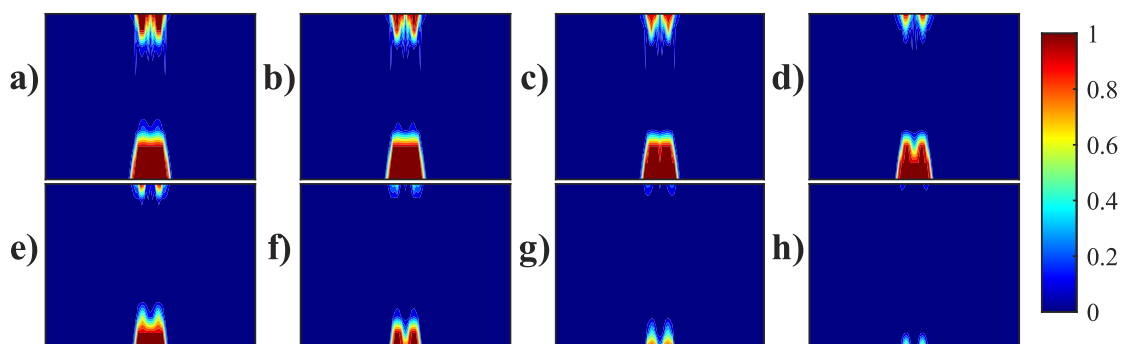
CA-50/70-U8 @ 1 mês e 5 cm



CA-50/70-U8 @ 6 meses e 15 cm



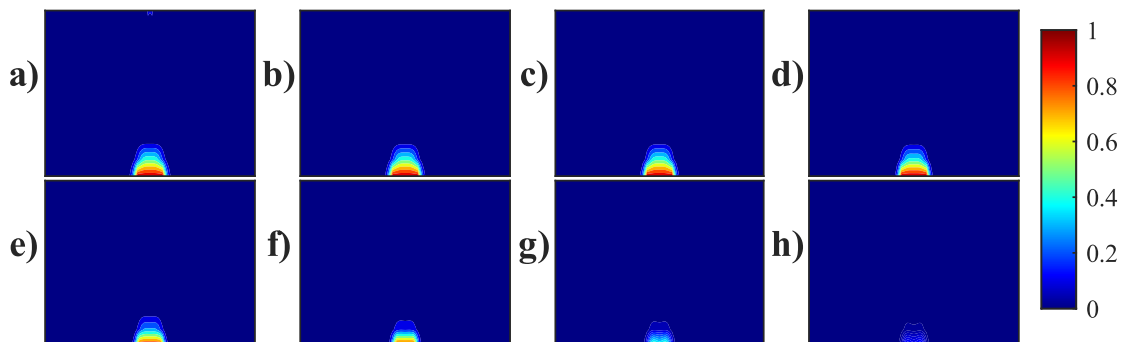
CA-SBS-U2 @ 6 meses e 5 cm



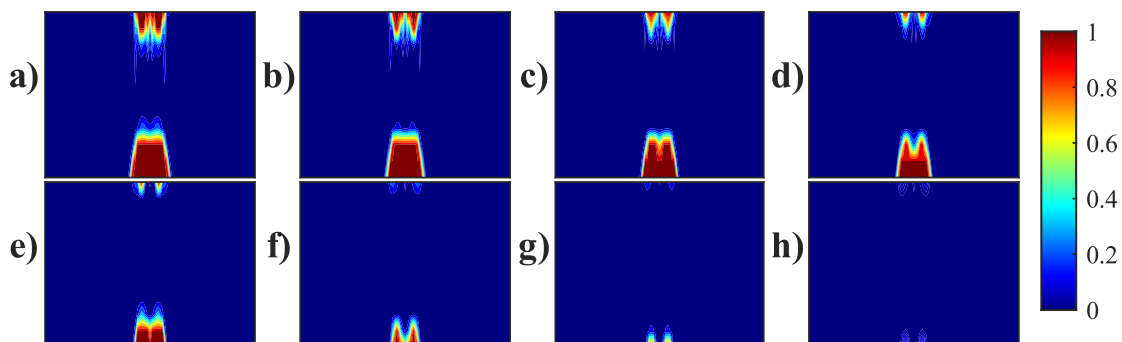
Apêndice C₁ – Distribuição do dano por fadiga ao longo da seção transversal (simulações TC)

a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C (continuação)

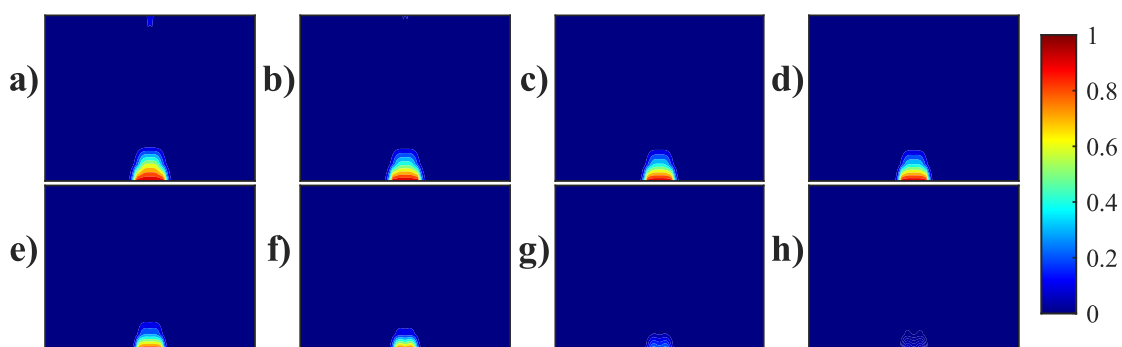
CA-SBS-U2 @ 12 meses e 15 cm



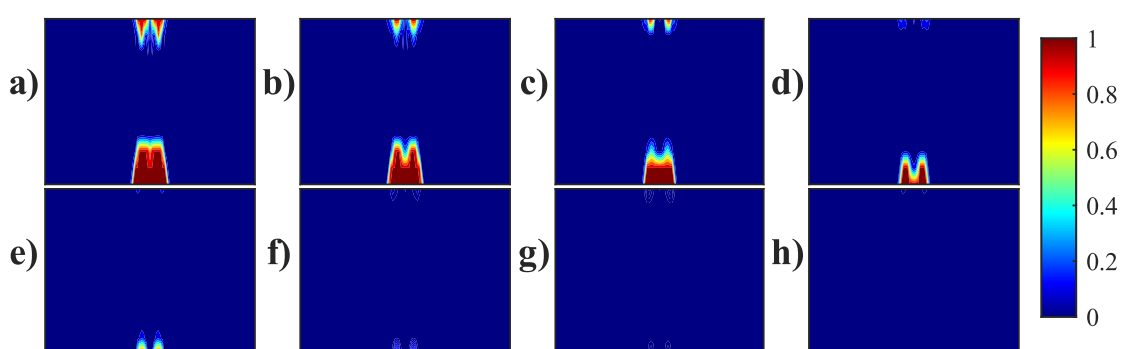
CA-SBS-U6 @ 6 meses e 5 cm



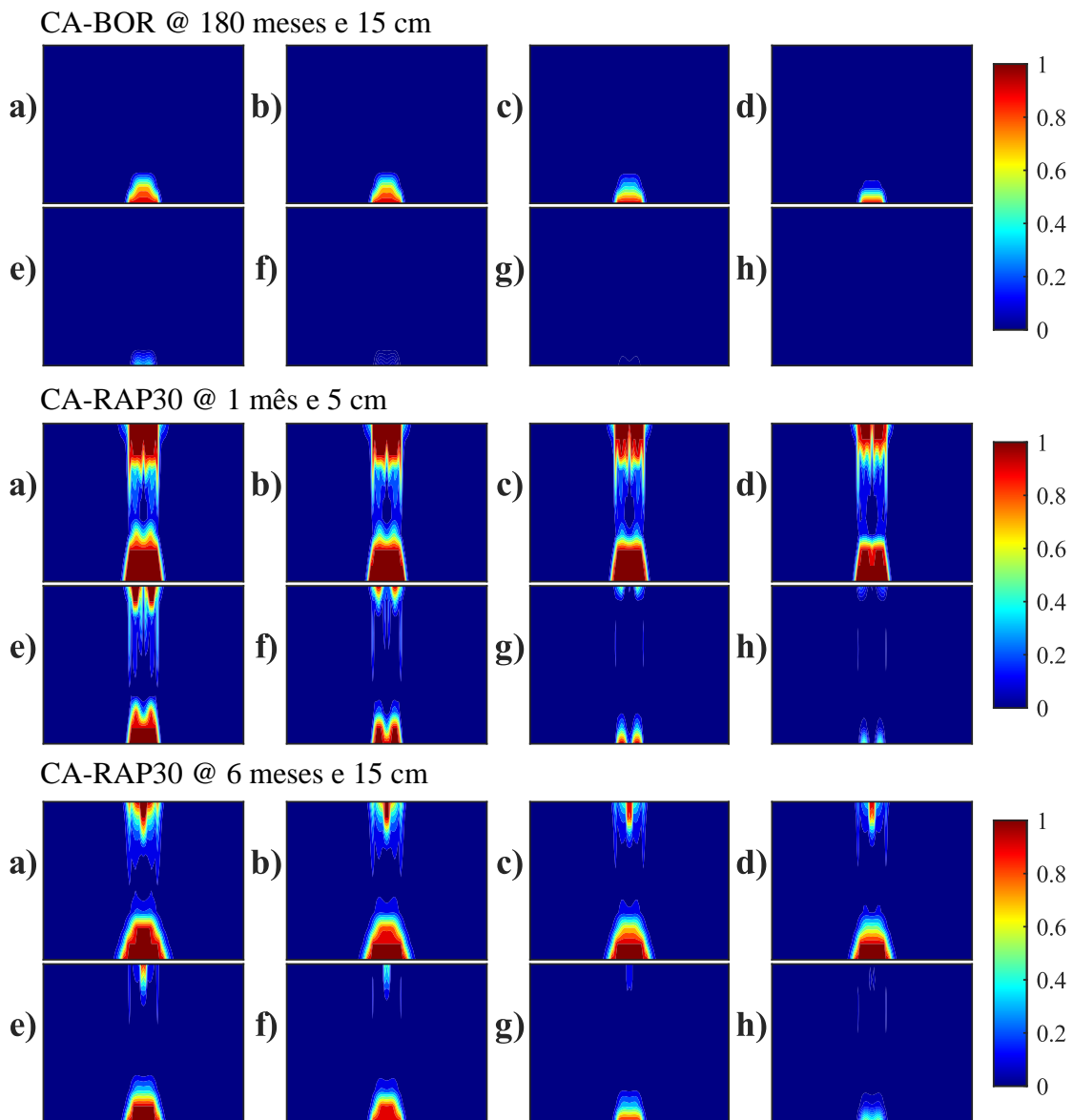
CA-SBS-U6 @ 12 meses e 15 cm



CA-BOR @ 60 meses e 5 cm



Apêndice C₁ – Distribuição do dano por fadiga ao longo da seção transversal (simulações TC)
a a) 5°C, b) 10°C, c) 15°C, d) 20°C, e) 25 °C, f) 30 °C, g) 35 °C e h) 40 °C (conclusão)



Fonte: Autor

Apêndice D₁ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações TC com 5 cm de espessura de revestimento (conclusão)

Mistura	T (°C)	Tempo (meses)									N _{30%}
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
CA-BOR (N estendido)	0	0,00	0,26	0,28	0,32	0,45	0,64	1,31	4,40	8,66	NA
	5	0,00	0,26	0,28	0,31	0,45	0,71	1,62	5,31	10,90	NA
	10	0,00	0,26	0,27	0,30	0,44	0,66	1,48	5,52	11,37	NA
	15	0,00	0,26	0,26	0,29	0,50	0,92	2,64	14,35	28,67	NA
	20	0,00	0,26	0,26	0,26	0,31	0,43	0,88	4,72	14,43	NA
	25	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,32	0,43	NA
	30	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	35	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	40	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	45	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	50	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA

Fonte: Autor

Apêndice D₂ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações TC com 10 cm de espessura de revestimento (conclusão)

Mistura	T (°C)	Tempo (meses)									N _{30%}
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
CA-BOR (N estendido)	0	0,00	0,26	0,28	0,39	1,03	1,70	3,71	11,47	21,06	NA
	5	0,00	0,26	0,28	0,41	1,05	1,71	3,69	11,44	25,61	NA
	10	0,00	0,26	0,27	0,31	0,68	1,16	2,18	6,33	12,74	NA
	15	0,00	0,26	0,26	0,27	0,30	0,39	0,86	2,39	4,94	NA
	20	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,39	0,72	NA
	25	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	NA
	30	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	35	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	40	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	45	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	50	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA

Fonte: Autor

Apêndice D₃ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações TC com 15 cm de espessura de revestimento (conclusão)

Mistura	T (°C)	Tempo (meses)									N _{30%}
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
CA-BOR (N estendido)	0	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,31	0,40	NA
	5	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,35	0,52	NA
	10	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,32	0,44	NA
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,30	NA
	20	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	25	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	30	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	35	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	40	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	45	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA
	50	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	NA

Fonte: Autor

APÊNDICE E

Apêndice E₁ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-HB (continua)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
ISD	5	0,000	0,302	0,503	0,560	0,659	0,730	0,802	0,854	0,882	
	6	0,000	0,287	0,487	0,555	0,664	0,729	0,799	0,867	0,897	
	7	0,000	0,267	0,468	0,536	0,658	0,732	0,802	0,883	0,916	
	8	0,000	0,251	0,432	0,510	0,632	0,714	0,801	0,891	0,925	
	9	0,000	0,236	0,390	0,462	0,596	0,677	0,772	0,879	0,927	
	10	0,000	0,222	0,359	0,422	0,549	0,644	0,749	0,862	0,923	
	11	0,000	0,209	0,329	0,384	0,497	0,583	0,702	0,831	0,909	
	12	0,000	0,198	0,302	0,353	0,454	0,535	0,652	0,794	0,872	
	13	0,000	0,187	0,273	0,323	0,413	0,490	0,603	0,755	0,831	
	14	0,000	0,177	0,250	0,292	0,379	0,446	0,559	0,724	0,801	
	15	0,000	0,166	0,232	0,267	0,347	0,406	0,510	0,682	0,770	
	DNIT	5	0,000	0,302	0,574	0,702	0,807	0,838	0,874	0,903	0,924
		6	0,000	0,283	0,570	0,706	0,812	0,854	0,889	0,931	0,946
		7	0,000	0,257	0,547	0,700	0,814	0,864	0,909	0,946	0,963
		8	0,000	0,235	0,514	0,665	0,803	0,870	0,920	0,956	0,974
9		0,000	0,219	0,474	0,629	0,777	0,852	0,922	0,963	0,978	
10		0,000	0,202	0,424	0,580	0,746	0,829	0,912	0,964	0,980	
11		0,000	0,187	0,385	0,517	0,705	0,798	0,893	0,959	0,979	
12		0,000	0,172	0,350	0,462	0,636	0,747	0,869	0,950	0,972	
13		0,000	0,150	0,318	0,419	0,571	0,691	0,830	0,940	0,965	
14		0,000	0,130	0,281	0,382	0,511	0,625	0,771	0,922	0,956	
15		0,000	0,114	0,251	0,348	0,463	0,558	0,713	0,888	0,943	
SHELL		5	0,000	0,182	0,423	0,543	0,672	0,745	0,794	0,845	0,877
		6	0,000	0,174	0,424	0,550	0,682	0,753	0,812	0,877	0,903
		7	0,000	0,162	0,401	0,545	0,687	0,755	0,828	0,889	0,916
		8	0,000	0,150	0,376	0,520	0,679	0,757	0,835	0,900	0,931
	9	0,000	0,137	0,340	0,491	0,649	0,745	0,832	0,910	0,944	
	10	0,000	0,124	0,299	0,449	0,613	0,712	0,812	0,913	0,950	
	11	0,000	0,112	0,268	0,395	0,573	0,675	0,785	0,902	0,946	
	12	0,000	0,101	0,243	0,349	0,515	0,634	0,758	0,883	0,936	
	13	0,000	0,091	0,220	0,309	0,458	0,572	0,720	0,860	0,917	
	14	0,000	0,077	0,202	0,277	0,407	0,510	0,663	0,838	0,896	
	15	0,000	0,060	0,184	0,248	0,359	0,454	0,601	0,807	0,875	

