

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

AMACIN RODRIGUES MOREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MAPAS DE TEMPERATURA PARA A APLICAÇÃO EM
PROJETOS DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS COMO CONTRIBUIÇÃO A
REVISÃO DA NBR6118**

CURITIBA

2022

AMACIN RODRIGUES MOREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MAPAS DE TEMPERATURA PARA A APLICAÇÃO EM
PROJETOS DE OBRAS DE ARTES ESPECIAIS COMO CONTRIBUIÇÃO A
REVISÃO DA NBR6118**

**DEVELOPMENT OF TEMPERATURE MAPS FOR APPLICATION IN BRIDGES AS
A CONTRIBUTION TO THE REVISION OF ABNT NBR6118 STANDARD**

Tese apresentada como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Área de Concentração: Engenharia Civil.

Orientador: Dr. Rodrigo Eduardo Catai

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos crédito ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



AMACIN RODRIGUES MOREIRA

DESENVOLVIMENTO DE MAPAS DE TEMPERATURA PARA A APLICAÇÃO EM PROJETOS DE OBRAS DE ARTE ESPECIAIS COMO CONTRIBUIÇÃO A REVISÃO DA NBR6118

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 25 de Fevereiro de 2022

Prof Rodrigo Eduardo Catai, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Ana Carolina Virmond Portela Giovannetti, Doutorado - Faculdade Estácio de Curitiba

Prof Joao Elias Abdalla Filho, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Luiz Alkimin De Lacerda, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Wellington Mazer, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 25/02/2022.

Dedico este trabalho a Deus e a minha
família, razão da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai pela amizade, oportunidade e orientação dispensadas durante a realização deste trabalho.

Aos membros da banca de defesa e de qualificação, Professores João Elias Abdalla Filho, Wellington Mazer, Luiz Alkimin de Lacerda, Ana Carolina Virmond Portela Giovannetti e Cezar Augusto Romano, por toda a colaboração com este trabalho. É uma honra tê-los como avaliadores por suas histórias e exemplos.

Aos Professores do Curso de Pós-Graduação e de Graduação em Engenharia Civil da UTFPR que compartilharam seus conhecimentos e são verdadeiros formadores de pesquisadores na área de Engenharia.

Aos funcionários e amigos do Departamento de Construção Civil que me apoiaram nesse processo de formação, em especial as secretarias, Izabel e Janete, o Chefe do Departamento, Prof. Massayuki Mario Hara, a Coordenadora, Prof. Renata Sá Brito Stramandinoli.

As sócias e colegas do escritório que me deram o suporte necessário durante o período do curso de Pós-Graduação, Stela Mara de Souza da Nóbrega e Patrícia Fontana.

Ao Paulo Henrique Cardoso Filho pelos ensinamentos sobre QGis e pelo auxílio no desenvolvimento dos estudos estatísticos.

A Janete Erika Fujihara pela grande colaboração na revisão, formatação e auxílio para a conclusão deste documento.

Aos meus pais, Zenes e Maria José (*in memoriam*), irmãos, padrinho, sogros, cunhados e demais familiares pelo apoio na minha formação.

A Márcia, minha mulher, e aos meus filhos Gabriel Luis, Gustavo Henrique e Giovanni Paulo por todo o amor e paciência que me fortaleceram para a conclusão deste trabalho.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia, INMET, pela disponibilização dos dados de monitoramento de temperaturas das estações meteorológicas.

E a todos os que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

*Por vezes sentimos que aquilo que fazemos
não é senão uma gota de água no mar. Mas
o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.*

(Madre Teresa de Calcutá)

RESUMO

No Brasil, as ações referentes à temperatura uniforme para a análise de estruturas são definidas com o emprego de um procedimento simplificado abandonado pelos códigos de projeto europeu e americano desde o início dos anos 2000. Esta situação tem gerado uma lacuna no critério de análise estrutural, em especial das estruturas das obras de arte especiais, devido aos efeitos produzidos pela variação da temperatura sobre os elementos estruturais, aparelhos de apoio, juntas e elementos de fundação. Além do impacto nos níveis de segurança, manifestações patológicas têm sido encontradas em obras existentes tendo como provável origem as ações térmicas do meio ambiente, afetando as condições de manutenção e durabilidade. Por outro lado, a ocorrência do aquecimento global tem afetado o clima e a temperatura ambiente, tendo-se uma modificação nos valores extremos e na amplitude das temperaturas. Por meio da revisão bibliográfica e da análise do comportamento de algumas estruturas, foram analisados os procedimentos recomendados pelas diversas normas existentes e pelas pesquisas recentes sobre o tema, concluindo-se que os modelos normativos atuais utilizam as temperaturas extremas do ar à sombra como referência para a determinação das ações empregadas nos projetos, bem como, mapas para o registro e consulta dos valores dessas temperaturas. O estudo permitiu concluir, ainda, que o modelo recomendado pelo Eurocode, a norma de projetos europeia, com diversas aplicações recentes, se apresenta adequado para a utilização dos dados das estações meteorológicas instaladas no Brasil, considerando o período de dados disponível, a localização das estações e a extensão do território brasileiro. Dentro deste contexto, a presente pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento de mapas de temperaturas para a aplicação em projetos estruturais como uma contribuição a definição das ações de temperatura e a futura revisão da NBR6118, atendendo a delegação da NBR7187:2021. Para isto, foi desenvolvido um procedimento metodológico, envolvendo os processos de seleção, tratamento e análise dos dados para obtenção de curvas de ajuste para determinação, com um grau de confiança de 90%, dos valores extremos de temperaturas máxima e mínima para o tempo de recorrência de 100 anos de cada estação meteorológica, bem como, para transferência dos resultados e geração de isocurvas em mapas georreferenciados. Apesar das dimensões continentais do Brasil e das variações climáticas encontradas entre as diferentes regiões, a conclusão é que a aplicação do procedimento proposto resulta em mapas em que a interpolação do conjunto de dados gera uma transição de valores continua na direção norte-sul, atendendo os valores estimados, e a possibilidade de emprego pelos projetistas de estruturas de modo similar ao empregado pelas normas internacionais citadas.

Palavras-chave: Ações de temperatura em estruturas; Temperaturas em pontes; Mapas de temperaturas para projeto.

ABSTRACT

In Brazil, uniform temperature actions for the structures analysis are defined using a simplified procedure abandoned by European and American design codes since the beginning of the 2000s. This situation has generated a gap in criteria for structural analysis, especially for bridges, due to the effects produced by temperature variation on structural elements, supports, joints and foundation elements. Impact on safety levels and pathological manifestations have been found in bridges due to the thermal actions of the environment, affecting maintenance and durability conditions. On the other hand, the occurrence of global warming has affected the climate and the ambient temperature, with a change in the extreme values and in the amplitude of temperatures. Through a literature review and an analysis of the behavior of some structures, the procedures recommended by the various existing standards and by recent research on the subject were analyzed, concluding that the current normative models use the extreme shade air temperatures as a reference to determine the actions employed in the designs, as well as maps for recording and consulting the values of these temperatures. The study concluded that the model recommended by Eurocode, the European design standard, with several recent applications, is suitable for the use of data from meteorological stations installed in Brazil, considering the period of data available, the stations location and the extension of the Brazilian territory. Within this context, the present research aimed to develop temperature maps for application in structural projects as a contribution to the future revision of NBR6118 Standard, attempting the criteria of NBR7187:2021 Standard. Thus, a methodological procedure was developed involving the processes of selection, treatment and analysis of data to obtain adjustment curves for determination, with a degree of confidence 90%, of the extreme values of maximum and minimum temperatures for the recurrence time of 100 years for each meteorological station, as well as for transferring the results and generating isocurves on georeferenced maps. Despite the continental dimensions of Brazil and the climatic variations found between the different regions, the conclusion is the application of the proposed procedure results in maps in which the interpolation of the dataset generates a continuous transition of values in the north-south direction, taking into account the estimated values, and the possibility of use by the designers of structures in a similar way to that used by the aforementioned international standards.