Apêndice E₁ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-HB (conclusão)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
SAN	5	0,000	0,454	0,683	0,775	0,851	0,878	0,907	0,933	0,944	
	6	0,000	0,428	0,672	0,768	0,859	0,899	0,922	0,945	0,957	
	7	0,000	0,397	0,643	0,751	0,862	0,899	0,930	0,958	0,973	
	8	0,000	0,359	0,607	0,719	0,846	0,897	0,936	0,969	0,978	
	9	0,000	0,329	0,551	0,680	0,820	0,883	0,938	0,973	0,980	
	10	0,000	0,304	0,488	0,617	0,779	0,862	0,927	0,969	0,980	
	11	0,000	0,275	0,439	0,555	0,727	0,824	0,916	0,965	0,979	
	12	0,000	0,243	0,403	0,497	0,669	0,776	0,891	0,961	0,977	
	13	0,000	0,219	0,370	0,449	0,606	0,716	0,845	0,948	0,967	
	14	0,000	0,197	0,340	0,410	0,541	0,653	0,796	0,931	0,960	
	15	0,000	0,178	0,310	0,374	0,484	0,583	0,736	0,900	0,949	
	CHE	5	0,000	0,653	0,870	0,891	0,920	0,931	0,947	0,967	0,976
		6	0,000	0,605	0,866	0,898	0,926	0,942	0,960	0,979	0,989
		7	0,000	0,562	0,843	0,890	0,928	0,948	0,969	0,987	0,992
		8	0,000	0,503	0,791	0,866	0,922	0,948	0,974	0,989	0,993
9		0,000	0,457	0,736	0,829	0,913	0,942	0,975	0,990	0,994	
10		0,000	0,411	0,683	0,779	0,899	0,934	0,972	0,989	0,994	
11		0,000	0,367	0,626	0,720	0,869	0,923	0,965	0,988	0,994	
12		0,000	0,331	0,567	0,661	0,816	0,898	0,956	0,987	0,993	
13		0,000	0,297	0,503	0,595	0,755	0,851	0,936	0,983	0,992	
14		0,000	0,258	0,449	0,526	0,688	0,791	0,908	0,974	0,989	
15		0,000	0,226	0,405	0,467	0,611	0,722	0,859	0,966	0,985	
PHO		5	0,000	0,453	0,618	0,676	0,783	0,830	0,866	0,907	0,929
		6	0,000	0,429	0,602	0,666	0,774	0,827	0,880	0,923	0,939
		7	0,000	0,398	0,570	0,638	0,757	0,819	0,885	0,928	0,946
		8	0,000	0,358	0,534	0,607	0,732	0,802	0,881	0,935	0,953
	9	0,000	0,329	0,476	0,559	0,699	0,771	0,862	0,936	0,958	
	10	0,000	0,304	0,427	0,499	0,643	0,729	0,831	0,927	0,956	
	11	0,000	0,274	0,391	0,450	0,584	0,677	0,790	0,917	0,952	
	12	0,000	0,243	0,360	0,413	0,530	0,626	0,743	0,894	0,942	
	13	0,000	0,218	0,331	0,379	0,480	0,568	0,693	0,852	0,919	
	14	0,000	0,196	0,300	0,347	0,438	0,513	0,642	0,811	0,891	
	15	0,000	0,177	0,266	0,313	0,401	0,468	0,583	0,765	0,859	

Fonte: Autor

Apêndice E₂ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-U4 (continua)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
ISD	5	0,000	0,240	0,394	0,459	0,565	0,625	0,720	0,832	0,863	
	6	0,000	0,223	0,378	0,437	0,547	0,611	0,711	0,824	0,875	
	7	0,000	0,212	0,345	0,406	0,520	0,595	0,701	0,818	0,880	
	8	0,000	0,201	0,321	0,372	0,475	0,553	0,669	0,803	0,878	
	9	0,000	0,190	0,297	0,346	0,436	0,512	0,622	0,775	0,850	
	10	0,000	0,178	0,269	0,318	0,398	0,462	0,567	0,729	0,823	
	11	0,000	0,166	0,246	0,288	0,368	0,423	0,518	0,679	0,779	
	12	0,000	0,149	0,225	0,262	0,339	0,390	0,475	0,633	0,735	
	13	0,000	0,130	0,208	0,241	0,305	0,357	0,433	0,579	0,685	
	14	0,000	0,115	0,194	0,222	0,275	0,324	0,395	0,529	0,631	
	15	0,000	0,102	0,181	0,207	0,251	0,291	0,360	0,482	0,577	
	DNIT	5	0,000	0,256	0,490	0,597	0,730	0,807	0,859	0,903	0,920
		6	0,000	0,234	0,457	0,582	0,720	0,800	0,871	0,916	0,932
		7	0,000	0,216	0,434	0,554	0,698	0,785	0,865	0,922	0,944
		8	0,000	0,201	0,388	0,510	0,654	0,747	0,848	0,925	0,950
9		0,000	0,186	0,353	0,451	0,609	0,701	0,812	0,920	0,952	
10		0,000	0,171	0,326	0,407	0,540	0,648	0,771	0,906	0,948	
11		0,000	0,149	0,300	0,374	0,480	0,578	0,718	0,879	0,936	
12		0,000	0,128	0,267	0,343	0,433	0,513	0,649	0,835	0,917	
13		0,000	0,110	0,237	0,316	0,396	0,459	0,576	0,774	0,878	
14		0,000	0,096	0,214	0,283	0,362	0,416	0,511	0,709	0,825	
15		0,000	0,082	0,193	0,250	0,331	0,380	0,459	0,633	0,757	
SHELL		5	0,000	0,170	0,388	0,509	0,620	0,701	0,795	0,852	0,876
		6	0,000	0,161	0,369	0,494	0,617	0,703	0,790	0,869	0,896
		7	0,000	0,154	0,349	0,466	0,603	0,696	0,789	0,880	0,914
		8	0,000	0,142	0,315	0,436	0,573	0,666	0,778	0,887	0,922
	9	0,000	0,128	0,283	0,390	0,533	0,621	0,741	0,878	0,925	
	10	0,000	0,115	0,255	0,353	0,476	0,575	0,702	0,851	0,916	
	11	0,000	0,102	0,231	0,319	0,426	0,512	0,654	0,817	0,895	
	12	0,000	0,091	0,210	0,283	0,386	0,457	0,583	0,775	0,865	
	13	0,000	0,076	0,191	0,251	0,349	0,410	0,512	0,718	0,826	
	14	0,000	0,058	0,175	0,228	0,313	0,373	0,462	0,651	0,773	
	15	0,000	0,044	0,151	0,205	0,275	0,338	0,417	0,576	0,705	

Apêndice E₂ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-U4 (conclusão)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
SAN	5	0,000	0,342	0,544	0,629	0,757	0,826	0,882	0,914	0,928	
	6	0,000	0,325	0,517	0,614	0,748	0,822	0,884	0,925	0,943	
	7	0,000	0,296	0,472	0,575	0,714	0,794	0,876	0,932	0,952	
	8	0,000	0,262	0,432	0,523	0,663	0,752	0,853	0,932	0,956	
	9	0,000	0,233	0,389	0,475	0,616	0,707	0,821	0,923	0,953	
	10	0,000	0,208	0,355	0,425	0,558	0,654	0,777	0,913	0,950	
	11	0,000	0,187	0,326	0,387	0,494	0,589	0,719	0,885	0,938	
	12	0,000	0,165	0,300	0,356	0,445	0,523	0,660	0,841	0,921	
	13	0,000	0,138	0,265	0,327	0,405	0,469	0,587	0,785	0,886	
	14	0,000	0,117	0,235	0,297	0,371	0,425	0,520	0,718	0,837	
	15	0,000	0,100	0,211	0,263	0,340	0,388	0,465	0,642	0,767	
	CHE	5	0,000	0,465	0,711	0,779	0,863	0,892	0,921	0,945	0,960
		6	0,000	0,431	0,663	0,737	0,854	0,895	0,923	0,957	0,971
		7	0,000	0,391	0,619	0,692	0,821	0,880	0,920	0,963	0,978
		8	0,000	0,353	0,569	0,643	0,769	0,848	0,909	0,964	0,982
9		0,000	0,306	0,511	0,592	0,719	0,808	0,899	0,959	0,982	
10		0,000	0,261	0,463	0,535	0,665	0,751	0,867	0,949	0,980	
11		0,000	0,226	0,414	0,478	0,608	0,694	0,814	0,937	0,972	
12		0,000	0,194	0,373	0,428	0,546	0,634	0,753	0,913	0,959	
13		0,000	0,160	0,339	0,389	0,485	0,568	0,691	0,868	0,940	
14		0,000	0,134	0,303	0,354	0,436	0,505	0,623	0,804	0,910	
15		0,000	0,112	0,266	0,322	0,398	0,453	0,553	0,738	0,849	
PHO		5	0,000	0,340	0,487	0,551	0,648	0,717	0,801	0,880	0,907
		6	0,000	0,324	0,461	0,529	0,637	0,709	0,801	0,886	0,918
		7	0,000	0,295	0,423	0,485	0,599	0,673	0,770	0,878	0,916
		8	0,000	0,261	0,387	0,444	0,558	0,636	0,741	0,870	0,917
	9	0,000	0,232	0,350	0,402	0,510	0,594	0,704	0,847	0,906	
	10	0,000	0,208	0,322	0,368	0,458	0,538	0,659	0,811	0,890	
	11	0,000	0,187	0,296	0,338	0,417	0,482	0,598	0,767	0,856	
	12	0,000	0,164	0,260	0,311	0,383	0,439	0,540	0,721	0,820	
	13	0,000	0,137	0,231	0,276	0,352	0,403	0,488	0,665	0,774	
	14	0,000	0,117	0,209	0,245	0,322	0,370	0,445	0,602	0,720	
	15	0,000	0,100	0,189	0,221	0,285	0,338	0,407	0,540	0,657	

Fonte: Autor

Apêndice E₃ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-U8 (continua)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
ISD	5	0,000	0,275	0,436	0,503	0,603	0,665	0,758	0,847	0,879	
	6	0,000	0,258	0,418	0,478	0,584	0,652	0,746	0,848	0,888	
	7	0,000	0,241	0,384	0,446	0,557	0,634	0,734	0,843	0,897	
	8	0,000	0,226	0,352	0,404	0,512	0,590	0,703	0,823	0,892	
	9	0,000	0,212	0,328	0,373	0,466	0,543	0,654	0,803	0,874	
	10	0,000	0,200	0,303	0,347	0,428	0,495	0,601	0,759	0,844	
	11	0,000	0,188	0,275	0,321	0,395	0,454	0,553	0,712	0,809	
	12	0,000	0,177	0,251	0,291	0,365	0,419	0,508	0,668	0,767	
	13	0,000	0,164	0,232	0,264	0,335	0,384	0,467	0,619	0,724	
	14	0,000	0,145	0,215	0,243	0,304	0,353	0,427	0,568	0,671	
	15	0,000	0,128	0,202	0,227	0,277	0,321	0,390	0,519	0,621	
	DNIT	5	0,000	0,283	0,524	0,638	0,774	0,834	0,874	0,913	0,928
		6	0,000	0,259	0,494	0,625	0,765	0,833	0,893	0,926	0,942
		7	0,000	0,236	0,467	0,595	0,750	0,827	0,890	0,935	0,955
		8	0,000	0,217	0,418	0,555	0,708	0,796	0,883	0,941	0,962
9		0,000	0,200	0,380	0,493	0,664	0,757	0,862	0,942	0,964	
10		0,000	0,184	0,348	0,441	0,600	0,710	0,827	0,933	0,963	
11		0,000	0,168	0,321	0,403	0,531	0,641	0,781	0,918	0,956	
12		0,000	0,142	0,290	0,369	0,475	0,572	0,721	0,892	0,947	
13		0,000	0,122	0,256	0,339	0,431	0,509	0,650	0,845	0,927	
14		0,000	0,105	0,230	0,309	0,394	0,458	0,576	0,786	0,892	
15		0,000	0,091	0,208	0,273	0,360	0,417	0,513	0,719	0,839	
SHELL		5	0,000	0,166	0,375	0,496	0,607	0,688	0,784	0,841	0,873
		6	0,000	0,158	0,355	0,481	0,608	0,692	0,783	0,860	0,887
		7	0,000	0,150	0,335	0,457	0,592	0,689	0,782	0,870	0,906
		8	0,000	0,139	0,302	0,426	0,564	0,659	0,770	0,879	0,918
	9	0,000	0,126	0,272	0,382	0,527	0,617	0,735	0,871	0,922	
	10	0,000	0,113	0,247	0,344	0,472	0,573	0,699	0,846	0,913	
	11	0,000	0,101	0,225	0,309	0,422	0,510	0,652	0,815	0,892	
	12	0,000	0,090	0,205	0,275	0,382	0,456	0,582	0,778	0,867	
	13	0,000	0,074	0,187	0,247	0,345	0,410	0,516	0,722	0,831	
	14	0,000	0,057	0,171	0,223	0,306	0,372	0,465	0,655	0,775	
	15	0,000	0,043	0,146	0,202	0,271	0,334	0,420	0,584	0,714	

Apêndice E₃ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-U8 (conclusão)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
SAN	5	0,000	0,424	0,642	0,732	0,843	0,875	0,907	0,933	0,948	
	6	0,000	0,398	0,617	0,709	0,831	0,876	0,913	0,946	0,960	
	7	0,000	0,369	0,565	0,668	0,795	0,859	0,915	0,953	0,969	
	8	0,000	0,332	0,512	0,615	0,758	0,838	0,910	0,956	0,975	
	9	0,000	0,299	0,468	0,563	0,710	0,802	0,894	0,953	0,977	
	10	0,000	0,261	0,417	0,506	0,658	0,752	0,869	0,949	0,973	
	11	0,000	0,230	0,379	0,451	0,593	0,695	0,820	0,937	0,966	
	12	0,000	0,205	0,348	0,410	0,526	0,630	0,766	0,918	0,959	
	13	0,000	0,182	0,319	0,375	0,473	0,558	0,704	0,884	0,945	
	14	0,000	0,153	0,285	0,345	0,430	0,499	0,629	0,832	0,920	
	15	0,000	0,129	0,252	0,313	0,392	0,451	0,556	0,767	0,881	
	CHE	5	0,000	0,628	0,862	0,889	0,920	0,937	0,954	0,976	0,985
		6	0,000	0,582	0,839	0,884	0,924	0,943	0,964	0,987	0,993
		7	0,000	0,536	0,791	0,861	0,917	0,942	0,968	0,990	0,994
		8	0,000	0,480	0,733	0,813	0,905	0,936	0,968	0,991	0,995
9		0,000	0,433	0,686	0,760	0,885	0,925	0,963	0,991	0,995	
10		0,000	0,395	0,638	0,707	0,842	0,909	0,953	0,989	0,994	
11		0,000	0,350	0,588	0,654	0,782	0,868	0,938	0,986	0,993	
12		0,000	0,309	0,528	0,598	0,721	0,810	0,916	0,980	0,992	
13		0,000	0,270	0,473	0,534	0,664	0,746	0,867	0,967	0,988	
14		0,000	0,234	0,424	0,477	0,600	0,686	0,804	0,948	0,983	
15		0,000	0,204	0,384	0,428	0,535	0,621	0,738	0,916	0,969	
PHO		5	0,000	0,421	0,580	0,636	0,739	0,801	0,861	0,908	0,924
		6	0,000	0,395	0,550	0,614	0,720	0,787	0,855	0,913	0,933
		7	0,000	0,366	0,499	0,568	0,681	0,752	0,832	0,912	0,938
		8	0,000	0,328	0,454	0,514	0,633	0,712	0,804	0,908	0,939
	9	0,000	0,296	0,410	0,469	0,588	0,667	0,771	0,892	0,935	
	10	0,000	0,259	0,372	0,420	0,527	0,614	0,724	0,864	0,920	
	11	0,000	0,229	0,340	0,384	0,473	0,551	0,675	0,828	0,903	
	12	0,000	0,204	0,312	0,352	0,431	0,496	0,612	0,785	0,874	
	13	0,000	0,181	0,277	0,323	0,395	0,452	0,550	0,738	0,836	
	14	0,000	0,152	0,244	0,286	0,362	0,413	0,497	0,672	0,786	
	15	0,000	0,128	0,219	0,253	0,328	0,378	0,454	0,604	0,727	

Fonte: Autor

Apêndice E₄ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-SBS-U2 (continua)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
ISD	5	0,000	0,120	0,184	0,206	0,251	0,287	0,334	0,411	0,474	
	6	0,000	0,118	0,173	0,191	0,232	0,270	0,320	0,401	0,455	
	7	0,000	0,111	0,165	0,181	0,216	0,245	0,290	0,364	0,423	
	8	0,000	0,102	0,158	0,173	0,202	0,226	0,268	0,336	0,383	
	9	0,000	0,093	0,151	0,164	0,190	0,210	0,245	0,313	0,352	
	10	0,000	0,083	0,142	0,156	0,180	0,196	0,225	0,286	0,327	
	11	0,000	0,075	0,123	0,147	0,169	0,184	0,208	0,259	0,301	
	12	0,000	0,063	0,106	0,129	0,159	0,173	0,194	0,237	0,269	
	13	0,000	0,044	0,094	0,113	0,148	0,163	0,182	0,217	0,244	
	14	0,000	0,030	0,085	0,100	0,130	0,153	0,171	0,201	0,225	
	15	0,000	0,021	0,076	0,090	0,115	0,136	0,161	0,189	0,208	
	DNIT	5	0,000	0,116	0,216	0,269	0,335	0,379	0,441	0,528	0,581
		6	0,000	0,111	0,198	0,256	0,316	0,354	0,411	0,502	0,562
		7	0,000	0,103	0,184	0,233	0,292	0,327	0,379	0,467	0,524
		8	0,000	0,092	0,173	0,211	0,267	0,295	0,340	0,419	0,481
9		0,000	0,082	0,161	0,192	0,243	0,273	0,307	0,366	0,416	
10		0,000	0,069	0,150	0,176	0,216	0,251	0,285	0,333	0,369	
11		0,000	0,050	0,128	0,162	0,195	0,221	0,265	0,308	0,337	
12		0,000	0,034	0,107	0,148	0,176	0,198	0,234	0,285	0,312	
13		0,000	0,023	0,091	0,123	0,160	0,179	0,206	0,264	0,288	
14		0,000	0,015	0,079	0,104	0,144	0,162	0,186	0,230	0,266	
15		0,000	0,010	0,066	0,088	0,118	0,145	0,168	0,203	0,233	
SHELL		5	0,000	0,066	0,156	0,205	0,263	0,304	0,358	0,457	0,510
		6	0,000	0,069	0,151	0,186	0,238	0,284	0,341	0,429	0,486
		7	0,000	0,068	0,148	0,177	0,219	0,258	0,312	0,403	0,464
		8	0,000	0,060	0,139	0,168	0,204	0,239	0,286	0,359	0,418
	9	0,000	0,047	0,125	0,159	0,190	0,217	0,263	0,324	0,369	
	10	0,000	0,034	0,109	0,149	0,176	0,198	0,237	0,298	0,334	
	11	0,000	0,025	0,095	0,129	0,163	0,181	0,212	0,274	0,305	
	12	0,000	0,017	0,083	0,110	0,151	0,166	0,193	0,243	0,281	
	13	0,000	0,012	0,073	0,095	0,129	0,153	0,175	0,215	0,251	
	14	0,000	0,009	0,056	0,083	0,109	0,133	0,160	0,194	0,220	
	15	0,000	0,006	0,038	0,072	0,095	0,112	0,144	0,176	0,198	