Keywords: Temperature actions on structures; Bridge temperatures; Temperature maps for design.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Palavras chaves utilizados em pesquisa sobre temperatura em estruturas.	22
Figura 2 - Análise do número de publicações por periódico sobre temperatura em estruturas.	24
Figura 3 - Resultados do calor de hidratação para pasta de cimento Portland sem e com aditivos superplastificantes.	25
Figura 4 - Fatores que afetam a troca de calor e a temperatura das estruturas.	30
Figura 5 - Variação do fotoperíodo ao longo do ano para diversas latitudes.	31
Figura 6 - Variação da irradiação de acordo com as condições climáticas.	31
Figura 7 - Sombras produzidas e reflexos no entorno.	32
Figura 8 - Simulação de uma ponte da BR101-BA.	37
Figura 9 - Resultado dos deslocamentos da estrutura para o caso de apoios com restrição ao deslocamento horizontal.	38
Figura 10 – Resultado dos deslocamentos da estrutura considerando a simulação a interação do solo com molas.	38
Figura 11 – Deslocamentos, rotações e esforços de flexão gerados na seção transversa devido a variação de temperatura.	39
Figura 12 - Detalhe de aparelho de apoio de neoprene fretado com distorção por efeito da temperatura em ponte na BR101-ES.	40
Figura 13 - Fissuras em pontes devido aos efeitos da distribuição da temperatura –	41
Figura 14 - Representação esquemática das variações geométricas da seção em função dos efeitos da temperatura uniforme e do gradiente de temperatura.	43
Figura 15 - Representação das componentes da temperatura ao longo das seções.	43
Figura 16 - Diagrama de distribuição da temperatura ao longo da altura da peça da NBR7187:1987.	55
Figura 17 - Variação linear de temperatura ao longo da altura da seção transversal.	56
Figura 18 - Distribuição da temperatura ao longo da altura da seção transversal.	57
Figura 19 - Códigos europeus e sua integração.	58
Figura 20 - Diagrama de distribuição da temperatura ao longo da altura da peça do Eurocode 1991-1-5.	59
Figura 21 - Diagrama de distribuição da temperatura ao longo da altura da peça, medidas em cm.	59
Figura 22 - Zonas de radiação solar para os Estados Unidos.	60
Figura 23 - Mapa proposto por Roeder e incorporado a AASHTO Standard para temperaturas mínimas de projeto em graus Fahrenheit (°F).	65
Figura 24 - Mapa proposto por Roeder e incorporado na AASHTO para temperaturas extremas máximas de projeto em graus Fahrenheit (°F).	66
Figura 25 - Mapa de temperatura máxima do ar à sombra na República Tcheca.	67

Figura 26 - Mapa de temperatura mínima do ar à sombra na República Tcheca.....	68
Figura 27 - Mapa de temperatura máxima do ar à sombra na Bulgária.	69
Figura 28 - Mapa de temperatura mínima do ar à sombra na Bulgária.	69
Figura 29 - Correlação entre temperaturas extremas do ar à sombra e componentes da temperatura uniforme em pontes	71
Figura 30 - Incertezas típicas no processo de engenharia aplicada as temperaturas extremas.....	73
Figura 31 - Histograma de valores extremos de temperaturas máximas de Porto Alegre/RS.....	78
Figura 32 - Papel de probabilidade de Gumbel genérico.	79
Figura 33 – Estudo de máximos utilizando planilha eletrônica e as funções de distribuição de Weibull e Gumbel.	80
Figura 34 - Método proposto para obtenção dos mapas de temperatura.....	85
Figura 35 - Mapa das estações meteorológicas do Brasil em operação.	89
Figura 36 – Correlações de Pearson para as amostras das cidades.	90
Figura 37 – Método de tratamento de dados proposto para a obtenção das temperaturas extremas.	93
Figura 38 - Temperaturas em cidades representativas das regiões do país do ano de 2015.	97
Figura 39 - Temperaturas em cidades representativas das regiões do país do ano de 2020.	98
Figura 40 – Legenda do <i>boxplot</i>	98
Figura 41 – Temperaturas Extremas entre 1991 a 2020 por períodos.....	100
Figura 42 – Amplitude das Temperaturas Extremas entre 1991 a 2020 por períodos.	101
Figura 43 – Temperaturas mínimas em julho do Brasil, no período de 1981 a 2010.	102
Figura 44 - Temperaturas máximas em dezembro do Brasil, no período de 1981 a 2010.	103
Figura 45 - Temperaturas médias anuais do Brasil, no período de 1981 a 2010....	104
Figura 46 - Localização e situação do viaduto de acesso a PR415.	108
Figura 47 – Variação de temperatura do viaduto de acesso a PR451.	110
Figura 48 – Temperaturas máximas e mínimas no período de monitoramento do viaduto da PR451	112
Figura 49 – Gráfico com série de leituras diárias de temperatura do período de estudo da estação A801 – Porto Alegre/RS.	113
Figura 50 – Organização dos dados de temperaturas máximas e mínimas diárias fornecidos pelo INMET.	114
Figura 51 – Histograma e funções de densidade probabilidade da amostra das temperaturas.	116
Figura 52 – Série temporal de temperaturas máximas anuais para Porto Alegre. ...	117
Figura 53 - Série temporal de temperaturas mínimas anuais para Porto Alegre.....	118
Figura 54 – Funções de distribuição com ajustes aos dados fornecidos.	119
Figura 55 – Período de retorno (em anos) versus temperatura máxima (°C).	119

Figura 56 – Resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov para o exemplo.	120
Figura 57 – Valores das temperaturas máximas para as funções de acordo com o período de retorno selecionado.	121
Figura 58 – Valores das temperaturas máximas para o intervalo de confiança de 90%.	122
Figura 59 - Período de retorno (em anos) versus temperatura mínima (°C).	123
Figura 60 - Valores das temperaturas mínimas para as funções de acordo com o período de retorno selecionado.	123
Figura 61 – Valores das temperaturas mínimas para o intervalo de confiança de 90%.	124
Figura 62 – Funções utilizadas na estimativa dos valores extremos de temperatura.	125
Figura 63 – Mapa das temperaturas máximas do ar à sombra da região norte com tempo de recorrência de 100 anos.	127
Figura 64 – Mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra da região norte com tempo de recorrência de 100 anos.	127
Figura 65 – Mapa das temperaturas máximas do ar à sombra da região nordeste com tempo de recorrência de 100 anos.	128
Figura 66 – Mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra da região nordeste com tempo de recorrência de 100 anos.	129
Figura 67 – Mapa das temperaturas máximas do ar à sombra da região centro-oeste com tempo de recorrência de 100 anos.	130
Figura 68 – Mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra da região centro-oeste com tempo de recorrência de 100 anos.	130
Figura 69 – Mapa das temperaturas máximas do ar à sombra da região sudeste com tempo de recorrência de 100 anos.	131
Figura 70 – Mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra da região sudeste com tempo de recorrência de 100 anos.	132
Figura 71 – Mapa das temperaturas máximas do ar à sombra da região sul com tempo de recorrência de 100 anos.	133
Figura 72 – Mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra da região sul com tempo de recorrência de 100 anos.	133
Figura 73 – Mapa das temperaturas máximas do ar à sombra do Brasil com tempo de recorrência de 100 anos.	136
Figura 74 – Mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra do Brasil com tempo de recorrência de 100 anos.	137
Fotografia 1 - Estação Meteorológica Automática típica – EMA.	87
Fotografia 2 - Componentes de uma Estação Meteorológica Automática típica – EMA.	88
Fotografia 3 – Modelo Estação Meteorológica Convencional, Campus Medianeira da UTFPR.	88
Fotografia 4 – Vista lateral do viaduto de acesso a PR451.	109
Fotografia 5 – Vista inferior da estrutura do viaduto de acesso a PR451.	110

Quadro 1 - Funções de distribuição	81
Quadro 2 - Medições de temperatura em estruturas.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela 1 da NBR7187:1987.....	55
Tabela 2 – Distribuição de temperatura para diferentes alturas da seção e espessuras de revestimento.....	57
Tabela 3 - Tabela 1 da NBR7187:1987.....	60
Tabela 4 – Teste de Tukey. Valores de -p.....	99
Tabela 5 – Teste de Tukey. Intervalos de Confiança.	99
Tabela 6 – Valores de temperaturas máximas e mínimas anuais – Estação A801.	115
Tabela 7 – Amostra da planilha de transferência de dados para o software QGIS.	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BA	Bahia
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos
CEN	Comissão de Normalização Europeia
DD	Depuração de Dados
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i> (Instituto Alemão para Normatização)
EMA	Estação Meteorológica Automática
EN	Normas Europeias
ELS	Estados Limites de Serviço
ELU	Estados Limites Últimos
ES	Espírito Santo
ETA	Estação de Tratamento de Água
FDC	Função de Distribuição Cumulativa
GEV	<i>Generalized Extreme Value</i> (Distribuição Generalizada de Valores Extremos)
HSP	Hora de sol pleno
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDR-PR	Instituto de Desenvolvimento Rural-Paraná
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
JCSS	<i>Joint Committee of Structural Safety</i>
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
NBR	Norma Brasileira
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>

(Programa Nacional Cooperativo de Pesquisas de Rodovias)

MLR	Regressão Múltipla Linear
ONU	Organização das Nações Unidas
PD	Processamento de Dados
PP	Pré-processamento
PT	Processamento de temperatura estimada
PR	Paraná
RR	Regressão Robusta
RS	Rio Grande do Sul
SRC	Sistema de Referência de Coordenadas
SVR	Suporte a Regressão Vetorial
TD	Transferência de Dados
US	<i>United States</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	19
1.1.1 Objetivo geral.....	19
1.1.2 Objetivos específicos	19
1.2 Justificativas	19
1.3 Delimitação do tema	20
1.4 Estrutura da tese	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Ações térmicas em estruturas	24
2.1.1 Termodinâmica e a mecânica dos corpos sólidos	27
2.1.2 Fatores relacionados à variação térmica das estruturas.....	29
2.1.3 Efeitos da variação da temperatura nos elementos estruturais	37
2.1.4 Componentes das ações térmicas.....	42
2.2 Evolução dos estudos das ações térmicas em estruturas	47
2.2.1 Histórico sobre a evolução das pesquisas sobre temperatura no projeto de estruturas	47
2.2.2 Considerações sobre a temperatura nas principais normas vigentes.....	54
2.2.3 Métodos de determinação das temperaturas para projeto.....	62
2.3 Critérios relacionados aos Estados Limites de Projeto	72
2.4 Estatística de valores extremos	77
2.5 Considerações sobre a revisão bibliográfica	84
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	85
3.1 Métodos e técnicas	85
3.2 Levantamento e seleção dos dados	86
3.3 Comportamento da temperatura	91
3.4 Tratamento dos dados de temperatura	92
3.5 Mapas de temperaturas extremas para o Brasil	94
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
4.1 Fase preliminar: análise do comportamento das temperaturas	97
4.2 Temperaturas máximas e mínimas	113
4.3 Mapas de temperaturas extremas por regiões	125
4.4 Mapas de temperaturas extremas para o Brasil	134
5 CONCLUSÕES	140
REFERÊNCIAS	144

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto estão sujeitas a inúmeras ações que provocam o surgimento de esforços internos solicitantes e para os quais a engenharia desenvolveu modelos de análise para a garantia da segurança e para o adequado desempenho ao longo de sua vida útil. Dentre os diversos esforços gerados, os provenientes da ação da temperatura têm motivado diversas revisões em normas estrangeiras, especialmente no que se refere à estimativa dos valores das amplitudes de temperaturas a considerar e o fluxo no interior dos elementos estruturais (FORMICHI, 2016).

No caso das pontes, segundo OBrien *et al.* (2020), deve ser considerada a sua importância na infraestrutura de transporte e na economia regional, bem como, devem ser atendidos os níveis de exigência de servicibilidade e de segurança dos usuários. Para tanto, apresenta-se a necessidade da determinação com a máxima precisão possível das estimativas das condições de operação correntes e futuras para a garantia da vida útil, levando em conta todas as incertezas, incluindo os efeitos das condições ambientais, em especial da temperatura.

Esta ação muitas vezes é desprezada na análise estrutural, tendo-se a avaliação equivocada que apenas estruturas com grandes dimensões tem o desempenho afetado. Em outros casos, a ação é avaliada apenas em partes da estrutura, não se verificando a extensão dos efeitos que podem afetar os sistemas de apoio e os vínculos, as vedações e revestimentos, bem como, as fundações das estruturas (KROMANIS; KRIPACARAN, 2014; WHITE; RYAN; BUCKLE, 2017).

Em determinados casos, os efeitos combinados das ações e as restrições definidas pelo projetista provocam distorções e esforços acima dos limites estabelecidos devido a limitação do conhecimento da magnitude da ação e da distribuição multidimensional dos efeitos, tanto nos Estados Limites de Serviço quanto nos Estados Limites Últimos de Projeto.

No Brasil, os critérios de ações referentes à temperatura e os correspondentes efeitos sobre as estruturas de concreto armado emprega um modelo simplificado, tendo-se utilizado valores únicos para todo o país, desconsiderando a extensão do país e a variação nas características climáticas de cada região. Este procedimento simplificado foi abandonado desde o início dos anos 2000 pelos códigos de projeto

européu e americano (FORMICHI, 2016) e, portanto, necessita de uma atualização na normalização.

A situação tem gerado uma lacuna no critério de análise estrutural, em especial das estruturas das obras de arte especiais, criando situações onde os valores das ações de temperatura podem se apresentar exagerados, enquanto em outras situações não atingem o nível real e, assim, os esforços gerados por sua atuação. Como resultado disso, manifestações patológicas têm sido encontradas em obras existentes tendo como provável origem as ações térmicas do meio ambiente (PINHO; ARAÚJO; RÉGIS, 2010; ZHOU *et al.*, 2020).

Por outro lado, a ocorrência do aquecimento global tem afetado o clima e a temperatura ambiente, tendo-se uma modificação nos valores extremos e na amplitude das temperaturas, fato este mais uma vez destacado no relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) da Organização das Nações Unidas (ONU) (IPCC, 2021). Estas alterações acabam por exigir novos estudos sobre os efeitos das mudanças climáticas, bem como, a revisão dos valores a serem utilizados na simulação do comportamento das estruturas ao longo de sua vida útil para fins de projeto e para a avaliação de estruturas existentes (CROCE *et al.*, 2018; NARS *et al.*, 2021).

Estudos recentes têm buscado o entendimento da participação de outras variáveis na definição da temperatura efetiva de projeto como, por exemplo, a direção, sentido e intensidade dos ventos, a orientação e morfologia das obras, a altitude, a incidência solar, entre outros parâmetros que devem ser interpretados dentro dos procedimentos normativos atuais tendo como base a temperatura do ar à sombra obtida nos mapas locais (ABID; TYSI; ÖZAKÇA, 2020; XIANG *et al.*, 2021).

Dentro deste contexto, a presente pesquisa busca contribuir com a normalização nacional que orienta os critérios de projetos de estruturas de concreto, em especial a ABNT NBR6118: Projetos de Estruturas de Concreto e a NBR7187: Projeto de Pontes, apresentando um estudo sobre os parâmetros relacionados às temperaturas uniformes, parcela que afeta os deslocamentos longitudinais e transversais das estruturas, de modo a subsidiar as alterações necessárias nos processos de revisão das mesmas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um procedimento metodológico para a obtenção de mapas de temperaturas extremas para o Brasil para a aplicação em projetos de estruturas de pontes.

1.1.2 Objetivos específicos

Dentro do processo de estudo para atingir o objetivo geral, encontram-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as variáveis envolvidas na definição de valores extremos de temperatura uniforme do ar para projetos;
- Definir o modelo de análise dos dados para a geração dos valores extremos de temperatura a ser aplicado;
- Elaborar um procedimento de tratamento dos dados para a obtenção dos valores extremos de temperatura uniforme do ar;
- Definir critérios de obtenção e representação dos isovalores de temperatura para a elaboração dos mapas.

1.2 Justificativas

A primeira justificativa para o estudo a se considerar é a ausência de parâmetros mais realistas para a consideração dos efeitos da temperatura nas estruturas no Brasil. Neste sentido, o modelo simplificado que consta na normalização brasileira se utiliza de valores únicos e válidos para toda a extensão do país, sem considerar as diferenças de clima e a geografia local que afetam a intensidade e a amplitude da temperatura, bem como, o fluxo de calor do meio ambiente e nos elementos componentes das estruturas.

Apesar dos esforços do Comitê Técnico da Associação Brasileira de Normas Técnicas em manter a normalização atualizada, deve ser considerada a defasagem desta questão em relação aos códigos internacionais que servem de modelo para as

atualizações normativas brasileiras, onde a utilização de mapas de temperatura são estudados, desenvolvidos e aplicados a mais de vinte anos.

Além disso, estudos recentes, como de He *et al.* (2021), indicando o estado da arte, vem buscando empregar modelos probabilísticos de análise do desempenho das estruturas frente as ações de temperatura, como uma evolução do modelo semi-probabilístico utilizado no Método dos Estados Limites, que tem como ponto essencial a definição mais precisa dos valores das variáveis atuantes.

Assim, este estudo contribui com a atualização da normalização, apresentando um novo procedimento para a consideração dos efeitos da temperatura sobre as estruturas, bem como, para a disseminação dos conhecimentos relacionados ao tema.

1.3 Delimitação do tema

Na revisão bibliográfica foi possível identificar a extensão do tema e a abordagem das pesquisas atuais que envolvem os efeitos da temperatura nas estruturas, sendo uma área de estudo abrangente, envolvendo aspectos de simulação estrutural e monitoramento do comportamento dos diversos tipos de estruturas. Nestes estudos, há considerações sobre as morfologias, a identificação das variáveis e suas influências nas variações da temperatura, análise do fluxo de calor entre as partes da estrutura, tais como a temperatura do ar, a direção, o sentido e a intensidade dos ventos, a orientação e características das superfícies, além da altitude e a incidência solar. Apesar de existirem registros de dados climáticos no Brasil desde o início do século passado, os pontos de coleta estavam concentrados nas capitais e apenas em algumas outras cidades. Considerando a distribuição das estações meteorológicas no território brasileiro ao longo do tempo e sua atualização desde 1990, passando a utilizar modernos sistemas automáticos, foram focalizados os dados dos últimos trinta anos que, do ponto de vista estatístico, viabilizou a estimativa dos valores para o intervalo de recorrência de 100 anos. Assim, este estudo se propôs a desenvolver um modelo de definição de valores de temperatura uniformes máximos e mínimos a serem considerados nas análises estruturais em acordo com os parâmetros atuais dos métodos dos estados limites de projeto, tomando-se os dados do sistema integrado disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), válido para o território brasileiro. Desta forma, questões que dizem respeito às variações não

uniformes e os efeitos secundários não foram considerados. Ainda, observa-se como limitação a ausência de dados em regiões com altitudes superiores a 1300 metros, para os quais se recomenda que sejam elaborados estudos específicos com o monitoramento local ou através de busca de registros regionais que não constem do banco de dados do sistema integrado brasileiro.

Apesar dos mapas resultantes do trabalho possibilitarem o uso dos valores de temperatura para projeto de estruturas quaisquer, neste trabalho se enfatizou as pontes pela semelhança da morfologia e materiais, situação que não ocorre com as construções de edifícios face aos diferentes materiais de vedação e revestimentos utilizados, exigindo, portanto, estudos complementares para sua aplicação.

1.4 Estrutura da tese

Esta tese está organizada em cinco capítulos, tendo como primeiro capítulo a introdução e a definição dos objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica, abordando o levantamento do conhecimento relacionado às ações térmicas em estruturas, bem como, apresentando um histórico da evolução dos estudos nesta área e os conceitos de estatística de valores extremos.