Apêndice E4 – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-SBS-U2 (continuação)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
SAN	5	0,000	0,179	0,265	0,304	0,368	0,408	0,470	0,558	0,613	
	6	0,000	0,165	0,255	0,292	0,343	0,383	0,442	0,537	0,595	
	7	0,000	0,150	0,225	0,268	0,322	0,356	0,399	0,489	0,550	
	8	0,000	0,128	0,201	0,239	0,290	0,321	0,365	0,441	0,498	
	9	0,000	0,107	0,182	0,212	0,267	0,293	0,329	0,392	0,450	
	10	0,000	0,090	0,165	0,192	0,236	0,271	0,301	0,353	0,394	
	11	0,000	0,077	0,150	0,173	0,208	0,239	0,280	0,325	0,357	
	12	0,000	0,055	0,124	0,157	0,188	0,210	0,252	0,300	0,330	
	13	0,000	0,036	0,104	0,136	0,170	0,189	0,220	0,279	0,305	
	14	0,000	0,036	0,104	0,136	0,170	0,189	0,220	0,279	0,305	
	15	0,000	0,016	0,075	0,096	0,129	0,154	0,177	0,216	0,247	
	CHE	5	0,000	0,253	0,378	0,406	0,468	0,516	0,584	0,678	0,737
		6	0,000	0,225	0,352	0,378	0,431	0,473	0,536	0,630	0,684
		7	0,000	0,191	0,323	0,345	0,391	0,429	0,486	0,591	0,644
		8	0,000	0,165	0,286	0,313	0,360	0,388	0,436	0,527	0,591
9		0,000	0,129	0,238	0,276	0,320	0,353	0,396	0,474	0,535	
10		0,000	0,103	0,205	0,234	0,288	0,315	0,355	0,428	0,481	
11		0,000	0,083	0,178	0,203	0,256	0,286	0,321	0,379	0,427	
12		0,000	0,055	0,152	0,179	0,219	0,254	0,293	0,346	0,382	
13		0,000	0,037	0,122	0,158	0,193	0,218	0,262	0,317	0,351	
14		0,000	0,024	0,100	0,129	0,172	0,193	0,227	0,290	0,321	
15		0,000	0,016	0,082	0,106	0,149	0,172	0,200	0,253	0,293	
PHO		5	0,000	0,179	0,236	0,264	0,315	0,353	0,406	0,494	0,545
		6	0,000	0,164	0,221	0,252	0,301	0,333	0,380	0,468	0,526
		7	0,000	0,149	0,198	0,224	0,277	0,310	0,355	0,428	0,486
		8	0,000	0,127	0,181	0,202	0,247	0,280	0,319	0,390	0,440
	9	0,000	0,107	0,165	0,184	0,220	0,252	0,294	0,353	0,396	
	10	0,000	0,090	0,152	0,167	0,199	0,223	0,267	0,324	0,364	
	11	0,000	0,076	0,128	0,153	0,180	0,202	0,235	0,301	0,334	
	12	0,000	0,054	0,107	0,129	0,164	0,182	0,211	0,269	0,309	
	13	0,000	0,035	0,091	0,108	0,147	0,166	0,192	0,237	0,278	
	14	0,000	0,023	0,079	0,093	0,122	0,148	0,174	0,213	0,245	
	15	0,000	0,015	0,066	0,081	0,104	0,124	0,157	0,194	0,220	

Apêndice E₄ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-SBS-U2 (continuação)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
ISD (N estendido)	5	0,000	0,257	0,379	0,431	0,517	0,571	0,645	0,760	0,817	
	6	0,000	0,242	0,363	0,410	0,500	0,555	0,636	0,754	0,810	
	7	0,000	0,222	0,332	0,380	0,466	0,526	0,611	0,733	0,796	
	8	0,000	0,205	0,304	0,342	0,415	0,481	0,570	0,703	0,767	
	9	0,000	0,192	0,284	0,316	0,377	0,428	0,514	0,659	0,736	
	10	0,000	0,180	0,259	0,294	0,346	0,388	0,461	0,594	0,681	
	11	0,000	0,168	0,232	0,267	0,322	0,358	0,419	0,543	0,629	
	12	0,000	0,155	0,211	0,239	0,296	0,330	0,382	0,487	0,572	
	13	0,000	0,137	0,193	0,217	0,263	0,302	0,349	0,438	0,513	
	14	0,000	0,117	0,180	0,200	0,236	0,268	0,318	0,398	0,457	
	15	0,000	0,101	0,167	0,186	0,216	0,240	0,286	0,360	0,415	
	DNIT (N estendido)	5	0,000	0,264	0,450	0,540	0,639	0,711	0,799	0,863	0,888
		6	0,000	0,249	0,420	0,514	0,625	0,700	0,793	0,871	0,892
		7	0,000	0,225	0,388	0,479	0,583	0,661	0,761	0,861	0,892
		8	0,000	0,204	0,348	0,431	0,544	0,616	0,715	0,838	0,886
9		0,000	0,187	0,316	0,378	0,482	0,564	0,663	0,797	0,866	
10		0,000	0,172	0,293	0,345	0,422	0,492	0,602	0,748	0,831	
11		0,000	0,158	0,273	0,319	0,379	0,434	0,532	0,682	0,775	
12		0,000	0,137	0,240	0,295	0,348	0,387	0,462	0,614	0,704	
13		0,000	0,114	0,211	0,272	0,320	0,354	0,410	0,537	0,634	
14		0,000	0,097	0,190	0,237	0,294	0,324	0,369	0,465	0,554	
15		0,000	0,083	0,172	0,208	0,267	0,298	0,338	0,411	0,478	
SHELL (N estendido)		5	0,000	0,190	0,362	0,462	0,555	0,619	0,712	0,810	0,837
		6	0,000	0,178	0,344	0,434	0,540	0,613	0,705	0,804	0,851
		7	0,000	0,169	0,316	0,408	0,517	0,586	0,686	0,804	0,858
		8	0,000	0,161	0,290	0,365	0,477	0,548	0,645	0,779	0,846
	9	0,000	0,151	0,267	0,331	0,418	0,494	0,601	0,738	0,817	
	10	0,000	0,134	0,241	0,305	0,375	0,430	0,532	0,694	0,776	
	11	0,000	0,115	0,216	0,281	0,341	0,386	0,465	0,624	0,725	
	12	0,000	0,100	0,196	0,250	0,314	0,352	0,413	0,554	0,652	
	13	0,000	0,087	0,177	0,220	0,289	0,322	0,375	0,484	0,580	
	14	0,000	0,076	0,162	0,199	0,255	0,295	0,342	0,427	0,507	
	15	0,000	0,058	0,146	0,180	0,223	0,263	0,312	0,385	0,445	

Apêndice E4 – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-SBS-U2 (conclusão)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
SAN (N estendido)	5	0,000	0,352	0,506	0,573	0,676	0,744	0,821	0,877	0,897	
	6	0,000	0,329	0,474	0,553	0,655	0,727	0,812	0,882	0,902	
	7	0,000	0,306	0,427	0,501	0,610	0,682	0,768	0,868	0,901	
	8	0,000	0,275	0,392	0,453	0,558	0,628	0,726	0,848	0,894	
	9	0,000	0,239	0,350	0,408	0,506	0,576	0,670	0,812	0,875	
	10	0,000	0,209	0,318	0,363	0,446	0,518	0,615	0,760	0,846	
	11	0,000	0,186	0,292	0,332	0,394	0,450	0,550	0,691	0,784	
	12	0,000	0,166	0,269	0,306	0,358	0,400	0,477	0,627	0,717	
	13	0,000	0,143	0,234	0,282	0,329	0,363	0,421	0,552	0,647	
	14	0,000	0,117	0,205	0,249	0,303	0,333	0,379	0,477	0,568	
	15	0,000	0,098	0,184	0,219	0,277	0,306	0,347	0,420	0,489	
	CHE (N estendido)	5	0,000	0,459	0,647	0,697	0,788	0,833	0,870	0,910	0,924
		6	0,000	0,427	0,593	0,647	0,741	0,805	0,871	0,911	0,927
		7	0,000	0,384	0,550	0,600	0,693	0,761	0,845	0,904	0,924
		8	0,000	0,349	0,489	0,547	0,637	0,700	0,796	0,889	0,917
9		0,000	0,306	0,437	0,487	0,584	0,645	0,742	0,870	0,908	
10		0,000	0,260	0,395	0,437	0,526	0,591	0,680	0,826	0,891	
11		0,000	0,219	0,350	0,388	0,467	0,529	0,619	0,759	0,849	
12		0,000	0,187	0,314	0,348	0,412	0,467	0,555	0,690	0,780	
13		0,000	0,155	0,281	0,316	0,370	0,412	0,487	0,623	0,708	
14		0,000	0,124	0,245	0,287	0,338	0,371	0,429	0,551	0,638	
15		0,000	0,101	0,212	0,251	0,307	0,340	0,385	0,482	0,561	
PHO (N estendido)		5	0,000	0,352	0,462	0,516	0,594	0,648	0,729	0,823	0,861
		6	0,000	0,329	0,432	0,487	0,575	0,633	0,718	0,822	0,862
		7	0,000	0,306	0,393	0,440	0,534	0,592	0,679	0,794	0,849
		8	0,000	0,274	0,361	0,402	0,484	0,544	0,634	0,756	0,830
	9	0,000	0,238	0,324	0,360	0,435	0,499	0,589	0,722	0,797	
	10	0,000	0,209	0,296	0,328	0,388	0,439	0,534	0,674	0,751	
	11	0,000	0,186	0,274	0,301	0,354	0,394	0,469	0,613	0,703	
	12	0,000	0,166	0,239	0,278	0,325	0,361	0,419	0,548	0,643	
	13	0,000	0,142	0,209	0,242	0,299	0,331	0,381	0,484	0,574	
	14	0,000	0,116	0,188	0,213	0,267	0,304	0,349	0,433	0,506	
	15	0,000	0,097	0,170	0,192	0,235	0,270	0,319	0,393	0,451	

Fonte: Autor

Apêndice E₅ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-SBS-U6 (continua)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
ISD	5	0,000	0,104	0,162	0,182	0,220	0,250	0,294	0,371	0,424	
	6	0,000	0,105	0,160	0,175	0,203	0,228	0,274	0,355	0,409	
	7	0,000	0,102	0,155	0,167	0,193	0,214	0,251	0,322	0,373	
	8	0,000	0,096	0,150	0,161	0,184	0,203	0,234	0,300	0,348	
	9	0,000	0,089	0,142	0,155	0,176	0,193	0,219	0,276	0,323	
	10	0,000	0,081	0,129	0,147	0,167	0,183	0,205	0,254	0,297	
	11	0,000	0,073	0,112	0,133	0,159	0,173	0,193	0,235	0,270	
	12	0,000	0,062	0,099	0,117	0,150	0,163	0,183	0,217	0,249	
	13	0,000	0,044	0,090	0,104	0,135	0,154	0,172	0,203	0,229	
	14	0,000	0,031	0,081	0,094	0,120	0,141	0,164	0,191	0,213	
	15	0,000	0,021	0,074	0,086	0,108	0,124	0,153	0,180	0,200	
	DNIT	5	0,000	0,097	0,190	0,233	0,295	0,336	0,392	0,477	0,524
		6	0,000	0,099	0,177	0,219	0,282	0,317	0,369	0,453	0,504
		7	0,000	0,094	0,169	0,203	0,260	0,293	0,343	0,425	0,480
		8	0,000	0,086	0,161	0,190	0,241	0,271	0,308	0,376	0,433
9		0,000	0,078	0,153	0,179	0,220	0,253	0,285	0,336	0,376	
10		0,000	0,067	0,142	0,166	0,200	0,229	0,268	0,311	0,342	
11		0,000	0,049	0,120	0,155	0,184	0,205	0,246	0,290	0,317	
12		0,000	0,033	0,102	0,141	0,167	0,188	0,217	0,271	0,294	
13		0,000	0,023	0,088	0,116	0,154	0,170	0,195	0,245	0,274	
14		0,000	0,015	0,077	0,099	0,136	0,155	0,176	0,214	0,249	
15		0,000	0,010	0,065	0,085	0,112	0,137	0,160	0,192	0,217	
SHELL		5	0,000	0,043	0,116	0,156	0,212	0,244	0,295	0,385	0,444
		6	0,000	0,049	0,120	0,153	0,193	0,222	0,279	0,369	0,425
		7	0,000	0,049	0,120	0,152	0,184	0,208	0,258	0,347	0,407
		8	0,000	0,042	0,113	0,148	0,176	0,197	0,240	0,314	0,367
	9	0,000	0,034	0,103	0,140	0,167	0,186	0,221	0,288	0,330	
	10	0,000	0,026	0,094	0,126	0,158	0,175	0,203	0,264	0,302	
	11	0,000	0,019	0,084	0,110	0,149	0,163	0,187	0,236	0,276	
	12	0,000	0,014	0,075	0,097	0,132	0,152	0,172	0,212	0,248	
	13	0,000	0,010	0,065	0,085	0,112	0,138	0,160	0,193	0,219	
	14	0,000	0,007	0,046	0,076	0,098	0,116	0,147	0,175	0,198	
	15	0,000	0,005	0,032	0,065	0,085	0,100	0,126	0,161	0,180	

Apêndice E₅ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-SBS-U6 (continuação)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
SAN	5	0,000	0,168	0,241	0,277	0,335	0,377	0,434	0,518	0,570	
	6	0,000	0,157	0,231	0,272	0,319	0,353	0,407	0,499	0,553	
	7	0,000	0,143	0,209	0,247	0,300	0,333	0,377	0,458	0,513	
	8	0,000	0,122	0,190	0,221	0,273	0,301	0,343	0,415	0,470	
	9	0,000	0,104	0,174	0,200	0,249	0,279	0,313	0,371	0,419	
	10	0,000	0,088	0,160	0,182	0,220	0,254	0,290	0,340	0,376	
	11	0,000	0,075	0,144	0,166	0,198	0,223	0,268	0,314	0,347	
	12	0,000	0,053	0,118	0,151	0,179	0,200	0,235	0,292	0,322	
	13	0,000	0,034	0,100	0,128	0,163	0,181	0,208	0,267	0,297	
	14	0,000	0,023	0,085	0,107	0,148	0,164	0,188	0,233	0,271	
	15	0,000	0,015	0,073	0,092	0,123	0,148	0,171	0,207	0,237	
	CHE	5	0,000	0,267	0,388	0,412	0,468	0,515	0,582	0,672	0,730
		6	0,000	0,244	0,367	0,387	0,438	0,477	0,537	0,632	0,690
		7	0,000	0,209	0,336	0,355	0,399	0,435	0,491	0,595	0,650
		8	0,000	0,181	0,307	0,326	0,367	0,395	0,443	0,534	0,601
9		0,000	0,157	0,263	0,289	0,332	0,364	0,404	0,484	0,545	
10		0,000	0,124	0,222	0,249	0,296	0,324	0,365	0,439	0,494	
11		0,000	0,100	0,192	0,213	0,263	0,293	0,330	0,392	0,443	
12		0,000	0,081	0,167	0,187	0,226	0,260	0,300	0,358	0,397	
13		0,000	0,055	0,138	0,165	0,199	0,224	0,268	0,328	0,365	
14		0,000	0,035	0,111	0,138	0,177	0,198	0,233	0,298	0,335	
15		0,000	0,022	0,091	0,112	0,155	0,176	0,205	0,261	0,302	
PHO		5	0,000	0,165	0,217	0,238	0,283	0,317	0,368	0,454	0,507
		6	0,000	0,155	0,202	0,226	0,276	0,306	0,349	0,428	0,486
		7	0,000	0,140	0,186	0,205	0,250	0,282	0,326	0,397	0,448
		8	0,000	0,119	0,171	0,189	0,226	0,256	0,299	0,363	0,411
	9	0,000	0,102	0,159	0,173	0,205	0,230	0,274	0,334	0,376	
	10	0,000	0,087	0,145	0,160	0,187	0,209	0,244	0,310	0,347	
	11	0,000	0,074	0,119	0,144	0,171	0,190	0,220	0,282	0,322	
	12	0,000	0,052	0,101	0,119	0,157	0,173	0,201	0,250	0,295	
	13	0,000	0,034	0,087	0,102	0,135	0,159	0,182	0,225	0,260	
	14	0,000	0,023	0,076	0,088	0,114	0,137	0,166	0,205	0,233	
	15	0,000	0,015	0,063	0,077	0,099	0,115	0,147	0,187	0,213	

Apêndice E₅ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-SBS-U6 (continuação)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
ISD (N estendido)	5	0,000	0,227	0,343	0,388	0,475	0,522	0,586	0,695	0,757	
	6	0,000	0,214	0,327	0,373	0,453	0,504	0,575	0,691	0,750	
	7	0,000	0,204	0,300	0,339	0,424	0,478	0,551	0,674	0,736	
	8	0,000	0,193	0,280	0,315	0,381	0,434	0,509	0,641	0,712	
	9	0,000	0,183	0,258	0,293	0,350	0,395	0,467	0,591	0,678	
	10	0,000	0,172	0,233	0,267	0,324	0,362	0,428	0,540	0,623	
	11	0,000	0,161	0,213	0,241	0,299	0,335	0,390	0,497	0,577	
	12	0,000	0,150	0,196	0,220	0,266	0,307	0,357	0,454	0,526	
	13	0,000	0,129	0,182	0,202	0,238	0,271	0,327	0,410	0,479	
	14	0,000	0,111	0,171	0,187	0,218	0,242	0,289	0,372	0,431	
	15	0,000	0,097	0,161	0,176	0,201	0,221	0,257	0,335	0,389	
	DNIT (N estendido)	5	0,000	0,234	0,407	0,495	0,586	0,652	0,744	0,821	0,849
		6	0,000	0,217	0,384	0,472	0,569	0,640	0,731	0,830	0,876
		7	0,000	0,202	0,357	0,444	0,541	0,607	0,703	0,823	0,868
		8	0,000	0,190	0,322	0,395	0,505	0,573	0,669	0,794	0,855
9		0,000	0,177	0,297	0,354	0,441	0,514	0,620	0,756	0,828	
10		0,000	0,165	0,279	0,328	0,393	0,454	0,554	0,706	0,789	
11		0,000	0,153	0,256	0,304	0,359	0,403	0,491	0,638	0,730	
12		0,000	0,130	0,224	0,283	0,331	0,365	0,430	0,566	0,662	
13		0,000	0,110	0,201	0,256	0,305	0,336	0,384	0,496	0,587	
14		0,000	0,094	0,182	0,223	0,282	0,310	0,350	0,434	0,512	
15		0,000	0,082	0,165	0,199	0,252	0,285	0,321	0,385	0,444	
SHELL (N estendido)		5	0,000	0,144	0,299	0,393	0,491	0,546	0,625	0,750	0,793
		6	0,000	0,142	0,284	0,377	0,476	0,540	0,632	0,753	0,799
		7	0,000	0,141	0,262	0,355	0,460	0,523	0,621	0,742	0,797
		8	0,000	0,135	0,245	0,322	0,425	0,495	0,590	0,714	0,779
	9	0,000	0,124	0,227	0,298	0,379	0,447	0,544	0,687	0,757	
	10	0,000	0,111	0,208	0,274	0,344	0,398	0,486	0,643	0,724	
	11	0,000	0,099	0,191	0,245	0,316	0,358	0,430	0,569	0,664	
	12	0,000	0,088	0,176	0,219	0,289	0,328	0,387	0,506	0,600	
	13	0,000	0,079	0,163	0,199	0,257	0,300	0,350	0,448	0,536	
	14	0,000	0,067	0,150	0,181	0,226	0,268	0,321	0,401	0,470	
	15	0,000	0,049	0,128	0,165	0,203	0,234	0,291	0,362	0,417	

Apêndice E₅ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-SBS-U6 (conclusão)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
SAN (N estendido)	5	0,000	0,336	0,472	0,537	0,624	0,691	0,772	0,849	0,879	
	6	0,000	0,318	0,444	0,518	0,608	0,673	0,764	0,852	0,887	
	7	0,000	0,298	0,404	0,470	0,566	0,636	0,725	0,832	0,879	
	8	0,000	0,265	0,373	0,427	0,519	0,583	0,680	0,803	0,862	
	9	0,000	0,230	0,336	0,383	0,474	0,540	0,628	0,766	0,843	
	10	0,000	0,204	0,306	0,346	0,415	0,480	0,574	0,712	0,797	
	11	0,000	0,182	0,283	0,319	0,372	0,421	0,509	0,654	0,742	
	12	0,000	0,163	0,256	0,294	0,343	0,378	0,446	0,587	0,680	
	13	0,000	0,136	0,223	0,270	0,316	0,347	0,398	0,512	0,608	
	14	0,000	0,112	0,199	0,237	0,291	0,320	0,362	0,449	0,528	
	15	0,000	0,094	0,179	0,209	0,262	0,295	0,333	0,401	0,462	
	CHE (N estendido)	5	0,000	0,466	0,659	0,700	0,785	0,830	0,868	0,908	0,922
		6	0,000	0,438	0,609	0,655	0,744	0,804	0,865	0,910	0,925
		7	0,000	0,398	0,567	0,609	0,696	0,763	0,843	0,902	0,922
		8	0,000	0,363	0,514	0,563	0,644	0,704	0,796	0,885	0,915
9		0,000	0,328	0,459	0,504	0,596	0,655	0,746	0,868	0,906	
10		0,000	0,288	0,417	0,452	0,538	0,603	0,687	0,828	0,890	
11		0,000	0,245	0,373	0,406	0,481	0,539	0,630	0,764	0,851	
12		0,000	0,210	0,335	0,361	0,427	0,480	0,565	0,699	0,787	
13		0,000	0,183	0,303	0,330	0,382	0,426	0,500	0,636	0,717	
14		0,000	0,153	0,267	0,300	0,348	0,383	0,444	0,562	0,652	
15		0,000	0,123	0,233	0,265	0,318	0,350	0,398	0,497	0,576	
PHO (N estendido)		5	0,000	0,334	0,431	0,479	0,551	0,598	0,665	0,774	0,819
		6	0,000	0,315	0,405	0,452	0,534	0,583	0,657	0,768	0,824
		7	0,000	0,295	0,374	0,410	0,490	0,541	0,617	0,735	0,801
		8	0,000	0,262	0,343	0,379	0,453	0,506	0,580	0,705	0,771
	9	0,000	0,227	0,309	0,341	0,405	0,461	0,543	0,669	0,744	
	10	0,000	0,202	0,285	0,312	0,367	0,410	0,490	0,623	0,701	
	11	0,000	0,180	0,257	0,289	0,336	0,374	0,436	0,565	0,654	
	12	0,000	0,161	0,224	0,259	0,310	0,343	0,396	0,510	0,594	
	13	0,000	0,135	0,200	0,226	0,284	0,315	0,363	0,454	0,537	
	14	0,000	0,112	0,181	0,202	0,249	0,288	0,333	0,411	0,477	
	15	0,000	0,094	0,163	0,183	0,220	0,253	0,304	0,376	0,430	

Fonte: Autor

Apêndice E₆ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-BOR (continua)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
ISD	5	0,000	0,004	0,014	0,019	0,029	0,038	0,052	0,074	0,091	
	6	0,000	0,005	0,019	0,024	0,037	0,047	0,060	0,082	0,099	
	7	0,000	0,006	0,022	0,028	0,042	0,052	0,065	0,087	0,104	
	8	0,000	0,006	0,022	0,029	0,043	0,054	0,068	0,090	0,106	
	9	0,000	0,006	0,021	0,027	0,042	0,054	0,068	0,090	0,104	
	10	0,000	0,005	0,018	0,023	0,037	0,049	0,065	0,087	0,101	
	11	0,000	0,005	0,014	0,019	0,031	0,042	0,059	0,083	0,096	
	12	0,000	0,004	0,011	0,015	0,026	0,035	0,052	0,078	0,091	
	13	0,000	0,003	0,008	0,012	0,022	0,030	0,044	0,072	0,087	
	14	0,000	0,002	0,006	0,010	0,017	0,025	0,037	0,064	0,081	
	15	0,000	0,002	0,005	0,008	0,014	0,020	0,031	0,054	0,074	
	DNIT	5	0,000	0,001	0,008	0,016	0,032	0,042	0,052	0,074	0,087
		6	0,000	0,001	0,009	0,018	0,036	0,046	0,058	0,077	0,092
		7	0,000	0,002	0,009	0,019	0,037	0,048	0,060	0,083	0,095
		8	0,000	0,001	0,008	0,016	0,033	0,046	0,060	0,081	0,092
9		0,000	0,001	0,007	0,013	0,026	0,039	0,057	0,076	0,087	
10		0,000	0,001	0,005	0,010	0,019	0,029	0,048	0,070	0,079	
11		0,000	0,001	0,004	0,007	0,014	0,021	0,035	0,061	0,073	
12		0,000	0,000	0,003	0,005	0,010	0,015	0,024	0,048	0,063	
13		0,000	0,000	0,002	0,003	0,007	0,010	0,017	0,032	0,048	
14		0,000	0,000	0,001	0,002	0,005	0,007	0,011	0,022	0,033	
15		0,000	0,000	0,001	0,002	0,003	0,005	0,008	0,015	0,022	
SHELL		5	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004	0,005	0,009	0,017	0,025
		6	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004	0,006	0,009	0,018	0,026
		7	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004	0,005	0,009	0,017	0,025
		8	0,000	0,000	0,001	0,002	0,003	0,005	0,008	0,016	0,024
	9	0,000	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,007	0,014	0,021	
	10	0,000	0,000	0,001	0,001	0,003	0,004	0,006	0,011	0,017	
	11	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,003	0,005	0,009	0,013	
	12	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,004	0,007	0,010	
	13	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,003	0,005	0,007	
	14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,004	0,005	
	15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,003	0,004	

Apêndice E₆ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-BOR (continuação)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
SAN	5	0,000	0,026	0,058	0,066	0,085	0,100	0,122	0,156	0,181	
	6	0,000	0,027	0,062	0,071	0,091	0,103	0,123	0,154	0,176	
	7	0,000	0,023	0,061	0,071	0,089	0,099	0,118	0,151	0,171	
	8	0,000	0,017	0,056	0,066	0,082	0,093	0,109	0,142	0,164	
	9	0,000	0,012	0,044	0,057	0,076	0,085	0,100	0,128	0,151	
	10	0,000	0,008	0,029	0,042	0,066	0,077	0,090	0,114	0,134	
	11	0,000	0,005	0,019	0,028	0,052	0,067	0,080	0,102	0,117	
	12	0,000	0,004	0,012	0,019	0,035	0,050	0,071	0,090	0,105	
	13	0,000	0,002	0,008	0,013	0,024	0,034	0,054	0,080	0,092	
	14	0,000	0,002	0,005	0,008	0,016	0,023	0,037	0,068	0,082	
	15	0,000	0,001	0,004	0,006	0,011	0,016	0,026	0,048	0,069	
	CHE	5	0,000	0,099	0,166	0,175	0,199	0,215	0,244	0,300	0,337
		6	0,000	0,091	0,151	0,158	0,182	0,201	0,234	0,291	0,323
		7	0,000	0,080	0,139	0,148	0,166	0,183	0,210	0,266	0,303
		8	0,000	0,069	0,118	0,131	0,155	0,168	0,192	0,237	0,275
9		0,000	0,048	0,097	0,107	0,142	0,156	0,175	0,214	0,243	
10		0,000	0,028	0,081	0,090	0,117	0,141	0,161	0,193	0,218	
11		0,000	0,016	0,070	0,076	0,098	0,115	0,146	0,175	0,197	
12		0,000	0,010	0,051	0,065	0,083	0,097	0,119	0,159	0,178	
13		0,000	0,006	0,030	0,041	0,071	0,082	0,100	0,136	0,161	
14		0,000	0,003	0,018	0,025	0,053	0,071	0,085	0,113	0,136	
15		0,000	0,002	0,011	0,015	0,033	0,051	0,073	0,096	0,114	
PHO		5	0,000	0,028	0,051	0,057	0,072	0,082	0,099	0,131	0,156
		6	0,000	0,029	0,054	0,061	0,074	0,085	0,103	0,131	0,153
		7	0,000	0,024	0,051	0,058	0,072	0,083	0,099	0,125	0,146
		8	0,000	0,018	0,042	0,050	0,066	0,076	0,091	0,117	0,136
	9	0,000	0,012	0,029	0,036	0,055	0,066	0,083	0,106	0,125	
	10	0,000	0,008	0,019	0,025	0,039	0,052	0,070	0,097	0,113	
	11	0,000	0,005	0,012	0,017	0,028	0,038	0,054	0,084	0,103	
	12	0,000	0,003	0,008	0,012	0,020	0,027	0,040	0,067	0,089	
	13	0,000	0,002	0,005	0,008	0,014	0,020	0,030	0,052	0,071	
	14	0,000	0,001	0,003	0,005	0,010	0,015	0,023	0,040	0,056	
	15	0,000	0,001	0,002	0,004	0,007	0,011	0,017	0,032	0,044	

Apêndice E₆ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-BOR (continuação)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
ISD (N estendido)	5	0,000	0,029	0,063	0,071	0,086	0,098	0,120	0,161	0,192	
	6	0,000	0,040	0,074	0,082	0,097	0,110	0,129	0,164	0,190	
	7	0,000	0,047	0,081	0,087	0,101	0,112	0,132	0,165	0,191	
	8	0,000	0,053	0,081	0,087	0,101	0,112	0,132	0,166	0,189	
	9	0,000	0,054	0,080	0,086	0,099	0,110	0,128	0,163	0,185	
	10	0,000	0,052	0,077	0,083	0,095	0,105	0,123	0,158	0,179	
	11	0,000	0,047	0,072	0,078	0,090	0,099	0,116	0,149	0,172	
	12	0,000	0,037	0,068	0,073	0,086	0,094	0,108	0,138	0,162	
	13	0,000	0,028	0,065	0,069	0,080	0,089	0,102	0,129	0,150	
	14	0,000	0,020	0,059	0,065	0,075	0,083	0,096	0,120	0,140	
	15	0,000	0,014	0,047	0,060	0,071	0,078	0,090	0,112	0,130	
	DNIT (N estendido)	5	0,000	0,010	0,049	0,070	0,095	0,120	0,157	0,199	0,224
		6	0,000	0,012	0,055	0,074	0,100	0,119	0,140	0,184	0,211
		7	0,000	0,012	0,058	0,080	0,101	0,117	0,137	0,170	0,192
		8	0,000	0,010	0,058	0,078	0,097	0,113	0,134	0,162	0,179
9		0,000	0,009	0,054	0,074	0,091	0,104	0,127	0,155	0,169	
10		0,000	0,006	0,046	0,068	0,084	0,095	0,115	0,148	0,160	
11		0,000	0,005	0,032	0,059	0,076	0,086	0,102	0,135	0,152	
12		0,000	0,003	0,022	0,045	0,070	0,077	0,091	0,117	0,139	
13		0,000	0,002	0,015	0,030	0,059	0,070	0,080	0,101	0,119	
14		0,000	0,002	0,010	0,020	0,041	0,060	0,072	0,089	0,102	
15		0,000	0,001	0,007	0,014	0,027	0,041	0,064	0,079	0,090	
SHELL (N estendido)		5	0,000	0,001	0,008	0,015	0,030	0,043	0,057	0,084	0,107
		6	0,000	0,001	0,008	0,016	0,032	0,042	0,053	0,077	0,094
		7	0,000	0,001	0,008	0,015	0,031	0,042	0,054	0,074	0,089
		8	0,000	0,001	0,007	0,014	0,029	0,041	0,054	0,073	0,089
	9	0,000	0,001	0,006	0,013	0,025	0,037	0,053	0,072	0,086	
	10	0,000	0,001	0,005	0,010	0,020	0,030	0,047	0,068	0,081	
	11	0,000	0,001	0,004	0,008	0,015	0,023	0,038	0,063	0,074	
	12	0,000	0,001	0,003	0,006	0,011	0,017	0,028	0,053	0,067	
	13	0,000	0,000	0,002	0,004	0,008	0,012	0,020	0,039	0,057	
	14	0,000	0,000	0,002	0,003	0,006	0,009	0,014	0,028	0,041	
	15	0,000	0,000	0,001	0,002	0,004	0,006	0,010	0,020	0,029	

Apêndice E₆ – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-BOR (conclusão)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
SAN (N estendido)	5	0,000	0,087	0,133	0,151	0,185	0,211	0,247	0,303	0,342	
	6	0,000	0,091	0,135	0,149	0,175	0,192	0,221	0,283	0,326	
	7	0,000	0,088	0,134	0,147	0,167	0,182	0,207	0,260	0,301	
	8	0,000	0,082	0,127	0,141	0,160	0,174	0,196	0,241	0,278	
	9	0,000	0,074	0,112	0,129	0,154	0,165	0,186	0,224	0,257	
	10	0,000	0,068	0,097	0,111	0,142	0,157	0,173	0,208	0,236	
	11	0,000	0,054	0,086	0,096	0,122	0,144	0,163	0,192	0,216	
	12	0,000	0,034	0,075	0,085	0,104	0,121	0,151	0,177	0,198	
	13	0,000	0,021	0,067	0,075	0,092	0,104	0,127	0,164	0,182	
	14	0,000	0,013	0,054	0,066	0,080	0,091	0,109	0,147	0,168	
	15	0,000	0,009	0,033	0,049	0,071	0,080	0,095	0,123	0,148	
	CHE (N estendido)	5	0,000	0,200	0,285	0,299	0,344	0,375	0,425	0,508	0,557
		6	0,000	0,183	0,273	0,286	0,323	0,352	0,399	0,482	0,537
		7	0,000	0,163	0,250	0,266	0,306	0,331	0,370	0,436	0,489
		8	0,000	0,150	0,213	0,230	0,276	0,301	0,341	0,404	0,448
9		0,000	0,130	0,188	0,201	0,248	0,275	0,307	0,364	0,407	
10		0,000	0,103	0,168	0,180	0,214	0,245	0,283	0,332	0,368	
11		0,000	0,085	0,152	0,161	0,191	0,213	0,254	0,306	0,338	
12		0,000	0,071	0,133	0,146	0,171	0,192	0,221	0,283	0,312	
13		0,000	0,050	0,104	0,119	0,155	0,172	0,198	0,246	0,288	
14		0,000	0,029	0,087	0,097	0,133	0,155	0,178	0,217	0,249	
15		0,000	0,017	0,074	0,082	0,108	0,131	0,160	0,195	0,220	
PHO (N estendido)		5	0,000	0,090	0,123	0,135	0,158	0,178	0,208	0,259	0,294
		6	0,000	0,093	0,124	0,134	0,154	0,171	0,196	0,238	0,271
		7	0,000	0,089	0,120	0,130	0,150	0,165	0,186	0,225	0,254
		8	0,000	0,083	0,109	0,120	0,141	0,156	0,177	0,211	0,239
	9	0,000	0,074	0,096	0,105	0,126	0,143	0,166	0,199	0,225	
	10	0,000	0,068	0,086	0,093	0,110	0,125	0,149	0,187	0,210	
	11	0,000	0,054	0,075	0,082	0,098	0,109	0,129	0,170	0,196	
	12	0,000	0,033	0,067	0,073	0,085	0,096	0,114	0,148	0,176	
	13	0,000	0,020	0,051	0,061	0,076	0,085	0,100	0,131	0,154	
	14	0,000	0,013	0,032	0,040	0,061	0,075	0,089	0,116	0,137	
	15	0,000	0,008	0,020	0,026	0,042	0,056	0,078	0,103	0,121	