No capítulo 3 estão apresentados os métodos e técnicas propostos para o desenvolvimento do trabalho, incluindo os procedimentos de coleta de informações, tratamento de dados e obtenção dos valores representativos das temperaturas de projeto, assim como, para elaboração dos mapas de temperaturas de projeto.

No quarto capítulo constam os resultados obtidos desde os estudos iniciais até a obtenção dos valores representativos para cada cidade e dos mapas para o Brasil, acompanhados da discussão e esclarecimentos sobre a solução obtida.

Finalmente, no quinto capítulo, são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho, além de recomendações para continuidade das pesquisas sobre o efeito das temperaturas nas estruturas e sobre o processo de atualização de mapas e critérios normativos relacionados ao tema.

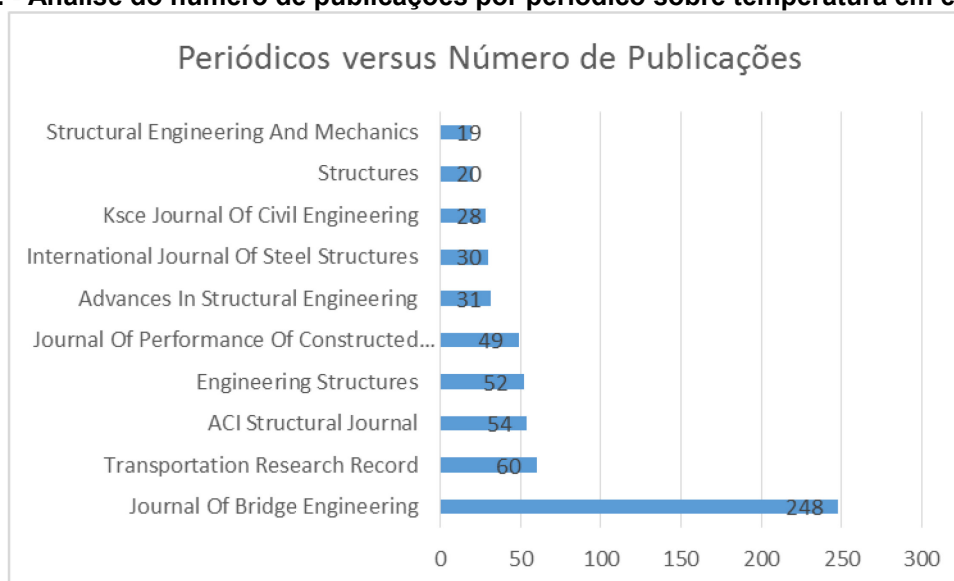
A palavra chave do tema temperatura é observada compondo-se com os estudos relacionados à distribuição de temperatura (*temperature distribution*) e variação de temperatura (*temperature variation*). O termo gradiente térmico (*thermal gradients*) tem sido empregado em alguns locais de estudo, caracterizando os problemas de variação de temperatura nas seções das estruturas, conforme análise dos objetivos dos artigos. Dentro desta área, se destaca também o termo pontes em seção caixão (*box girder bridges*), onde diversos estudos têm buscado entender os efeitos da variação da temperatura e o correspondente fluxo de calor neste tipo de seção, tendo em vista os esforços que são gerados transversalmente para essa morfologia de estrutura, afetando tanto estruturas de concreto, como estrutura metálicas e mistas.

As revisões de mapas de temperatura no continente europeu aconteceram a partir de 2010, sendo apresentados em seminários diversos resultados produzidos, já que o Eurocode, o código de projeto europeu, transferiu a responsabilidade para cada país produzir o mapa de temperatura para projetos de estruturas. Porém, segundo Formichi (2016), nem todos os países elaboraram os mapas da sua região.

Na América do Norte, destacam-se as pesquisas referentes a monitoramento e a simulação de estruturas existentes nos Estados Unidos, mas o mapa proposto na norma AASHTO não foi revisado desde a sua publicação original, em 2002, por Roeder (2002).

Em relação ao número de publicações no período de 2010 a 2021, por meio da organização dos dados coletados na base de dados Scopus, foi elaborada a figura 2. Analisando-se este gráfico, o periódico que se destaca trata de pontes, *Journal of Bridge Engineering*, com duzentos e quarenta e oito artigos publicados sobre o tema, demonstrando que os estudos de problemas de engenharia relacionados à temperatura estão vinculados a este tipo de estrutura. Dos outros periódicos apresentados, apesar de abordarem uma temática mais ampla, apresentaram o maior número de estudos também relacionados às obras de artes especiais, com destaque para o periódico *Transportation Research Record*, com sessenta artigos publicados, o periódico do *American Concrete Institute (ACI)*, com 54 artigos, além do periódico *Engineering Structures* e *Journal of Performance of Constructed Facilities*, com 52 e 49 artigos, respectivamente.

Figura 2 - Análise do número de publicações por periódico sobre temperatura em estruturas.



Fonte: Autoria própria (2021), através da consulta da base de dados Scopus.

Assim, nesta revisão bibliográfica estão apresentados os conteúdos que auxiliaram a construção do conhecimento relativo à pesquisa elaborada, buscando levantar os conceitos gerais e os estudos já elaborados sobre os efeitos da temperatura nas estruturas de concreto. Dentro deste capítulo, ainda, foram tratados os elementos específicos da fundamentação teórica que permitiram a definição dos métodos e as técnicas que foram aplicados em desenvolvimentos de pesquisas com temas correlacionados aos propostos neste trabalho.

2.1 Ações térmicas em estruturas

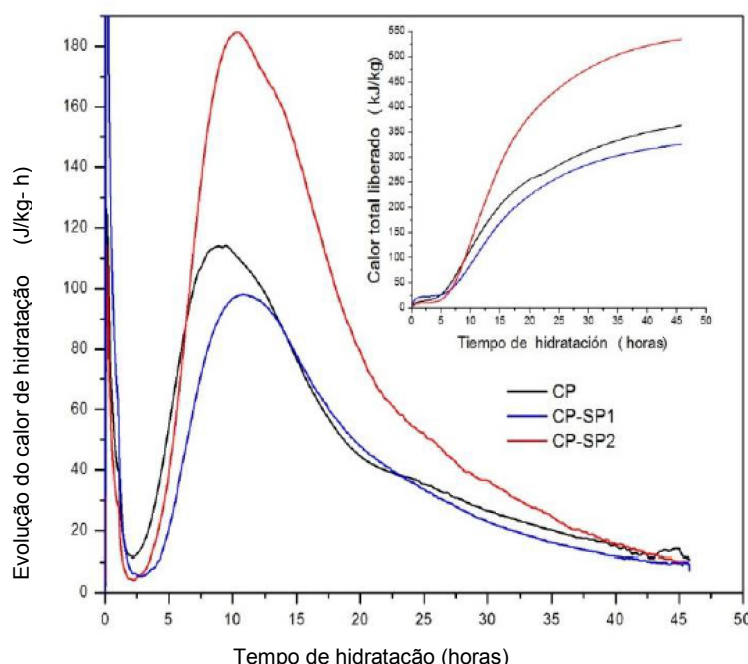
Todas as estruturas estão sujeitas aos efeitos da variação da temperatura. A temperatura como parâmetro de medição do calor e do correspondente fluxo está relacionada a vários fenômenos que alteram o comportamento da estrutura desde a etapa da construção e, no caso do concreto, envolve ainda os processos de hidratação do cimento que geram calor. Estas variações iniciais de temperatura têm o ponto de equilíbrio após as trocas de energia com o meio ambiente, com outros materiais em contato e de acordo com as outras fontes de calor que acompanham a vida útil da estrutura.

Esse período de tempo inicial e as deformações inerentes irão variar em função do tipo do cimento utilizado, da relação água-cimento, do tipo de agregado, da temperatura ambiente (LIU *et al.*, 2021), bem como, do volume dos elementos

estruturais, da área de contato com o meio externo, entre outras variáveis, sendo um processo assintótico conhecido da tecnologia do concreto. A título de ilustração, segundo Metha (2008), aproximadamente 50% do calor de hidratação é liberado, no caso do cimento Portland, em um prazo de três dias após a concretagem e 70% até os sete dias. Ainda, de acordo com Neville (2013), 90% do calor estará liberado no período de seis meses após a concretagem.

Na figura 3, destacam-se os resultados obtidos no trabalho de Gómez, García e Acevedo (2015) sobre a análise do calor de hidratação produzido e o calor de hidratação total liberado para pastas de cimento Portland sem aditivos e com a utilização de dois diferentes aditivos superplastificantes, relacionando o tempo de hidratação e o calor liberado. Estes resultados indicam que, acima de 45 horas, a densidade de calor tende ao valor assintótico e reduzido em relação ao atingido entre 5 e 20 horas, corroborando com as informações dos autores citados acima.

Figura 3 - Resultados do calor de hidratação para pasta de cimento Portland sem e com aditivos superplastificantes.



Fonte: adaptado de Gómez, García e Acevedo (2015).

Assim, considerando o período de ação do calor liberado na hidratação do cimento e o período que as estruturas sofrem a desforma e iniciam a operação, as ocorrências tratadas são consideradas apenas para as situações particulares de

elementos onde ocorre a aplicação de grandes volumes de concreto, como no caso de grandes blocos de fundação e barragens de concreto.