Fonte: Autor

Apêndice E7 – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-RAP30 (continua)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
ISD	5	0,000	0,345	0,558	0,630	0,755	0,814	0,849	0,896	0,914	
	6	0,000	0,330	0,535	0,607	0,735	0,808	0,862	0,911	0,933	
	7	0,000	0,307	0,502	0,578	0,707	0,785	0,862	0,920	0,942	
	8	0,000	0,277	0,462	0,541	0,666	0,753	0,850	0,925	0,948	
	9	0,000	0,247	0,429	0,502	0,633	0,723	0,834	0,924	0,950	
	10	0,000	0,224	0,386	0,461	0,594	0,686	0,807	0,916	0,946	
	11	0,000	0,203	0,343	0,416	0,545	0,638	0,765	0,905	0,944	
	12	0,000	0,184	0,308	0,375	0,492	0,585	0,717	0,885	0,937	
	13	0,000	0,159	0,277	0,334	0,444	0,524	0,657	0,849	0,923	
	14	0,000	0,139	0,249	0,300	0,401	0,474	0,596	0,797	0,898	
	15	0,000	0,121	0,226	0,269	0,357	0,431	0,537	0,737	0,854	
	DNIT	5	0,000	0,353	0,632	0,768	0,845	0,875	0,907	0,938	0,955
		6	0,000	0,339	0,610	0,758	0,859	0,897	0,920	0,951	0,968
		7	0,000	0,313	0,576	0,720	0,858	0,900	0,927	0,963	0,976
		8	0,000	0,286	0,528	0,672	0,834	0,895	0,928	0,969	0,978
9		0,000	0,250	0,491	0,622	0,801	0,879	0,925	0,969	0,978	
10		0,000	0,213	0,443	0,570	0,749	0,846	0,916	0,967	0,978	
11		0,000	0,191	0,408	0,530	0,695	0,808	0,904	0,962	0,976	
12		0,000	0,158	0,360	0,478	0,632	0,750	0,883	0,955	0,974	
13		0,000	0,134	0,316	0,428	0,575	0,683	0,833	0,945	0,968	
14		0,000	0,115	0,280	0,382	0,512	0,611	0,760	0,926	0,959	
15		0,000	0,098	0,251	0,340	0,463	0,557	0,699	0,902	0,949	
SHELL		5	0,000	0,235	0,511	0,640	0,780	0,820	0,856	0,899	0,921
		6	0,000	0,227	0,494	0,630	0,785	0,835	0,875	0,914	0,941
		7	0,000	0,210	0,462	0,594	0,760	0,832	0,888	0,933	0,953
		8	0,000	0,189	0,431	0,564	0,728	0,815	0,889	0,941	0,961
	9	0,000	0,166	0,395	0,529	0,692	0,789	0,882	0,941	0,961	
	10	0,000	0,143	0,343	0,476	0,639	0,747	0,863	0,939	0,956	
	11	0,000	0,125	0,305	0,424	0,586	0,695	0,833	0,936	0,953	
	12	0,000	0,109	0,273	0,381	0,526	0,636	0,786	0,926	0,950	
	13	0,000	0,095	0,243	0,337	0,471	0,575	0,728	0,904	0,942	
	14	0,000	0,083	0,226	0,314	0,440	0,534	0,682	0,885	0,936	
	15	0,000	0,058	0,188	0,267	0,376	0,459	0,593	0,818	0,911	

Apêndice E7 – Resumo do dano por fadiga obtido nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-RAP30 (conclusão)

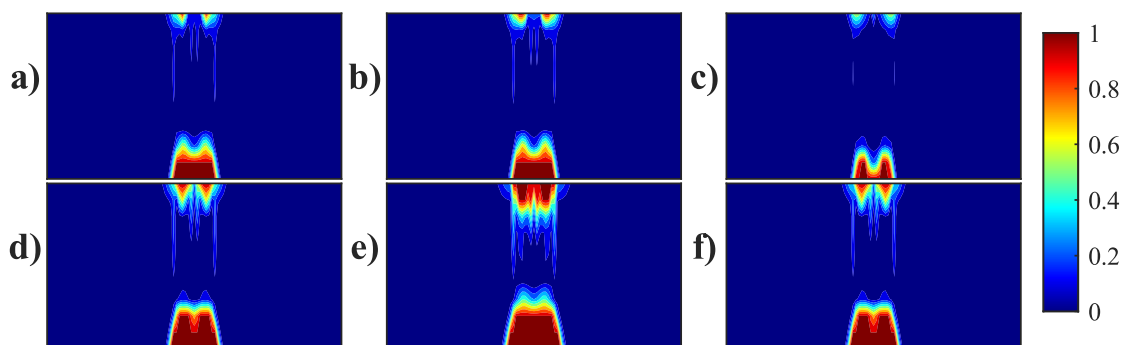
Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)									
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	
SAN	5	0,000	0,485	0,722	0,815	0,881	0,904	0,924	0,952	0,966	
	6	0,000	0,454	0,694	0,807	0,888	0,910	0,932	0,965	0,977	
	7	0,000	0,421	0,653	0,782	0,885	0,910	0,940	0,972	0,982	
	8	0,000	0,382	0,607	0,729	0,867	0,905	0,940	0,975	0,983	
	9	0,000	0,339	0,553	0,676	0,837	0,893	0,936	0,976	0,983	
	10	0,000	0,295	0,510	0,622	0,795	0,876	0,930	0,974	0,982	
	11	0,000	0,255	0,466	0,569	0,734	0,842	0,919	0,971	0,981	
	12	0,000	0,219	0,422	0,518	0,671	0,782	0,900	0,964	0,978	
	13	0,000	0,182	0,375	0,466	0,607	0,713	0,862	0,954	0,975	
	14	0,000	0,147	0,324	0,414	0,547	0,645	0,795	0,942	0,968	
	15	0,000	0,127	0,289	0,371	0,492	0,586	0,726	0,919	0,958	
	CHE	5	0,000	0,609	0,864	0,895	0,926	0,941	0,962	0,980	0,990
		6	0,000	0,584	0,851	0,892	0,928	0,950	0,971	0,988	0,994
		7	0,000	0,537	0,823	0,882	0,929	0,953	0,976	0,991	0,995
		8	0,000	0,496	0,782	0,866	0,926	0,951	0,977	0,991	0,995
9		0,000	0,446	0,735	0,828	0,916	0,946	0,974	0,991	0,995	
10		0,000	0,403	0,679	0,777	0,898	0,936	0,970	0,990	0,995	
11		0,000	0,354	0,621	0,721	0,863	0,919	0,962	0,988	0,994	
12		0,000	0,304	0,571	0,656	0,807	0,892	0,949	0,986	0,993	
13		0,000	0,262	0,521	0,600	0,748	0,839	0,931	0,981	0,990	
14		0,000	0,220	0,471	0,547	0,679	0,781	0,900	0,974	0,987	
15		0,000	0,181	0,423	0,495	0,621	0,713	0,843	0,961	0,983	
PHO		5	0,000	0,483	0,663	0,735	0,824	0,859	0,898	0,928	0,944
		6	0,000	0,452	0,629	0,707	0,821	0,866	0,906	0,935	0,955
		7	0,000	0,418	0,592	0,670	0,807	0,863	0,903	0,941	0,964
		8	0,000	0,380	0,549	0,628	0,765	0,837	0,901	0,943	0,968
	9	0,000	0,337	0,500	0,577	0,722	0,805	0,889	0,942	0,969	
	10	0,000	0,292	0,460	0,535	0,670	0,770	0,872	0,940	0,965	
	11	0,000	0,252	0,419	0,489	0,617	0,716	0,837	0,935	0,960	
	12	0,000	0,217	0,374	0,443	0,564	0,655	0,790	0,924	0,954	
	13	0,000	0,180	0,325	0,394	0,510	0,600	0,733	0,904	0,946	
	14	0,000	0,149	0,285	0,348	0,458	0,542	0,673	0,867	0,936	
	15	0,000	0,126	0,253	0,305	0,408	0,483	0,608	0,811	0,913	

Fonte: Autor

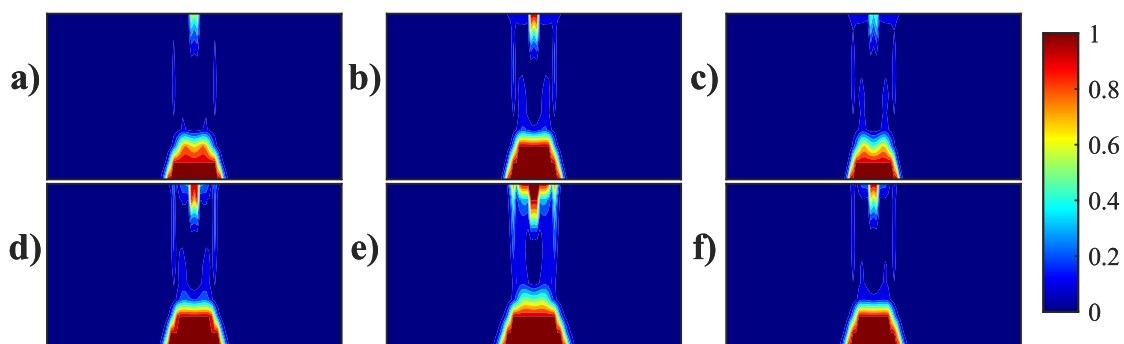
APÊNDICE F

Apêndice F₁ – Distribuição do dano por fadiga ao longo da seção transversal (simulações HT) considerando hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO (continua)

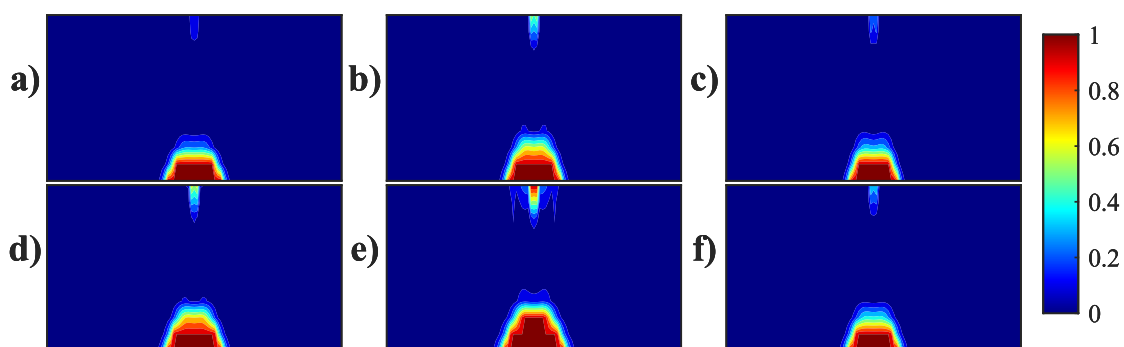
CA-50/70-U4 @ 1 mês e 5 cm



CA-50/70-U4 @ 6 meses e 10 cm

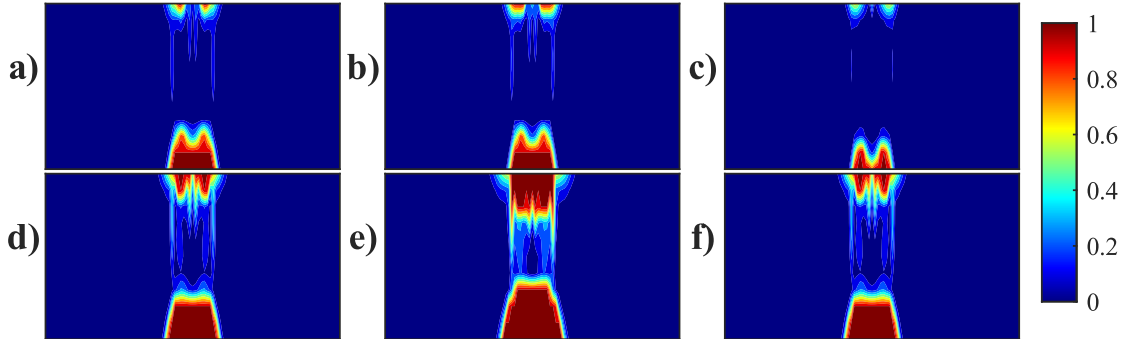


CA-50/70-U4 @ 12 meses e 15 cm

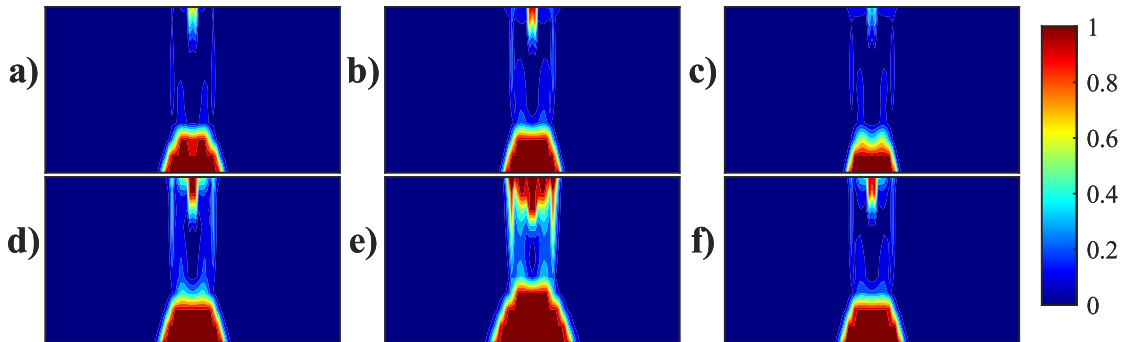


Apêndice F₁ – Distribuição do dano por fadiga ao longo da seção transversal (simulações HT) considerando hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO (continuação)

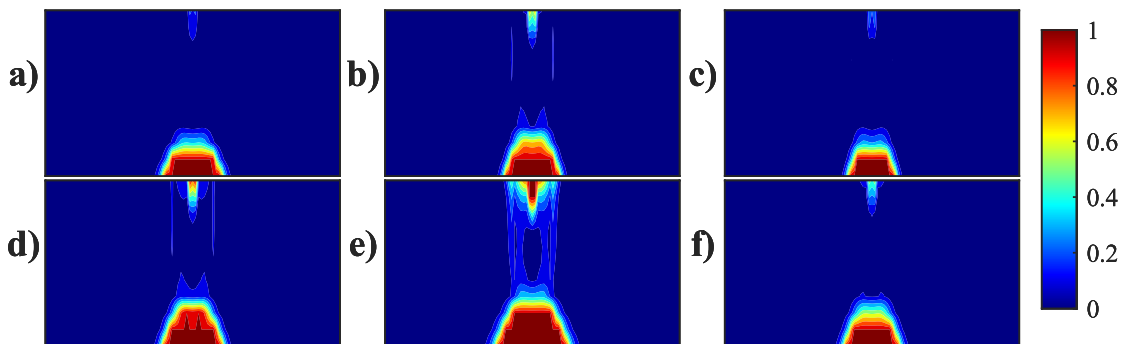
CA-50/70-U8 @ 1 mês e 5 cm



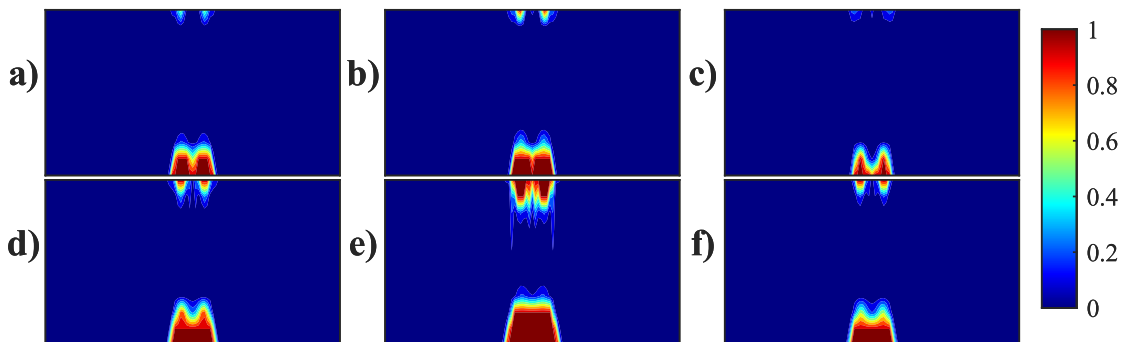
CA-50/70-U8 @ 6 meses e 10 cm



CA-50/70-U8 @ 12 meses e 15 cm

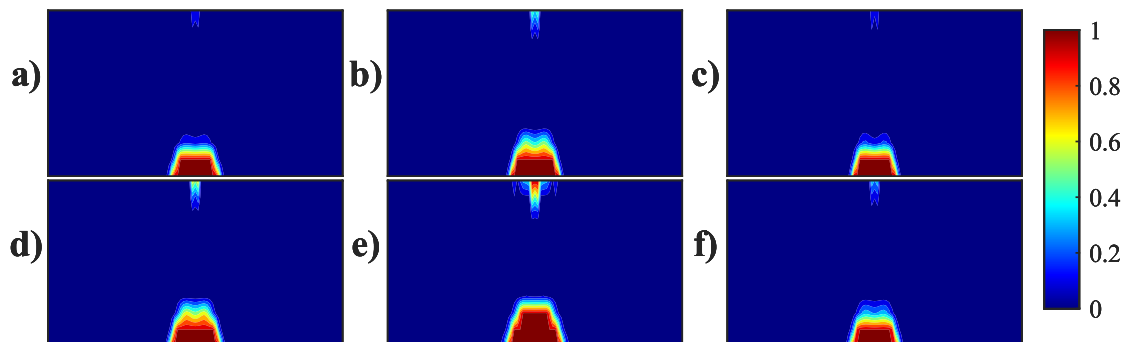


CA-SBS-U6 @ 6 meses e 5 cm

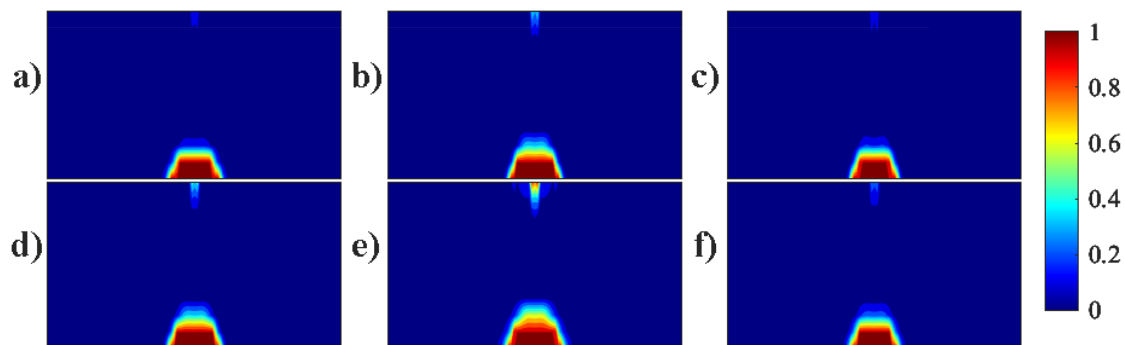


Apêndice F₁ – Distribuição do dano por fadiga ao longo da seção transversal (simulações HT) considerando hipótese a) ISD, b) DNIT, c) SHELL, d) SAN, e) CHE e f) PHO (conclusão)