Embora se efetue a separação dos fluxos de calor da fase inicial provenientes dos processos de hidratação do cimento dos provenientes da variação da temperatura do ambiente na análise do comportamento das estruturas de concreto, os efeitos provenientes do processo, como a retração e a fluência, são tratados na combinação dos estados limites de projeto. De acordo com os estudos de Wang e Zhao (2018), estes processos devem, inclusive, ser considerados como carregamentos aplicados nos elementos da mesoestrutura em conjunto com os efeitos da temperatura ambiente para o caso de pilares com camisa de aço.

Então, para fins de análise da estrutura sob efeito das trocas de calor com o ambiente se toma como referência a fase de desforma e remoção do escoramento, instante em que os vínculos da estrutura passam a exercer restrições aos movimentos, dentre os quais os provocados pela variação uniforme da temperatura e do correspondente fluxo de calor, os quais vão gerar alteração de volume dos elementos estruturais. A presença destas restrições, impedindo os deslocamentos provocados por estas alterações de volume, é que vão gerar parte dos esforços internos solicitantes provenientes das ações térmicas ao longo da vida útil da estrutura.

A outra parcela é derivada das temperaturas diferenciais e do fluxo de calor entre as faces dos elementos estruturais, que provocam o surgimento de esforços nas seções transversais. A norma brasileira NBR6118 (ABNT, 2014), Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento, no item 11.4.2.2, instrui que nos elementos onde ocorra distribuição com variação não uniforme, os efeitos devem ser considerados e, nestes casos, as solicitações geradas serão tratadas em conjunto, conforme a morfologia da estrutura.

Partindo-se destes esclarecimentos e do objetivo deste trabalho, a revisão visou identificar os mecanismos associados aos efeitos das mudanças de temperatura uniformes prescritos na normalização de estruturas de concreto de diversos países, buscando-se delimitar as variáveis envolvidas e levantar os procedimentos metodológicos que podem ser aplicados para a obtenção dos valores de referência para estas temperaturas.

2.1.1 Termodinâmica e a mecânica dos corpos sólidos

Do ponto de vista conceitual, a relação entre a temperatura e o calor é definida através da termodinâmica. Por sua vez, a energia calorífica disponível ao trabalho que provocará as variações volumétricas de um corpo depende da quantidade de energia trocada com o exterior e do equilíbrio energético proposto dentro das leis da termodinâmica.

A termodinâmica é a área da física que estuda os fenômenos de troca de calor, as mudanças de estado e a transformação de um tipo de energia em outra (Rocha, 2010). As quatro leis que regem estas relações são amplas e complexas, mas, dentro deste estudo, satisfaz a observação das relações entre a temperatura e o calor.

O conhecimento da chamada lei zero e que, segundo Rocha (2010), define o conceito de temperatura, tem como base a condição de equilíbrio térmico entre dois corpos. Assim, dentro da perspectiva da termodinâmica e sua visão macroscópica, a temperatura é um parâmetro de medida de transferência de energia térmica na forma de calor, ou seja, a temperatura não é uma medida de calor, mas a diferença de temperatura entre dois corpos é responsável pela transferência de calor entre dois sistemas. Essa ação é derivada da primeira lei da termodinâmica, que tem como princípio a conservação de energia, bem como da segunda lei que trata das trocas de calor (NERY; BASSI, 2009; FONTANA; SANTOS, 2016).

Apenas para recordar, a terceira lei da termodinâmica trata da situação onde o sistema tende ao zero absoluto (FREITAS; PEREIRA, 2019). Este conceito não se relaciona ao presente estudo.

Considerando a interpretação termodinâmica do processo de deformação, o balanço energético em um sólido deformável, de acordo com a primeira lei e considerando o estado infinitesimal próximos, de acordo com Rocha (2010), tem-se:

$$dE = d'Q + d'W, \quad (1)$$

Onde:

dE é a derivada da energia interna

$d'Q$ é a derivada da quantidade de calor trocada com o exterior

$d'W$ corresponde ao trabalho realizado

Agora, considerando a segunda lei, que caracteriza a entropia do processo, onde há presença de uma energia livre e que reduz a energia disponível para transformar em trabalho, tem-se a função, denominada de energia livre de Helmholtz:

$$\psi = E - Ts \quad (2)$$

Onde:

ψ é energia livre no processo

E é a energia interna

T é a temperatura absoluta do sistema

S é a entropia do sistema

Essa função, na afirmação de Rocha (2010), pode ser definida como a máxima energia disponível no sistema para a realização do trabalho.

Assim, tendo-se a solução diferencial da equação (2) e considerando-se a equação (1), obtém-se:

$$d\psi = d'Q + d'W - Tds - sdT \quad (3)$$

Para um processo reversível, como o caso das estruturas, onde não há geração de calor interno, isto é, desprezam-se as condições iniciais de variação da temperatura interna pelos processos de hidratação do concreto, em operação e com deformação reversível em um regime tratado como quase estático, a entropia é dada por:

$$d'Q = Tds \quad (4)$$

Em (3), a equação resume-se a:

$$d\psi = d'W - sdT \quad (5)$$

Considerando o meio ambiente como um reservatório térmico, então sempre se estabelece o equilíbrio, de tal forma que a variação de T ao longo do tempo é desprezível para fins de análise do fenômeno de deformação, tratado, portanto, como em condições isotérmicas. Assim, tem-se $dT = 0$ e aplicando na equação (5):

$$d\psi = d'W \quad (6)$$

Desta forma, pode-se concluir que, nas condições de ausência de geração de calor interno, o sólido apresentará variação da energia livre devido a troca de calor entre dois estados de equilíbrio equivalentes a variação de sua energia de deformação, correspondente ao trabalho realizado.

Desta consideração é possível confirmar a relação direta entre a variação de deslocamentos e a variação de temperatura nos elementos das estruturas, tendo como base a termodinâmica e os conceitos da mecânica aplicada a teoria das estruturas, que validam as formulações da teoria da elasticidade e dos tensores de deslocamento para a consideração da temperatura, classicamente empregados na avaliação das mudanças dimensionais.

Apesar de não haver um aprofundamento deste conteúdo no presente trabalho, tendo em vista o objetivo da pesquisa, a relação entre a variação volumétrica, superficial ou linear e a temperatura pode ser tomada para explicar os fenômenos relacionados e que define o coeficiente de dilatação térmica dos materiais e os fenômenos de distribuições térmicas do ponto de vista da mecânica.

No próximo item serão esclarecidos os fatores que se relacionam ao fluxo de energia calorífica e as equações derivadas da condição de equilíbrio térmico.

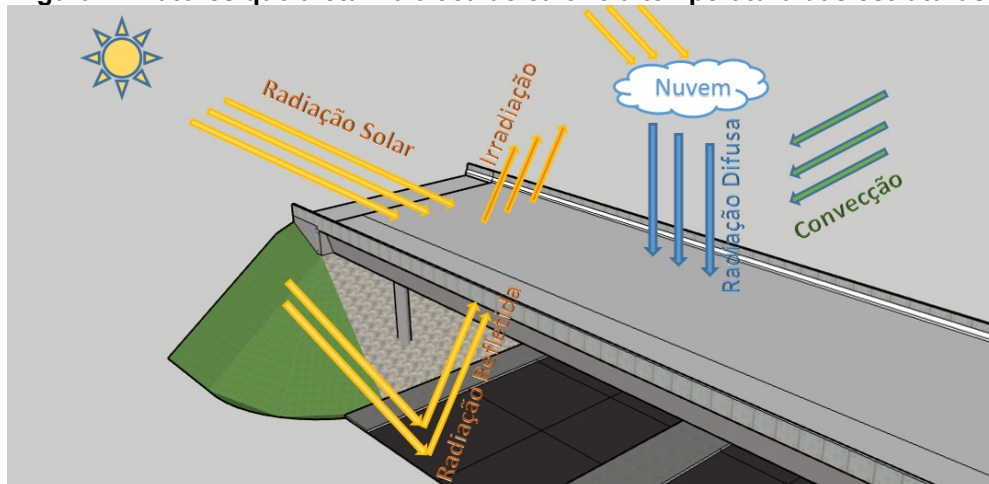
2.1.2 Fatores relacionados à variação térmica das estruturas

Para se determinar os valores de temperatura a considerar para a avaliação do comportamento estrutural de uma estrutura, é necessário, preliminarmente,

descrever os principais fenômenos e fatores que envolvem o processo de distribuição da temperatura (IMBSEN *et al.*, 1985; CHEN, 2008; LARSSON; SVENSSON, 2013;).

Na figura 4, tendo como referência Imbsen *et al.* (1985), Chen (2008); Larsson; Svensson (2013), Zhou; Yi (2013) e Hagedorn *et al.* (2019), estão ilustrados os fatores intervenientes.

Figura 4 - Fatores que afetam a troca de calor e a temperatura das estruturas.

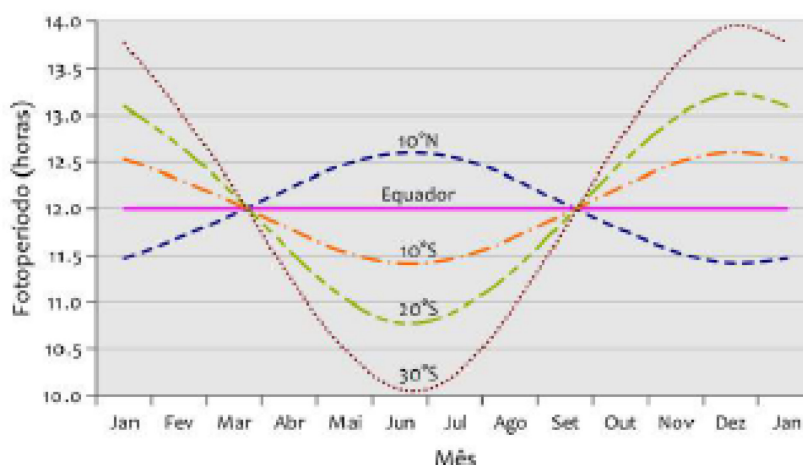


Fonte: Adaptado de Imbsen *et al.* (1985); Chen (2008); Larsson; Svensson (2013); Hagedorn *et al.* (2019).

O primeiro e mais destacado fator é a radiação solar correspondente à energia emitida pelo sol. A exposição das estruturas a ação direta da radiação varia de acordo com a duração do dia, em função da localização, e com a inclinação da terra de acordo com o ciclo anual do Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

A variação ao longo do ano pode ser observada na figura 5, onde se relacionam a magnitude do fotoperíodo, em horas, com a latitude em graus. Nas regiões abaixo da linha do equador, quanto maior o afastamento desta linha, tem-se maior exposição entre os meses de setembro a março, com fotoperíodo entre 12 e 14 horas. Já, para entre os meses de março a setembro, a exposição se reduz, com fotoperíodo entre 10 e 12 horas. Para as regiões acima da linha do equador, os períodos mensais geram exposições inversas as citadas, tendo maior exposição no período entre março e setembro.

Figura 5 - Variação do fotoperíodo ao longo do ano para diversas latitudes.



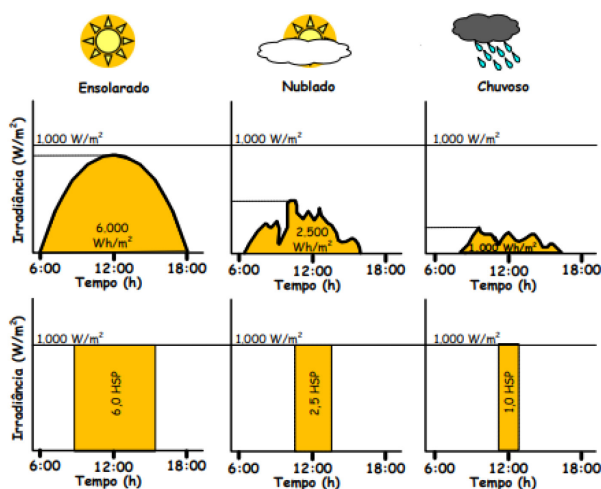
Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2017).

Ainda, deve ser observado que a presença de nuvens ou outras interferências atmosféricas podem afetar a intensidade da radiação dependendo do grau de cobertura, de sua espessura e densidade, tornando-se um fator de difícil controle e mensuração.

Os valores médios da radiação, considerando essas condições, estão apresentados na figura 6, onde se observa o impacto da presença dessas interferências e conseqüentemente nas trocas de calor. O valor da hora de sol pleno (HSP) equivale ao intervalo de tempo diário correspondente a radiação de 1000 W/m^2 .

Comparando os valores da situação do dia chuvoso em relação ao dia ensolarado, tem-se que o primeiro recebe uma radiação equivalente a 17%.

Figura 6 - Variação da irradiação de acordo com as condições climáticas.



Fonte: Pinho et al. (2018).

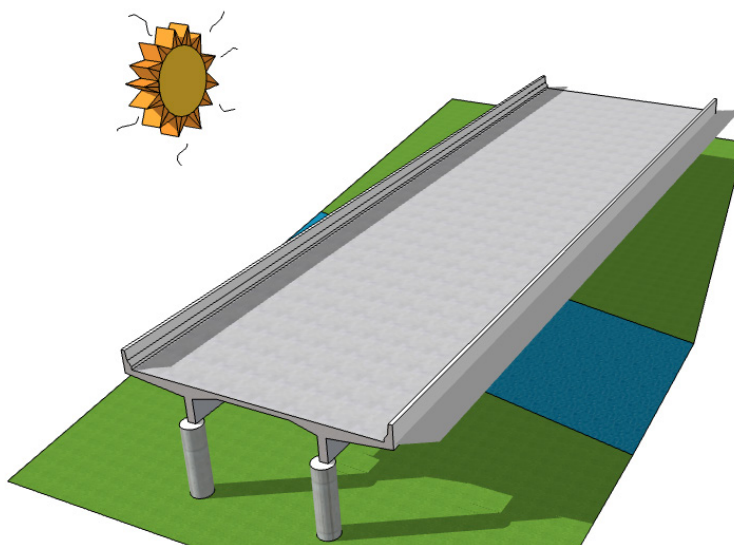
Outra parte da radiação que não atinge diretamente a estrutura, pode ser absorvida através da porção refletida de outras superfícies materiais do entorno, como na figura 4, que exemplifica a parcela advinda da pavimentação da via inferior. Essa irradiação solar decorre da emissão de radiação dos materiais que apresentam temperatura absoluta maior que zero (LARSSON; SVENSSON, 2013).

A convecção diz respeito à troca de calor que ocorre entre a superfície de um elemento sólido com um fluido, como, por exemplo, o ar em movimento. Esse parâmetro caracteriza a possibilidade de transferências positivas e negativas ao longo do ciclo completo de 24 horas e traz um componente influente para a avaliação da temperatura efetiva atuante nas estruturas de concreto.

Além destes fatores, tem-se a condução que trata da transferência de calor entre materiais que compõe a construção, não fazendo parte necessariamente da estrutura, como no caso do solo nos encontros e fechamentos entre pilares e vigas.

Deve-se considerar que, no ciclo de exposição, as características geométricas da estrutura podem afetar o fluxo de calor e os valores da temperatura nos elementos da estrutura, bem como, ao longo de sua seção, como exemplificado na figura 7, onde as barreiras de proteção criam sombras em parte da laje da estrutura conforme o período do dia. Além disso, deve ser considerado que as influências do local, como no caso de presença de rios sob a estrutura, podem alterar as condições de reflexo e a transferência de calor através do ar.

Figura 7 - Sombras produzidas e reflexos no entorno.



Fonte: Autoria própria (2021).

Nos estudos de simulação do comportamento da estrutura de uma ponte através do método dos elementos finitos em um programa computacional, Elbadry e Ghali (1986) relataram os seguintes fatores que deveriam ser considerados:

a) Dados relacionados com a estrutura

1. Geometria da seção transversal;
2. Propriedades térmicas e físicas dos materiais, como condutividade térmica, calor específico e densidade;
3. Natureza e cor das superfícies da estrutura. Expressos em termo de absorvidade da radiação solar, emissividade e coeficiente de convecção da superfície.

b) Dados relacionados com o ambiente

1. Localização geográfica da ponte (latitude e longitude);
2. Orientação da ponte em relação ao norte;
3. Hora do dia e estação do ano;
4. Grau de nebulosidade e turbidez da atmosfera;
5. Condições climáticas, como variações da temperatura ambiente, umidade e velocidade do vento.

Já König e Sukhov (1996) propuseram um programa computacional considerando outras variáveis de entrada, tais como:

- Radiação solar
 - Hora do nascer do sol
 - A duração do dia solar
 - Valor total diário da radiação solar
- Temperatura
 - Temperatura diária máxima do ar à sombra
 - Temperatura diária mínima do ar sombra
 - Os horários das temperaturas máximas e mínimas
 - A temperatura efetiva da estrutura na hora de início de avaliação
- As características geométricas da estrutura
- As propriedades térmicas dos materiais da estrutura:
 - Coeficiente de absorvidade
 - Coeficiente de emissividade

- Coeficiente de transferência da superfície
- Condutividade térmica
- Calor específico
- Densidade do material

Estudos como os de Chen (2008), Rimal e Sindler (2008), Lee (2012) e de Kromanis e Kripakaran (2014) focaram em monitorar estruturas em construção e existentes para comparar os valores preditivos analiticamente, com os obtidos experimentalmente, validando métodos para obras específicas, como no caso de pré-moldados.

As diferenças de temperatura entre as partes de um elemento estrutural são denominadas de gradientes de temperatura e são causadas pelo fluxo de temperatura entre as partes.

No caso do fluxo tridimensional de temperatura, o Código Modelo do Joint Committee of Structural Safety (JCSS, 2015), Larsson e Svensson (2013), Fu, Ng e Cheung (1990) recomendam a solução do problema com a utilização da equação diferencial de Fourier:

$$\frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (7)$$

Onde:

t é o tempo

T é a temperatura

c é o coeficiente de calor específico

ρ é a massa específica

λ é o coeficiente de condução do material

Ainda, segundo o JCSS (2015), no caso de estruturas com uma dimensão dominante, como no caso de vigas das pontes, a variação da temperatura no sentido longitudinal pode ser considerada insignificante, podendo ser assumida como constante nesta direção.