CA-SBS-U6 @ 24 meses e 10 cm



CA-SBS-U6 @ 120 meses e 15 cm



Fonte: Autor

APÊNDICE G

Apêndice G₁ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-HB (continua)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
ISD	5	0,00	0,26	0,75	1,58	6,38	15,45	31,96	51,05	65,12	1,61E+08	
	6	0,00	0,26	0,63	1,49	6,94	15,48	31,60	58,10	75,37	1,62E+08	
	7	0,00	0,26	0,52	1,17	6,55	16,50	33,04	68,02	90,12	1,56E+08	
	8	0,00	0,26	0,39	0,85	4,76	13,88	33,64	75,39	100,00	1,56E+08	
	9	0,00	0,26	0,31	0,52	3,03	9,48	27,27	72,39	100,00	1,73E+08	
	10	0,00	0,26	0,29	0,39	1,76	7,07	24,59	70,72	100,00	1,83E+08	
	11	0,00	0,26	0,29	0,37	1,44	5,52	26,12	93,81	100,00	1,73E+08	
	12	0,00	0,26	0,27	0,32	0,86	3,05	17,04	76,38	100,00	2,05E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,29	0,56	1,76	10,67	60,69	100,00	2,36E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,28	0,49	1,29	8,94	67,77	100,00	2,39E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,27	0,43	0,98	6,40	65,35	100,00	2,58E+08	
	DNIT	5	0,00	0,26	1,94	11,34	33,72	44,66	61,54	78,55	94,17	5,77E+07
		6	0,00	0,26	1,88	12,06	35,96	52,81	71,09	100,00	100,00	5,68E+07
		7	0,00	0,26	1,39	11,53	37,65	58,76	86,69	100,00	100,00	5,62E+07
		8	0,00	0,26	0,93	7,82	35,81	64,83	100,00	100,00	100,00	5,96E+07
9		0,00	0,26	0,60	5,08	29,29	58,48	100,00	100,00	100,00	6,75E+07	
10		0,00	0,26	0,39	2,69	23,15	51,07	100,00	100,00	100,00	7,55E+07	
11		0,00	0,26	0,32	1,18	16,33	42,02	98,92	100,00	100,00	8,58E+07	
12		0,00	0,26	0,29	0,63	7,80	28,97	90,56	100,00	100,00	1,01E+08	
13		0,00	0,26	0,27	0,44	3,54	18,31	73,40	100,00	100,00	1,19E+08	
14		0,00	0,26	0,26	0,36	1,69	9,75	50,02	100,00	100,00	1,38E+08	
15		0,00	0,26	0,26	0,31	1,00	4,64	34,98	100,00	100,00	1,58E+08	
SHELL		5	0,00	0,26	0,39	1,59	10,03	23,15	37,41	59,65	79,71	1,24E+08
		6	0,00	0,26	0,40	1,79	11,69	25,64	45,29	80,97	100,00	1,12E+08
		7	0,00	0,26	0,35	1,75	13,00	27,39	54,29	93,98	100,00	1,07E+08
		8	0,00	0,26	0,31	1,29	12,59	29,75	61,74	100,00	100,00	1,00E+08
	9	0,00	0,26	0,28	0,94	9,60	29,14	66,74	100,00	100,00	1,01E+08	
	10	0,00	0,26	0,27	0,61	6,81	23,63	63,46	100,00	100,00	1,11E+08	
	11	0,00	0,26	0,26	0,39	4,52	18,59	58,11	100,00	100,00	1,21E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,31	2,26	13,94	54,35	100,00	100,00	1,30E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,28	1,17	7,51	47,08	100,00	100,00	1,42E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,27	0,69	3,81	34,10	100,00	100,00	1,60E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,47	2,10	22,79	100,00	100,00	1,79E+08	

Apêndice G₁ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-HB (conclusão)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
SAN	5	0,00	0,44	8,18	23,29	46,80	59,23	75,81	94,76	100,00	3,79E+07	
	6	0,00	0,36	7,17	21,72	50,27	71,45	86,36	100,00	100,00	3,89E+07	
	7	0,00	0,31	4,83	18,48	51,92	71,69	93,32	100,00	100,00	4,17E+07	
	8	0,00	0,28	2,93	12,99	45,60	71,33	98,78	100,00	100,00	4,92E+07	
	9	0,00	0,27	1,38	8,39	37,47	65,34	100,00	100,00	100,00	6,01E+07	
	10	0,00	0,26	0,64	3,72	26,66	56,77	99,01	100,00	100,00	6,96E+07	
	11	0,00	0,26	0,42	1,62	16,49	42,64	95,51	100,00	100,00	8,36E+07	
	12	0,00	0,26	0,34	0,79	8,95	29,41	83,76	100,00	100,00	1,01E+08	
	13	0,00	0,26	0,30	0,50	4,35	18,31	63,54	100,00	100,00	1,19E+08	
	14	0,00	0,26	0,28	0,40	2,09	10,95	51,06	100,00	100,00	1,36E+08	
	15	0,00	0,26	0,27	0,35	1,17	5,57	37,38	100,00	100,00	1,55E+08	
	CHE	5	0,00	5,35	53,93	64,80	82,89	91,11	100,00	100,00	100,00	7,70E+06
		6	0,00	2,76	52,33	69,10	87,20	100,00	100,00	100,00	100,00	9,65E+06
		7	0,00	1,51	42,98	64,54	89,56	100,00	100,00	100,00	100,00	1,24E+07
		8	0,00	0,71	27,11	53,20	85,49	100,00	100,00	100,00	100,00	1,83E+07
9		0,00	0,45	15,55	38,41	79,93	100,00	100,00	100,00	100,00	2,90E+07	
10		0,00	0,33	8,25	24,37	71,73	96,17	100,00	100,00	100,00	3,62E+07	
11		0,00	0,28	3,85	13,24	55,93	88,28	100,00	100,00	100,00	4,45E+07	
12		0,00	0,27	1,71	6,44	35,94	73,66	100,00	100,00	100,00	6,15E+07	
13		0,00	0,26	0,77	2,71	20,82	51,34	100,00	100,00	100,00	7,53E+07	
14		0,00	0,26	0,45	1,08	10,44	31,51	89,48	100,00	100,00	9,83E+07	
15	0,00	0,26	0,34	0,56	4,05	17,13	63,68	100,00	100,00	1,21E+08		
PHO	5	0,00	0,43	3,35	7,46	25,16	39,04	53,50	75,65	91,44	7,19E+07	
	6	0,00	0,36	2,70	6,58	23,20	38,02	60,80	87,53	99,86	7,49E+07	
	7	0,00	0,31	1,73	4,52	19,66	35,72	63,51	91,43	100,00	9,02E+07	
	8	0,00	0,28	1,07	2,94	15,16	30,65	62,28	98,34	100,00	9,93E+07	
	9	0,00	0,27	0,55	1,55	10,69	23,61	54,25	100,00	100,00	1,09E+08	
	10	0,00	0,26	0,37	0,73	5,41	16,05	43,43	100,00	100,00	1,35E+08	
	11	0,00	0,26	0,31	0,46	2,54	9,32	32,09	98,96	100,00	1,64E+08	
	12	0,00	0,26	0,29	0,37	1,33	5,47	23,12	93,98	100,00	1,83E+08	
	13	0,00	0,26	0,29	0,36	1,11	4,41	23,96	100,00	100,00	1,77E+08	
	14	0,00	0,26	0,27	0,31	0,71	2,21	15,51	92,33	100,00	2,06E+08	
15	0,00	0,26	0,26	0,29	0,51	1,30	8,56	71,79	100,00	2,37E+08		

Fonte: Autor

Apêndice G₂ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-U4 (continua)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
ISD	5	0,00	0,26	0,32	0,50	1,90	4,52	15,48	46,78	61,46	2,39E+08	
	6	0,00	0,26	0,30	0,42	1,55	3,96	14,83	45,61	72,13	2,42E+08	
	7	0,00	0,26	0,29	0,40	1,64	5,17	20,78	66,58	100,00	1,99E+08	
	8	0,00	0,26	0,28	0,35	1,07	3,69	18,93	75,85	100,00	1,98E+08	
	9	0,00	0,26	0,27	0,31	0,69	2,20	12,01	65,34	100,00	2,32E+08	
	10	0,00	0,26	0,26	0,29	0,49	1,17	6,50	48,91	100,00	2,71E+08	
	11	0,00	0,26	0,26	0,28	0,49	1,10	5,92	51,74	100,00	2,71E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,27	0,41	0,81	3,76	40,08	100,00	3,01E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,27	0,39	0,81	3,68	40,44	100,00	3,02E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,27	0,37	0,74	3,45	38,34	100,00	3,06E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,28	0,38	0,70	3,51	39,29	100,00	3,05E+08	
	DNIT	5	0,00	0,26	0,69	2,99	17,09	36,74	58,62	85,87	100,00	8,91E+07
		6	0,00	0,26	0,50	2,48	15,88	35,59	67,11	99,65	100,00	9,12E+07
		7	0,00	0,26	0,42	1,77	13,18	33,00	68,26	100,00	100,00	9,50E+07
		8	0,00	0,26	0,32	1,05	8,43	25,17	65,00	100,00	100,00	1,08E+08
9		0,00	0,26	0,29	0,55	5,21	17,53	53,07	100,00	100,00	1,25E+08	
10		0,00	0,26	0,28	0,40	2,19	10,86	42,02	100,00	100,00	1,43E+08	
11		0,00	0,26	0,27	0,34	1,08	4,94	30,15	100,00	100,00	1,66E+08	
12		0,00	0,26	0,26	0,31	0,69	2,32	17,82	100,00	100,00	1,95E+08	
13		0,00	0,26	0,26	0,29	0,53	1,34	9,45	94,29	100,00	2,27E+08	
14		0,00	0,26	0,26	0,28	0,46	0,97	5,21	71,15	100,00	2,58E+08	
15		0,00	0,26	0,26	0,27	0,42	0,81	3,51	49,09	100,00	2,91E+08	
SHELL		5	0,00	0,26	0,33	1,06	5,36	15,57	41,03	68,60	85,48	1,36E+08
		6	0,00	0,26	0,30	0,90	5,51	17,04	41,13	85,10	100,00	1,33E+08
		7	0,00	0,26	0,29	0,67	4,85	16,86	43,45	100,00	100,00	1,33E+08
		8	0,00	0,26	0,27	0,52	3,59	13,47	44,71	100,00	100,00	1,37E+08
	9	0,00	0,26	0,26	0,37	2,34	8,96	36,48	100,00	100,00	1,53E+08	
	10	0,00	0,26	0,26	0,32	1,19	5,82	29,99	100,00	100,00	1,67E+08	
	11	0,00	0,26	0,26	0,29	0,72	2,79	22,69	100,00	100,00	1,83E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,27	0,53	1,57	12,72	100,00	100,00	2,06E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,27	0,44	1,04	6,65	96,02	100,00	2,39E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,26	0,38	0,85	4,63	72,83	100,00	2,66E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,33	0,73	3,73	52,02	100,00	2,90E+08	

Apêndice G₂ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-U4 (conclusão)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
SAN	5	0,00	0,27	1,23	4,12	20,05	38,93	63,33	83,19	94,20	8,21E+07	
	6	0,00	0,27	0,88	3,40	18,66	38,38	65,92	93,56	100,00	8,53E+07	
	7	0,00	0,26	0,54	2,04	13,40	30,68	63,85	100,00	100,00	9,89E+07	
	8	0,00	0,26	0,40	1,05	7,61	21,75	56,13	100,00	100,00	1,17E+08	
	9	0,00	0,26	0,32	0,63	4,53	14,97	47,12	100,00	100,00	1,34E+08	
	10	0,00	0,26	0,29	0,43	2,34	9,52	37,40	100,00	100,00	1,51E+08	
	11	0,00	0,26	0,28	0,36	1,20	5,31	27,85	100,00	100,00	1,71E+08	
	12	0,00	0,26	0,27	0,32	0,74	2,43	18,13	100,00	100,00	1,97E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,30	0,54	1,33	9,07	88,02	100,00	2,30E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,29	0,47	1,01	5,25	70,50	100,00	2,58E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,27	0,42	0,81	3,29	46,30	100,00	2,98E+08	
	CHE	5	0,00	0,48	11,53	24,17	52,08	66,60	85,15	100,00	100,00	3,73E+07
		6	0,00	0,37	6,34	15,65	48,14	68,97	87,55	100,00	100,00	4,49E+07
		7	0,00	0,31	3,47	9,31	36,30	61,15	86,23	100,00	100,00	6,00E+07
		8	0,00	0,28	1,71	4,92	22,41	46,48	79,22	100,00	100,00	7,49E+07
9		0,00	0,26	0,83	2,52	13,78	34,23	76,14	100,00	100,00	9,44E+07	
10		0,00	0,26	0,51	1,19	7,55	20,93	61,12	100,00	100,00	1,15E+08	
11		0,00	0,26	0,36	0,63	3,76	12,10	41,77	100,00	100,00	1,42E+08	
12		0,00	0,26	0,30	0,42	1,75	6,40	26,64	100,00	100,00	1,74E+08	
13		0,00	0,26	0,28	0,35	0,95	3,33	18,16	100,00	100,00	2,01E+08	
14		0,00	0,26	0,27	0,32	0,67	1,85	11,54	82,44	100,00	2,27E+08	
15		0,00	0,26	0,26	0,29	0,50	1,06	5,59	56,47	100,00	2,68E+08	
PHO		5	0,00	0,27	0,61	1,37	5,37	12,92	30,85	62,47	78,78	1,65E+08
		6	0,00	0,27	0,48	1,03	4,77	12,16	31,66	67,87	88,85	1,63E+08
		7	0,00	0,26	0,36	0,62	2,91	8,18	24,76	66,09	91,79	1,85E+08
		8	0,00	0,26	0,31	0,44	1,77	5,48	20,12	67,53	100,00	2,04E+08
	9	0,00	0,26	0,29	0,36	1,19	4,17	18,12	73,05	100,00	2,06E+08	
	10	0,00	0,26	0,28	0,34	0,84	2,93	17,01	82,62	100,00	2,05E+08	
	11	0,00	0,26	0,27	0,30	0,56	1,43	9,15	64,02	100,00	2,39E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,29	0,45	0,94	5,06	52,32	100,00	2,72E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,28	0,44	0,90	4,12	51,44	100,00	2,80E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,27	0,39	0,74	3,01	37,24	100,00	3,10E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,27	0,35	0,70	2,76	30,36	100,00	3,33E+08	

Fonte: Autor

Apêndice G₃ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-U8 (continua)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
ISD	5	0,00	0,26	0,40	0,77	3,03	7,25	21,66	49,95	65,86	2,04E+08	
	6	0,00	0,26	0,35	0,58	2,38	6,24	19,53	51,25	72,72	2,20E+08	
	7	0,00	0,26	0,31	0,45	1,73	5,26	18,53	52,32	84,63	2,28E+08	
	8	0,00	0,26	0,29	0,36	1,15	3,68	16,73	55,42	100,00	2,31E+08	
	9	0,00	0,26	0,29	0,35	0,93	3,10	15,75	75,00	100,00	2,07E+08	
	10	0,00	0,26	0,27	0,31	0,62	1,67	9,01	55,84	100,00	2,58E+08	
	11	0,00	0,26	0,27	0,29	0,47	1,03	5,19	40,68	100,00	2,96E+08	
	12	0,00	0,26	0,27	0,29	0,49	1,06	5,26	48,12	100,00	2,76E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,27	0,40	0,76	3,34	35,05	100,00	3,12E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,28	0,39	0,78	3,38	36,32	100,00	3,09E+08	
	15	0,00	0,26	0,27	0,28	0,39	0,76	3,38	36,27	100,00	3,09E+08	
	DNIT	5	0,00	0,26	1,01	5,08	25,75	44,67	63,76	89,36	100,00	7,24E+07
		6	0,00	0,26	0,71	4,35	24,17	45,73	77,73	100,00	100,00	7,47E+07
		7	0,00	0,26	0,55	3,04	22,00	46,07	80,16	100,00	100,00	7,77E+07
		8	0,00	0,26	0,38	1,85	15,24	37,68	81,96	100,00	100,00	8,92E+07
9		0,00	0,26	0,31	0,85	9,89	28,56	75,78	100,00	100,00	1,02E+08	
10		0,00	0,26	0,29	0,51	4,67	19,80	62,24	100,00	100,00	1,17E+08	
11		0,00	0,26	0,27	0,39	1,97	10,23	47,88	100,00	100,00	1,38E+08	
12		0,00	0,26	0,27	0,34	1,04	4,69	32,17	100,00	100,00	1,63E+08	
13		0,00	0,26	0,26	0,31	0,69	2,31	18,86	100,00	100,00	1,90E+08	
14		0,00	0,26	0,26	0,29	0,53	1,37	9,88	100,00	100,00	2,20E+08	
15		0,00	0,26	0,26	0,27	0,46	1,02	5,64	83,26	100,00	2,52E+08	
SHELL		5	0,00	0,26	0,31	0,92	4,70	14,00	38,49	65,12	86,29	1,42E+08
		6	0,00	0,26	0,29	0,79	5,12	15,63	40,22	81,62	100,00	1,36E+08
		7	0,00	0,26	0,28	0,62	4,38	16,22	42,72	96,73	100,00	1,33E+08
		8	0,00	0,26	0,27	0,48	3,30	13,00	43,33	100,00	100,00	1,38E+08
	9	0,00	0,26	0,26	0,36	2,24	9,07	36,42	100,00	100,00	1,53E+08	
	10	0,00	0,26	0,26	0,31	1,17	6,01	30,86	100,00	100,00	1,65E+08	
	11	0,00	0,26	0,26	0,28	0,71	2,89	23,51	100,00	100,00	1,80E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,27	0,53	1,61	13,37	100,00	100,00	2,05E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,27	0,43	1,09	7,53	100,00	100,00	2,34E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,26	0,36	0,85	5,13	80,26	100,00	2,59E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,32	0,69	3,98	58,32	100,00	2,81E+08	