Da solução da equação 7, com a condição inicial de $T = T_0$ no tempo $t = t_0$, a variação da face superior à face inferior pode ser escrita como:

$$\frac{\lambda}{c\rho} \frac{\partial T}{\partial z} \eta_z + q = 0 \quad (8)$$

Onde:

η_z é cosseno direcional do vetor normal

q é a energia trocada entre a estrutura e o ambiente

A energia q é composta de três parcelas, podendo ser escrita como:

$$q = q_s + q_r + q_c \quad (9)$$

Onde:

q_s é a energia da radiação solar (direta e difusa)

q_r é a energia da irradiação

q_c é a energia da transferência térmica

Segundo Larsson e Svensson (2013), poderia ainda ser adicionada a parcela q_v referente a energia gerada pelo calor de hidratação do cimento, contudo para as análises estruturais essa parcela é considerada de modo independente, conforme esclarecido na introdução deste capítulo.

O calor devido à radiação solar é dado por:

$$q_s = k_s m Q \quad (10)$$

Onde:

k_s é o coeficiente de absorvidade

m é um parâmetro dependente da nebulosidade

Q é a intensidade total da radiação solar

A irradiação:

$$q_r = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_v^4) \quad (11)$$

Onde:

ε é a emissividade da superfície da estrutura

σ é a constante de Stephan Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)

T_s é a temperatura na superfície da estrutura

T_v é a temperatura do ambiente do entorno

O calor devido à condução e convecção pode ser escrito como:

$$q_c = h_c(T_s - T_v) \quad (12)$$

Onde:

h_c é o coeficiente de transferência da superfície que depende da velocidade do vento

Os valores das variáveis e parâmetros destas equações que foram aplicados em estudos de casos podem ser obtidos nos artigos de Lu *et al.* (2021) e Zhang *et al.* (2021).

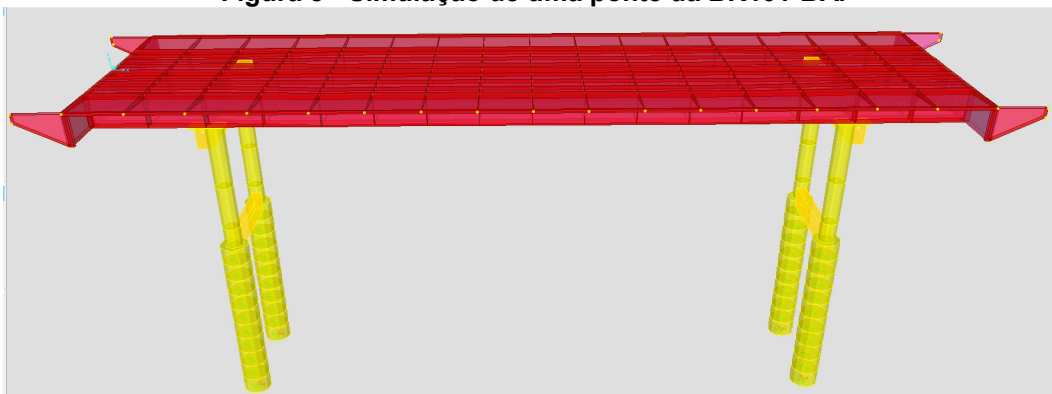
O que pôde ser verificado do contexto apresentado é que há uma quantidade relevante de parâmetros a serem monitorados, coletados e calibrados, geralmente não disponíveis para a aplicação correta na análise do fluxo de calor na fase de projeto. Do ponto de vista dos códigos de projeto, não seria viável indicar um procedimento normativo que incluísse as diversas variáveis nas análises de uma estrutura, considerando os parâmetros de desempenho que devem ser atendidos durante a vida útil da obra, bem como, os modelos de simulação e os métodos de dimensionamento indicados nos Métodos dos Estados Limites de Projeto, conforme se emprega atualmente. Assim, a normalização atual emprega o parâmetro temperatura como única variável para a caracterização dos efeitos solicitantes das estruturas do ponto de vista de critério de projeto.

2.1.3 Efeitos da variação da temperatura nos elementos estruturais

O efeito da temperatura nas estruturas não depende exclusivamente da sua variação para a geração de esforços internos, mas da sua distribuição ao longo da seção e das restrições nos apoios (FU; NG; CHEUNG, 1990; KROMANIS; KRIPAKARAN, 2014; GOTTSÄTER; IVANOV, 2019).

Em uma estrutura de uma ponte elaborada pelo autor, de acordo com a figura 8, modelada física e geometricamente através de elementos finitos de barras e placas de modo a simular o comportamento de uma estrutura real, onde os apoios apresentam certas restrições ao deslocamento horizontal, e sobre a qual é aplicada uma variação de temperatura uniforme de 30°C, positiva, em todos os elementos da superestrutura, pode ser verificado os impactos gerados.

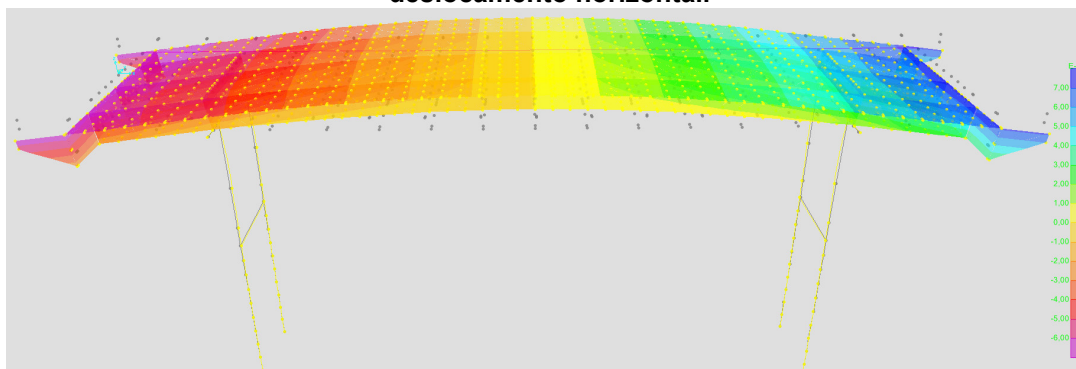
Figura 8 - Simulação de uma ponte da BR101-BA.



Fonte: A autoria própria (2021).

Embora não haja a caracterização pormenorizada da modelagem e das características dos materiais considerados, para fins de ilustração do comportamento da estrutura considerou-se em um primeiro momento a restrição total dos movimentos horizontais dos apoios. Na figura 9, podem ser observados que os deslocamentos verticais provocados pela variação de temperatura implicam na geração de esforços de flexão e axiais ao longo da estrutura. Associado a esse raciocínio, a presença do impedimento de movimentos dos apoios implica na transferência desta reação horizontal para elementos da meso e infraestruturas.

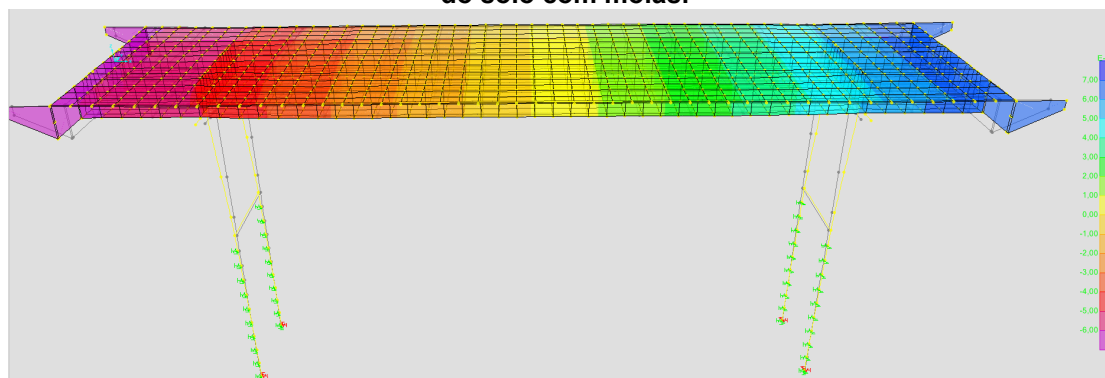
Figura 9 - Resultado dos deslocamentos da estrutura para o caso de apoios com restrição ao deslocamento horizontal.



Fonte: Autoria própria (2021).

Simulando uma situação mais próxima da realidade, onde a meso e a infraestrutura são consideradas com a sua interação com o solo de fundação por meio de apoios elásticos, e na ligação da superestrutura são selecionados pelo projetista aparelhos de apoio elastoméricos, os quais absorvem parte dos deslocamentos, ainda serão observados deslocamentos verticais na superestrutura e, em destaque, deslocamentos horizontais no topo dos elementos da meso estrutura (figura 10).

Figura 10 – Resultado dos deslocamentos da estrutura considerando a simulação a interação do solo com molas.



Fonte: Autoria própria (2021).

Esses deslocamentos estão associados ao surgimento de esforços solicitantes internos de flexão nos elementos, bem como, de resultantes de compressão sobre as camadas do solo de fundação, entre outros.