Apêndice G₃ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-U8 (conclusão)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
SAN	5	0,00	0,36	4,75	14,96	43,79	58,25	76,69	94,91	100,00	4,70E+07	
	6	0,00	0,31	3,35	11,49	39,70	58,96	81,02	100,00	100,00	5,52E+07	
	7	0,00	0,29	1,62	6,83	28,68	51,22	83,02	100,00	100,00	6,82E+07	
	8	0,00	0,27	0,82	3,42	20,62	43,58	81,75	100,00	100,00	7,85E+07	
	9	0,00	0,26	0,52	1,72	12,82	33,29	75,13	100,00	100,00	9,55E+07	
	10	0,00	0,26	0,36	0,84	7,25	22,09	65,27	100,00	100,00	1,11E+08	
	11	0,00	0,26	0,31	0,50	3,30	13,29	47,41	100,00	100,00	1,35E+08	
	12	0,00	0,26	0,29	0,39	1,56	7,37	35,66	100,00	100,00	1,56E+08	
	13	0,00	0,26	0,28	0,35	0,98	3,72	26,29	100,00	100,00	1,73E+08	
	14	0,00	0,26	0,27	0,31	0,65	1,82	13,56	100,00	100,00	2,06E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,29	0,49	1,12	6,46	82,08	100,00	2,44E+08	
	CHE	5	0,00	3,80	50,57	63,61	82,74	96,05	100,00	100,00	100,00	9,81E+06
		6	0,00	1,99	41,38	61,58	86,22	100,00	100,00	100,00	100,00	1,24E+07
		7	0,00	1,06	26,76	50,45	81,95	100,00	100,00	100,00	100,00	1,92E+07
		8	0,00	0,55	14,99	33,27	74,42	96,79	100,00	100,00	100,00	3,17E+07
9		0,00	0,38	8,53	20,17	63,24	88,96	100,00	100,00	100,00	3,93E+07	
10		0,00	0,31	4,54	11,23	43,83	78,49	100,00	100,00	100,00	5,12E+07	
11		0,00	0,28	2,25	5,73	25,44	55,76	100,00	100,00	100,00	7,09E+07	
12		0,00	0,26	1,03	2,75	14,16	34,85	88,24	100,00	100,00	9,39E+07	
13		0,00	0,26	0,55	1,17	7,36	19,46	60,63	100,00	100,00	1,18E+08	
14		0,00	0,26	0,38	0,61	3,23	10,70	37,06	100,00	100,00	1,50E+08	
PHO	5	0,00	0,35	1,97	4,39	16,19	29,99	51,44	76,93	88,41	1,00E+08	
	6	0,00	0,31	1,31	3,23	13,06	26,38	49,13	80,90	95,50	1,05E+08	
	7	0,00	0,28	0,69	1,68	8,18	18,82	40,14	80,57	100,00	1,34E+08	
	8	0,00	0,27	0,45	0,85	4,43	12,52	32,33	81,04	100,00	1,62E+08	
	9	0,00	0,26	0,34	0,53	2,50	7,65	25,27	75,04	100,00	1,78E+08	
	10	0,00	0,26	0,30	0,37	1,18	4,14	17,30	65,69	100,00	2,17E+08	
	11	0,00	0,26	0,29	0,36	0,95	3,20	18,30	86,47	100,00	2,01E+08	
	12	0,00	0,26	0,28	0,32	0,63	1,64	10,18	70,16	100,00	2,33E+08	
	13	0,00	0,26	0,27	0,29	0,47	0,99	4,93	53,16	100,00	2,71E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,28	0,47	0,99	4,41	51,57	100,00	2,80E+08	
15	0,00	0,26	0,26	0,27	0,39	0,72	2,84	31,13	100,00	3,31E+08		

Fonte: Autor

Apêndice G₄ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-SBS-U2 (continua)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
ISD	5	0,00	0,26	0,28	0,31	0,55	1,26	4,46	25,35	74,75	3,61E+08	
	6	0,00	0,26	0,27	0,29	0,45	1,01	4,10	27,09	69,46	3,43E+08	
	7	0,00	0,26	0,27	0,28	0,38	0,65	2,12	15,52	48,65	4,20E+08	
	8	0,00	0,26	0,26	0,27	0,33	0,45	1,15	7,75	22,93	5,00E+08	
	9	0,00	0,26	0,26	0,27	0,30	0,35	0,65	4,11	11,73	5,00E+08	
	10	0,00	0,26	0,26	0,26	0,28	0,31	0,44	1,91	6,15	5,00E+08	
	11	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,35	0,90	2,90	5,00E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,31	0,54	1,20	5,00E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,39	0,64	5,00E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,32	0,44	5,00E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,35	5,00E+08	
	DNIT	5	0,00	0,26	0,26	0,28	0,43	0,78	2,39	11,70	25,02	5,00E+08
		6	0,00	0,26	0,26	0,28	0,43	0,76	2,26	13,19	31,53	4,88E+08
		7	0,00	0,26	0,26	0,28	0,44	0,79	2,38	14,62	35,44	4,62E+08
		8	0,00	0,26	0,27	0,30	0,65	1,25	3,98	23,59	66,78	3,67E+08
9		0,00	0,26	0,27	0,30	0,63	1,34	3,53	16,06	43,06	4,35E+08	
10		0,00	0,26	0,26	0,28	0,38	0,75	1,88	7,14	17,16	5,00E+08	
11		0,00	0,26	0,26	0,27	0,31	0,41	1,08	3,59	8,11	5,00E+08	
12		0,00	0,26	0,26	0,26	0,28	0,31	0,51	1,87	4,02	5,00E+08	
13		0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,34	1,04	2,03	5,00E+08	
14		0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,48	1,09	5,00E+08	
15		0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,33	0,50	5,00E+08	
SHELL		5	0,00	0,26	0,26	0,27	0,42	0,88	3,17	24,95	56,58	3,61E+08
		6	0,00	0,26	0,26	0,27	0,38	0,86	3,55	24,85	63,96	3,59E+08
		7	0,00	0,26	0,26	0,28	0,40	0,90	4,05	33,79	99,51	3,18E+08
		8	0,00	0,26	0,26	0,27	0,33	0,57	1,91	13,77	44,45	4,38E+08
	9	0,00	0,26	0,26	0,27	0,30	0,39	1,02	5,70	17,34	5,00E+08	
	10	0,00	0,26	0,26	0,26	0,28	0,32	0,54	2,66	7,33	5,00E+08	
	11	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,36	1,35	3,35	5,00E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,30	0,63	1,67	5,00E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,38	0,76	5,00E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,31	0,41	5,00E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,31	5,00E+08	

Apêndice G₄ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-U8 (continuação)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
SAN	5	0,00	0,26	0,27	0,29	0,46	0,76	2,15	9,71	21,10	5,00E+08	
	6	0,00	0,26	0,27	0,30	0,43	0,72	2,01	11,00	25,30	5,00E+08	
	7	0,00	0,26	0,27	0,30	0,46	0,77	1,75	10,11	26,22	5,00E+08	
	8	0,00	0,26	0,27	0,30	0,52	0,91	2,43	12,77	33,23	4,77E+08	
	9	0,00	0,26	0,28	0,35	1,05	2,15	6,03	25,84	72,05	3,57E+08	
	10	0,00	0,26	0,27	0,30	0,54	1,25	2,95	12,04	28,75	5,00E+08	
	11	0,00	0,26	0,26	0,27	0,35	0,58	1,60	5,81	13,15	5,00E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,26	0,29	0,36	0,77	2,90	6,58	5,00E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,30	0,40	1,55	3,28	5,00E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,30	0,40	1,55	3,28	5,00E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,38	0,68	5,00E+08	
	CHE	5	0,00	0,26	0,30	0,35	0,57	1,03	2,74	10,22	20,38	5,00E+08
		6	0,00	0,26	0,29	0,32	0,45	0,71	1,71	6,86	14,08	5,00E+08
		7	0,00	0,26	0,29	0,31	0,42	0,64	1,49	8,01	16,66	5,00E+08
		8	0,00	0,26	0,28	0,30	0,41	0,55	1,13	5,50	14,75	5,00E+08
9		0,00	0,26	0,27	0,31	0,47	0,76	1,75	8,29	22,74	5,00E+08	
10		0,00	0,26	0,28	0,32	0,64	1,13	2,96	15,23	37,41	4,51E+08	
11		0,00	0,26	0,28	0,33	0,84	1,89	5,15	21,25	51,91	3,89E+08	
12		0,00	0,26	0,26	0,28	0,40	0,80	2,32	10,08	22,80	5,00E+08	
13		0,00	0,26	0,26	0,26	0,30	0,40	0,99	4,64	11,39	5,00E+08	
14		0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,30	0,46	2,13	5,22	5,00E+08	
15		0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,32	0,78	2,35	5,00E+08	
PHO		5	0,00	0,26	0,27	0,30	0,44	0,78	2,20	12,14	26,90	5,00E+08
		6	0,00	0,26	0,27	0,31	0,54	0,95	2,66	16,53	40,15	4,34E+08
		7	0,00	0,26	0,27	0,30	0,57	1,13	3,40	17,46	45,11	4,29E+08
		8	0,00	0,26	0,28	0,33	0,68	1,62	4,96	26,39	65,81	3,58E+08
	9	0,00	0,26	0,27	0,29	0,41	0,76	2,42	11,99	29,93	5,00E+08	
	10	0,00	0,26	0,26	0,27	0,32	0,43	1,13	5,68	15,58	5,00E+08	
	11	0,00	0,26	0,26	0,26	0,28	0,33	0,53	2,92	7,35	5,00E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,36	1,19	3,71	5,00E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,30	0,55	1,53	5,00E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,37	0,64	5,00E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,31	0,40	5,00E+08	

Apêndice G₄ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-SBS-U2 (continuação)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
ISD (N estendido)	5	0,00	0,26	0,30	0,40	0,99	2,11	6,20	24,34	41,75	3,72E+09	
	6	0,00	0,26	0,29	0,36	0,87	1,88	6,11	25,26	43,27	3,71E+09	
	7	0,00	0,26	0,29	0,36	0,89	2,23	8,26	35,87	66,52	2,99E+09	
	8	0,00	0,26	0,27	0,31	0,55	1,39	5,87	32,72	62,71	3,13E+09	
	9	0,00	0,26	0,27	0,29	0,43	0,81	3,35	27,41	63,09	3,41E+09	
	10	0,00	0,26	0,27	0,30	0,43	0,74	2,69	23,56	66,07	3,66E+09	
	11	0,00	0,26	0,27	0,30	0,46	0,80	2,62	24,22	73,11	3,64E+09	
	12	0,00	0,26	0,27	0,29	0,50	0,90	2,84	22,66	75,59	3,65E+09	
	13	0,00	0,26	0,27	0,30	0,48	1,05	3,33	23,19	76,30	3,67E+09	
	14	0,00	0,26	0,28	0,32	0,53	1,16	4,74	30,89	88,28	3,31E+09	
	15	0,00	0,26	0,27	0,29	0,38	0,58	1,91	14,00	41,80	4,38E+09	
	DNIT (N estendido)	5	0,00	0,26	0,46	1,33	5,59	14,04	34,73	62,05	76,90	1,51E+09
		6	0,00	0,26	0,37	0,99	4,87	13,21	34,79	70,55	85,14	1,53E+09
		7	0,00	0,26	0,32	0,68	2,94	8,87	27,88	70,31	92,60	1,74E+09
		8	0,00	0,26	0,29	0,46	2,02	5,92	21,00	69,22	100,00	2,04E+09
9		0,00	0,26	0,27	0,34	1,04	3,73	15,18	61,52	100,00	2,25E+09	
10		0,00	0,26	0,27	0,31	0,59	1,67	9,53	52,54	100,00	2,59E+09	
11		0,00	0,26	0,27	0,30	0,47	0,97	5,07	39,06	100,00	2,99E+09	
12		0,00	0,26	0,26	0,30	0,44	0,74	2,76	30,50	84,95	3,31E+09	
13		0,00	0,26	0,26	0,30	0,45	0,75	2,22	22,25	77,96	3,65E+09	
14		0,00	0,26	0,26	0,30	0,53	0,92	2,50	18,39	69,04	3,89E+09	
15		0,00	0,26	0,27	0,30	0,69	1,44	4,19	22,35	69,36	3,73E+09	
SHELL (N estendido)		5	0,00	0,26	0,30	0,61	2,21	5,79	19,10	50,46	64,15	2,10E+09
		6	0,00	0,26	0,29	0,48	1,91	5,79	19,14	51,38	78,67	2,15E+09
		7	0,00	0,26	0,27	0,41	1,58	4,55	17,76	59,20	97,33	2,17E+09
		8	0,00	0,26	0,27	0,33	1,10	3,35	13,95	59,17	100,00	2,33E+09
	9	0,00	0,26	0,26	0,30	0,62	1,96	10,83	53,70	100,00	2,47E+09	
	10	0,00	0,26	0,26	0,29	0,48	1,02	6,01	50,53	100,00	2,69E+09	
	11	0,00	0,26	0,26	0,29	0,43	0,79	3,29	38,28	100,00	3,08E+09	
	12	0,00	0,26	0,26	0,28	0,43	0,76	2,48	29,48	100,00	3,35E+09	
	13	0,00	0,26	0,26	0,28	0,47	0,85	2,69	23,53	93,04	3,58E+09	
	14	0,00	0,26	0,26	0,28	0,48	1,13	3,77	24,51	89,91	3,57E+09	
	15	0,00	0,26	0,26	0,28	0,43	1,02	4,02	23,92	71,57	3,66E+09	

Apêndice G₄ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-U8 (conclusão)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
SAN (N estendido)	5	0,00	0,28	0,75	1,83	7,71	17,39	36,72	60,08	71,52	1,41E+09	
	6	0,00	0,27	0,54	1,43	6,10	14,89	34,89	64,80	77,13	1,49E+09	
	7	0,00	0,26	0,38	0,76	3,42	9,15	24,33	60,84	80,82	1,93E+09	
	8	0,00	0,26	0,32	0,48	1,79	4,93	17,34	56,01	83,95	2,25E+09	
	9	0,00	0,26	0,29	0,38	1,14	3,23	12,22	53,91	96,31	2,39E+09	
	10	0,00	0,26	0,28	0,33	0,71	2,08	9,35	49,54	100,00	2,68E+09	
	11	0,00	0,26	0,27	0,30	0,48	0,98	5,09	33,75	87,10	3,16E+09	
	12	0,00	0,26	0,27	0,30	0,45	0,79	2,96	29,83	82,09	3,34E+09	
	13	0,00	0,26	0,27	0,31	0,45	0,72	2,10	21,50	70,68	3,70E+09	
	14	0,00	0,26	0,27	0,30	0,52	0,88	2,33	17,12	64,94	3,98E+09	
	15	0,00	0,26	0,27	0,30	0,65	1,22	3,46	18,28	57,22	4,01E+09	
	CHE (N estendido)	5	0,00	0,45	5,05	9,78	26,42	39,98	55,43	77,95	87,65	7,29E+08
		6	0,00	0,36	2,37	5,06	16,41	31,24	56,00	78,67	90,35	9,78E+08
		7	0,00	0,30	1,31	2,66	9,40	20,54	45,13	74,79	88,84	1,24E+09
		8	0,00	0,27	0,62	1,28	4,51	10,43	29,35	66,65	85,22	1,68E+09
9		0,00	0,26	0,40	0,64	2,31	5,57	18,46	61,23	85,06	2,08E+09	
10		0,00	0,26	0,32	0,42	1,15	2,92	10,14	46,41	82,32	2,67E+09	
11		0,00	0,26	0,29	0,34	0,67	1,58	6,07	32,31	75,32	3,21E+09	
12		0,00	0,26	0,28	0,31	0,51	1,07	4,45	27,51	68,72	3,44E+09	
13		0,00	0,26	0,27	0,30	0,42	0,68	2,29	19,01	49,82	4,01E+09	
14		0,00	0,26	0,27	0,30	0,42	0,65	1,76	15,27	46,94	4,18E+09	
15		0,00	0,26	0,26	0,29	0,46	0,75	1,84	12,99	42,37	4,41E+09	
PHO (N estendido)		5	0,00	0,28	0,47	0,84	2,44	5,29	14,73	37,29	52,44	2,70E+09
		6	0,00	0,27	0,38	0,62	1,96	4,51	13,61	38,73	54,87	2,68E+09
		7	0,00	0,26	0,31	0,41	1,16	2,68	8,94	31,46	51,95	3,25E+09
		8	0,00	0,26	0,29	0,34	0,71	1,60	5,90	25,74	51,82	3,66E+09
	9	0,00	0,26	0,28	0,33	0,64	1,62	6,75	35,10	74,43	3,05E+09	
	10	0,00	0,26	0,27	0,30	0,44	0,83	3,82	27,35	61,44	3,43E+09	
	11	0,00	0,26	0,28	0,30	0,45	0,76	2,83	27,62	76,80	3,40E+09	
	12	0,00	0,26	0,27	0,31	0,46	0,79	2,41	23,95	80,26	3,61E+09	
	13	0,00	0,26	0,27	0,30	0,51	0,90	2,67	20,82	74,75	3,73E+09	
	14	0,00	0,26	0,27	0,29	0,52	1,09	3,32	21,18	68,58	3,73E+09	
	15	0,00	0,26	0,27	0,30	0,53	1,24	4,94	28,10	79,76	3,39E+09	

Fonte: Autor

Apêndice G₅ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-SBS-U6 (continua)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
ISD	5	0,00	0,26	0,27	0,28	0,41	0,72	2,44	18,00	49,05	4,08E+08	
	6	0,00	0,26	0,27	0,28	0,33	0,46	1,38	12,43	37,63	4,65E+08	
	7	0,00	0,26	0,26	0,27	0,30	0,37	0,76	5,36	18,74	5,00E+08	
	8	0,00	0,26	0,26	0,27	0,29	0,33	0,52	2,87	10,48	5,00E+08	
	9	0,00	0,26	0,26	0,26	0,28	0,30	0,40	1,44	5,55	5,00E+08	
	10	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,34	0,80	2,62	5,00E+08	
	11	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,30	0,52	1,23	5,00E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,39	0,71	5,00E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,33	0,47	5,00E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,30	0,37	5,00E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,32	5,00E+08
	DNIT	5	0,00	0,26	0,26	0,28	0,42	0,78	2,45	13,81	28,91	5,00E+08
		6	0,00	0,26	0,26	0,28	0,46	0,84	2,68	15,82	36,09	4,53E+08
		7	0,00	0,26	0,26	0,29	0,51	1,05	3,70	22,95	57,41	3,69E+08
		8	0,00	0,26	0,27	0,30	0,60	1,26	3,60	20,00	57,45	3,90E+08
9		0,00	0,26	0,26	0,28	0,40	0,78	1,86	7,91	20,05	5,00E+08	
10		0,00	0,26	0,26	0,27	0,32	0,47	1,17	3,92	9,08	5,00E+08	
11		0,00	0,26	0,26	0,26	0,29	0,34	0,67	2,14	4,63	5,00E+08	
12		0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,39	1,27	2,42	5,00E+08	
13		0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,31	0,66	1,37	5,00E+08	
14		0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,37	0,72	5,00E+08	
15		0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,30	0,39	5,00E+08	
SHELL		5	0,00	0,26	0,26	0,26	0,36	0,64	2,48	24,23	69,76	3,58E+08
		6	0,00	0,26	0,26	0,26	0,30	0,42	1,57	17,28	50,05	4,03E+08
		7	0,00	0,26	0,26	0,26	0,29	0,35	0,88	10,38	36,77	4,64E+08
		8	0,00	0,26	0,26	0,26	0,28	0,31	0,59	4,21	16,43	5,00E+08
	9	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,41	2,05	6,71	5,00E+08	
	10	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,33	1,05	3,05	5,00E+08	
	11	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,54	1,44	5,00E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,36	0,70	5,00E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,30	0,40	5,00E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,31	5,00E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	5,00E+08	

Apêndice G₅ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-U6 (continuação)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
SAN	5	0,00	0,26	0,27	0,29	0,41	0,70	1,93	9,02	19,90	5,00E+08	
	6	0,00	0,26	0,27	0,31	0,46	0,77	2,20	13,07	29,33	5,00E+08	
	7	0,00	0,26	0,27	0,30	0,50	0,88	2,25	12,30	30,39	4,98E+08	
	8	0,00	0,26	0,27	0,31	0,64	1,18	3,47	17,78	45,72	4,15E+08	
	9	0,00	0,26	0,28	0,32	0,71	1,56	4,10	18,23	45,42	4,20E+08	
	10	0,00	0,26	0,27	0,28	0,40	0,80	2,17	8,64	19,87	5,00E+08	
	11	0,00	0,26	0,26	0,27	0,31	0,42	1,16	4,33	10,31	5,00E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,26	0,28	0,32	0,53	2,26	5,31	5,00E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,35	1,12	2,64	5,00E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,51	1,25	5,00E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,34	0,55	5,00E+08	
	CHE	5	0,00	0,26	0,31	0,35	0,55	0,96	2,48	8,89	17,83	5,00E+08
		6	0,00	0,26	0,29	0,32	0,44	0,66	1,46	5,85	12,57	5,00E+08
		7	0,00	0,26	0,30	0,32	0,43	0,64	1,44	7,47	15,81	5,00E+08
		8	0,00	0,26	0,28	0,30	0,38	0,50	0,96	4,33	12,16	5,00E+08
9		0,00	0,26	0,28	0,30	0,42	0,62	1,22	5,48	15,35	5,00E+08	
10		0,00	0,26	0,28	0,32	0,56	0,95	2,40	12,08	30,52	4,98E+08	
11		0,00	0,26	0,29	0,34	0,81	1,75	4,95	21,10	52,81	3,92E+08	
12		0,00	0,26	0,27	0,29	0,45	0,93	2,90	13,46	30,51	4,98E+08	
13		0,00	0,26	0,26	0,27	0,32	0,43	1,15	6,37	15,84	5,00E+08	
14		0,00	0,26	0,26	0,26	0,28	0,31	0,50	2,69	7,52	5,00E+08	
15		0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,34	0,96	3,07	5,00E+08	
PHO		5	0,00	0,26	0,28	0,30	0,46	0,83	2,57	16,26	37,57	4,39E+08
		6	0,00	0,26	0,28	0,31	0,60	1,14	3,32	19,32	50,06	3,99E+08
		7	0,00	0,26	0,28	0,32	0,61	1,37	4,58	24,14	59,98	3,68E+08
		8	0,00	0,26	0,27	0,30	0,44	0,85	2,79	15,00	39,26	4,40E+08
	9	0,00	0,26	0,27	0,27	0,34	0,48	1,38	7,32	19,86	5,00E+08	
	10	0,00	0,26	0,26	0,27	0,29	0,35	0,64	3,80	10,41	5,00E+08	
	11	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,30	0,40	1,72	5,36	5,00E+08	
	12	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,32	0,72	2,44	5,00E+08	
	13	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,44	0,93	5,00E+08	
	14	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,34	0,51	5,00E+08	
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,29	0,37	5,00E+08	

Apêndice G₅ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-SBS-U6 (continuação)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
ISD (N estendido)	5	0,00	0,26	0,29	0,36	0,93	1,88	5,07	21,79	41,29	4,02E+09	
	6	0,00	0,26	0,28	0,35	0,77	1,66	5,14	24,04	44,36	3,92E+09	
	7	0,00	0,26	0,27	0,31	0,61	1,32	4,36	23,96	46,32	3,72E+09	
	8	0,00	0,26	0,27	0,29	0,43	0,84	2,86	20,79	45,74	3,92E+09	
	9	0,00	0,26	0,27	0,29	0,44	0,80	2,89	21,76	60,33	3,72E+09	
	10	0,00	0,26	0,27	0,29	0,46	0,80	2,84	21,14	61,72	3,73E+09	
	11	0,00	0,26	0,27	0,28	0,42	0,73	2,16	17,86	54,94	4,00E+09	
	12	0,00	0,26	0,27	0,29	0,46	1,00	3,36	25,52	78,29	3,55E+09	
	13	0,00	0,26	0,28	0,30	0,47	0,93	4,19	28,25	91,96	3,38E+09	
	14	0,00	0,26	0,27	0,29	0,39	0,61	2,10	18,58	56,00	3,99E+09	
	15	0,00	0,26	0,27	0,28	0,32	0,41	0,87	7,63	26,23	5,00E+09	
	DNIT (N estendido)	5	0,00	0,26	0,35	0,81	2,92	7,54	22,51	47,34	60,45	1,99E+09
		6	0,00	0,26	0,32	0,64	2,43	6,87	20,96	54,43	82,70	2,01E+09
		7	0,00	0,26	0,29	0,51	1,83	4,97	17,44	57,92	86,75	2,19E+09
		8	0,00	0,26	0,28	0,37	1,34	3,83	14,92	54,86	96,65	2,37E+09
9		0,00	0,26	0,27	0,32	0,70	2,11	10,87	50,59	100,00	2,52E+09	
10		0,00	0,26	0,27	0,30	0,50	1,16	6,09	43,23	100,00	2,87E+09	
11		0,00	0,26	0,27	0,30	0,44	0,79	3,59	32,46	89,19	3,24E+09	
12		0,00	0,26	0,26	0,30	0,45	0,72	2,40	24,81	80,75	3,55E+09	
13		0,00	0,26	0,26	0,31	0,50	0,85	2,29	20,86	74,25	3,72E+09	
14		0,00	0,26	0,27	0,31	0,67	1,25	3,36	21,37	74,28	3,76E+09	
15		0,00	0,26	0,27	0,32	0,76	1,85	5,26	24,14	70,55	3,64E+09	
SHELL (N estendido)		5	0,00	0,26	0,27	0,38	1,17	2,74	9,04	38,70	58,46	2,86E+09
		6	0,00	0,26	0,26	0,35	1,03	2,76	11,08	43,22	67,49	2,63E+09
		7	0,00	0,26	0,26	0,32	0,93	2,45	11,14	44,79	76,48	2,62E+09
		8	0,00	0,26	0,26	0,29	0,70	2,08	9,73	43,88	85,33	2,70E+09
	9	0,00	0,26	0,26	0,29	0,50	1,35	7,33	46,96	98,82	2,68E+09	
	10	0,00	0,26	0,26	0,28	0,43	0,92	4,55	44,76	100,00	2,89E+09	
	11	0,00	0,26	0,26	0,27	0,42	0,77	3,07	32,43	100,00	3,25E+09	
	12	0,00	0,26	0,26	0,27	0,43	0,82	2,90	27,72	100,00	3,42E+09	
	13	0,00	0,26	0,26	0,28	0,43	0,98	3,33	26,85	100,00	3,45E+09	
	14	0,00	0,26	0,26	0,28	0,45	1,17	5,15	32,37	100,00	3,23E+09	
	15	0,00	0,26	0,26	0,27	0,33	0,52	2,23	14,95	43,90	4,34E+09	

Apêndice G₅ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-50/70-U6 (conclusão)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
SAN (N estendido)	5	0,00	0,27	0,53	1,14	3,86	9,55	23,67	48,35	62,67	1,98E+09	
	6	0,00	0,27	0,42	0,91	3,23	7,94	22,79	51,50	69,77	1,99E+09	
	7	0,00	0,26	0,33	0,55	1,89	5,12	15,94	45,56	68,90	2,38E+09	
	8	0,00	0,26	0,30	0,40	1,12	2,80	10,89	39,98	67,97	2,79E+09	
	9	0,00	0,26	0,29	0,35	0,89	2,42	9,03	43,59	90,12	2,73E+09	
	10	0,00	0,26	0,28	0,31	0,54	1,33	6,08	35,42	82,55	3,07E+09	
	11	0,00	0,26	0,27	0,30	0,44	0,82	3,55	29,61	76,31	3,35E+09	
	12	0,00	0,26	0,27	0,30	0,43	0,69	2,28	23,70	71,27	3,63E+09	
	13	0,00	0,26	0,27	0,31	0,47	0,76	2,08	18,29	66,74	3,86E+09	
	14	0,00	0,26	0,27	0,30	0,56	0,98	2,52	16,59	56,72	4,06E+09	
	15	0,00	0,26	0,27	0,32	0,73	1,67	4,79	22,96	66,30	3,71E+09	
	CHE (N estendido)	5	0,00	0,48	5,99	10,11	25,61	38,71	54,38	76,66	86,18	7,42E+08
		6	0,00	0,39	2,97	5,68	17,00	30,78	53,23	77,87	88,53	9,85E+08
		7	0,00	0,31	1,65	3,01	9,74	20,92	44,28	73,54	87,02	1,25E+09
		8	0,00	0,28	0,83	1,57	4,99	10,91	29,02	63,89	83,03	1,69E+09
9		0,00	0,27	0,47	0,76	2,63	6,06	18,40	58,00	80,39	2,10E+09	
10		0,00	0,26	0,36	0,46	1,26	3,19	10,06	43,53	75,35	2,72E+09	
11		0,00	0,26	0,30	0,35	0,68	1,49	5,62	27,89	62,77	3,42E+09	
12		0,00	0,26	0,29	0,32	0,56	1,15	4,37	26,11	63,56	3,56E+09	
13		0,00	0,26	0,28	0,30	0,42	0,70	2,23	17,91	44,42	4,10E+09	
14		0,00	0,26	0,27	0,30	0,44	0,68	1,91	14,99	46,64	4,24E+09	
15		0,00	0,26	0,27	0,30	0,47	0,76	1,93	13,25	41,43	4,43E+09	
PHO (N estendido)		5	0,00	0,27	0,38	0,57	1,40	2,71	6,96	24,46	37,15	4,04E+09
		6	0,00	0,26	0,33	0,45	1,15	2,31	6,57	24,07	40,80	3,92E+09
		7	0,00	0,26	0,30	0,35	0,71	1,37	4,15	18,73	35,71	4,42E+09
		8	0,00	0,26	0,29	0,35	0,71	1,52	4,83	25,01	49,05	3,70E+09
	9	0,00	0,26	0,28	0,31	0,49	1,02	3,84	22,67	50,03	3,74E+09	
	10	0,00	0,26	0,28	0,31	0,47	0,84	3,38	26,12	63,04	3,59E+09	
	11	0,00	0,26	0,27	0,30	0,41	0,66	1,98	18,40	55,63	3,98E+09	
	12	0,00	0,26	0,27	0,30	0,45	0,73	2,07	18,38	58,59	3,96E+09	
	13	0,00	0,26	0,27	0,29	0,49	0,85	2,49	17,51	61,99	3,98E+09	
	14	0,00	0,26	0,27	0,30	0,53	1,30	4,36	25,92	79,19	3,55E+09	
	15	0,00	0,26	0,27	0,29	0,40	0,78	3,20	20,24	55,24	3,96E+09	

Fonte: Autor

Apêndice G₆ – Resumo da AT (%) prevista nas simulações HT considerando revestimento com a mistura CA-BOR (conclusão)

Hipótese	Esp. (cm)	Tempo (meses)										
		0	1	6	12	24	36	60	120	180	N30%	
SAN (N estendido)	5	0,00	0,26	0,26	0,26	0,29	0,36	0,68	3,08	9,22	5,00E+09	
	6	0,00	0,26	0,26	0,26	0,28	0,30	0,41	1,77	5,96	5,00E+09	
	7	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,34	0,93	2,90	5,00E+09	
	8	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,31	0,60	1,53	5,00E+09	
	9	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,43	0,87	5,00E+09	
	10	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,35	0,53	5,00E+09	
	11	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,30	0,38	5,00E+09	
	12	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,32	5,00E+09
	13	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	5,00E+09
	14	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	5,00E+09
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	5,00E+09
	CHE (N estendido)	5	0,00	0,26	0,29	0,31	0,43	0,62	1,44	6,63	14,71	5,00E+09
		6	0,00	0,26	0,31	0,33	0,49	0,77	1,88	9,79	23,56	5,00E+09
		7	0,00	0,26	0,31	0,36	0,60	0,96	2,27	9,58	24,51	5,00E+09
		8	0,00	0,26	0,30	0,34	0,69	1,19	3,34	14,66	32,65	4,73E+09
9		0,00	0,26	0,29	0,32	0,69	1,41	3,53	15,64	36,35	4,46E+09	
10		0,00	0,26	0,27	0,28	0,38	0,66	1,74	7,00	16,85	5,00E+09	
11		0,00	0,26	0,26	0,27	0,30	0,37	0,81	3,40	8,29	5,00E+09	
12		0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,30	0,41	1,77	4,06	5,00E+09	
13		0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,31	0,67	2,00	5,00E+09	
14		0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,39	0,72	5,00E+09	
15		0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,31	0,41	5,00E+09	
PHO (N estendido)		5	0,00	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,35	0,92	2,41	5,00E+09
		6	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,31	0,57	1,27	5,00E+09
		7	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,29	0,44	0,81	5,00E+09
		8	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	0,36	0,57	5,00E+09
	9	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,32	0,44	5,00E+09	
	10	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,29	0,35	5,00E+09	
	11	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,31	5,00E+09	
	12	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,28	5,00E+09	
	13	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	5,00E+09	
	14	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	5,00E+09	
	15	0,00	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	5,00E+09	

Fonte: Autor

APÊNDICE H

Apêndice H₁ – AT (%) prevista nas simulações CC para os meses de medição em campo

Hipótese	Tempo (meses)												
	0	1	7	14	20	27	32	51	57	61	68	72	78
ISD	0	0,00	0,00	0,01	0,02	0,09	0,10	0,68	0,75	1,12	1,52	1,95	2,69
DNIT	0	0,00	0,00	0,05	0,19	0,62	1,18	7,18	10,70	13,81	20,85	25,78	35,03
SHELL	0	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,06	0,42	0,65	0,84	1,26	1,57	2,17
SAN	0	0,00	0,00	0,10	0,26	0,89	1,21	5,59	6,83	8,99	12,02	14,46	18,89
CHE	0	0,00	0,03	0,29	0,54	1,23	1,75	5,86	7,05	8,44	10,67	11,80	15,04
PHO	0	0,00	0,01	0,17	0,27	1,07	1,29	8,87	9,82	13,98	17,71	21,51	28,81

Fonte: Autor