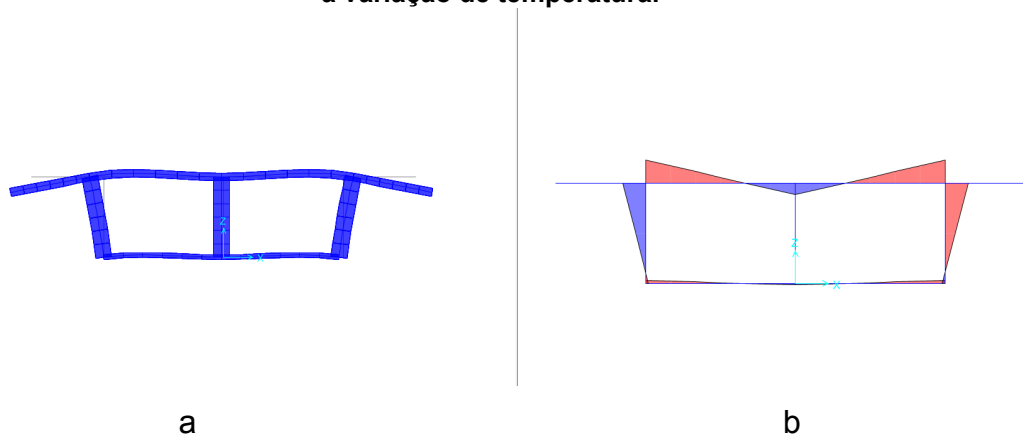
Verma e Mishra (2020) produziram um estudo de pontes integrais com cinco vãos, considerando a interação solo-estrutura, e concluíram que os efeitos dos ciclos de temperatura, associados as cargas repetitivas de tráfego, tem contribuído também para as falhas por fadiga dos materiais, que geralmente ocorrem com valores de

combinações de ações inferiores aos estados limites últimos de projeto. Estes resultados estão em consonância com o estudo de Abdollahnia, Elizei e Kashyzadeh (2021) que avaliaram os danos acumulados por meio da regra de Palmgren-Miner considerando os efeitos da variação da temperatura e das ondas do mar em pontes integrais.

Além destes efeitos, as seções transversais compostas, como as seções caixão unicelular ou multicelulares, estão sujeitas a esforços internos solicitantes derivados da variação uniforme da temperatura. Na figura 11a podem ser observados os deslocamentos e rotações produzidos na seção do viaduto.

Zhou *et al.* (2020) elaboraram estudo experimental em modelo reduzido de seção caixão, com ciclos de carga térmica, destacando a sensibilidade destas seções que, devido a hiperestaticidade da seção, promove as restrições de deslocamentos e rotações, gerando os esforços de flexão apresentados na figura 11b, exigindo a consideração das temperaturas atuantes para fins do dimensionamento e verificação do comportamento da estrutura nos estados limites de projeto.

Figura 11 – Deslocamentos, rotações e esforços de flexão gerados na seção transversa devido a variação de temperatura.



Fonte: Autoria própria (2021).

A simulação apresentada destaca os efeitos da temperatura uniforme nas solicitações internas em estruturas comuns de pontes. As manifestações patológicas associadas a desconSIDERAÇÃO destes efeitos se apresentam sobre a seguinte forma (Hagedorn *et al.*, 2019):

- Danos nos aparelhos de apoio devido a distorção excessiva que não foram considerados no dimensionamento destes e que podem movê-lo do local de apoio;

- Danos em elementos da meso estrutura devido aos esforços de flexão oriundos da variação da temperatura;
- Danos nos elementos de fundação devido a rotações excessivas e acréscimos de cargas normais;
- Fissuras ao longo das faces das longarinas e nas lajes da estrutura.
- Perda de estabilidade lateral em vigas pré-moldadas de seção I.

Na figura 12 é possível observar a distorção provocada pelos efeitos de encurtamento da superestrutura da ponte no aparelho de apoio da estrutura.

Figura 12 - Detalhe de aparelho de apoio de neoprene fretado com distorção por efeito da temperatura em ponte na BR101-ES.



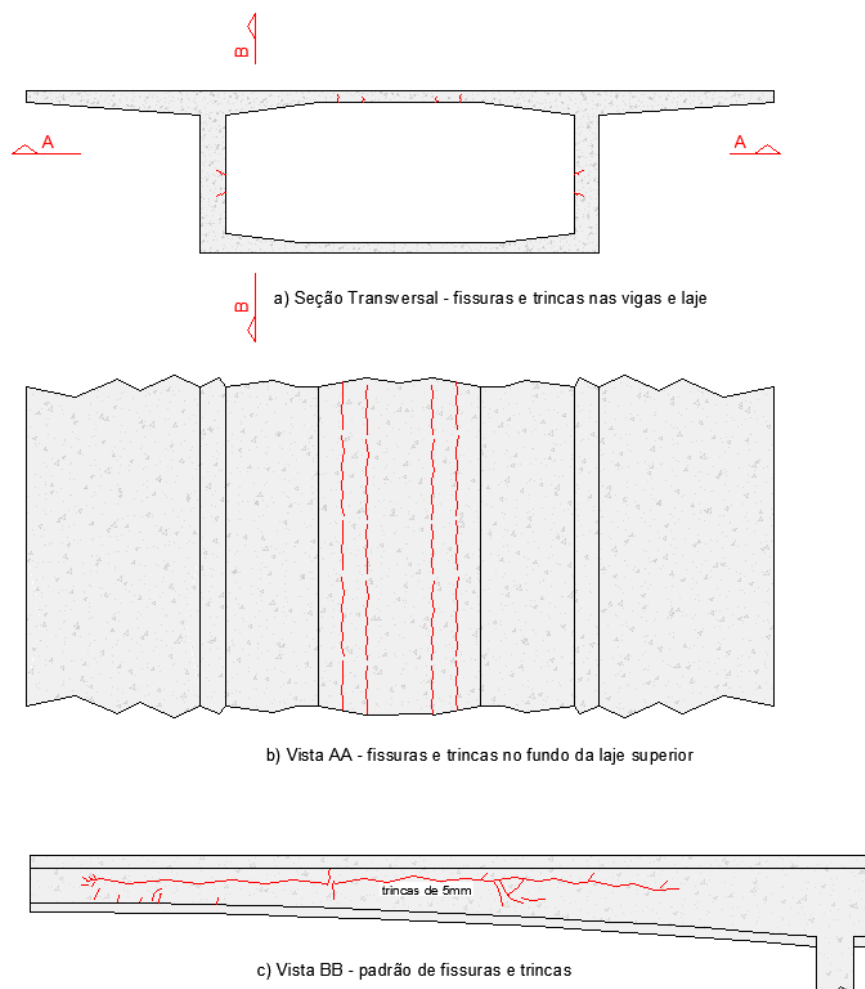
Fonte: Autoria própria (2021).

Na publicação de Elbadry e Ghali (1986) no *American Concrete Journal*, os autores já apresentavam a relação entre as tensões provocadas pela temperatura e danos associados a este tipo de estrutura, onde destacaram que estas tensões podem ser grandes o suficiente para provocar danos nas direções longitudinais e transversais da ordem de 5mm para o caso do conjunto de ações, envolvendo as temperaturas uniformes e não uniformes da seção.

Na figura 13, pode ser observado o levantamento de fissuras de acordo com estudo produzido por estes pesquisadores, destacando-se em a) as fissuras na parte inferior da laje e lateral da viga principal, em b) as fissuras na parte inferior da laje da

pista e em c) fissuras nas faces laterais no sentido longitudinal ao longo da viga principal, entre outras situações reportadas.

Figura 13 - Fissuras em pontes devido aos efeitos da distribuição da temperatura – a) seção transversal, b) vista do fundo da laje c) vista lateral da viga.



Fonte: adaptado de Elbadry e Ghali (1986).

Imbsen *et al.* (1985) descreveram situações similares de fissuração em pesquisas de Zichner (1981) realizadas em 1980 e outros vários casos no estado do Colorado, nos Estados Unidos da América.

Reforçando a situação, Branco e Mendes (1993) justificam sua pesquisa com a frequente associação de danos em estruturas de pontes com as ações térmicas, destacando as componentes dessas ações como agentes que estavam alterando o desempenho dessas estruturas.

Huang *et al.* (2018), em estudo sobre a relação dos deslocamentos provocados pelas temperaturas e o desempenho das juntas de expansão em pontes, descreveram outros processo de danos associados, como, por exemplo, a ocorrência

da restrição do movimento das vigas principais que podem sofrer danos em suas extremidades, ondulação nas regiões das juntas que podem agravar os efeitos do impacto na estrutura das pontes e acelerar as falhas de juntas, além dos efeitos na corrosão das armaduras das regiões de concreto deste local.

Palu e Mahmoud (2019) buscaram quantificar os efeitos das mudanças climáticas combinados com as prováveis falhas em juntas de dilatação obstruídas em pontes de aço nos Estados Unidos, levando em conta suas idades, avaliando os cenários projetados para 2040, 2060, 2080 e 2100 e concluíram que as pontes localizadas na parte norte dos Estados Unidos, como Northern Rockies & Plains, Northwest e Upper Midwest, são as mais vulneráveis devido ao aumento mais pronunciado nas faixas de temperatura.

O estudo de Palu e Mahmoud (2019) concluiu, ainda, que 63% das pontes metálicas dos Estados Unidos ultrapassam o limite de segurança no cenário mais severo (construção no inverno), seguido por 25%, 0,4% e 19% para os cenários de construção na primavera, verão e outono, respectivamente, no intervalo até o ano de 2100, se não forem efetuadas intervenções adequadas.

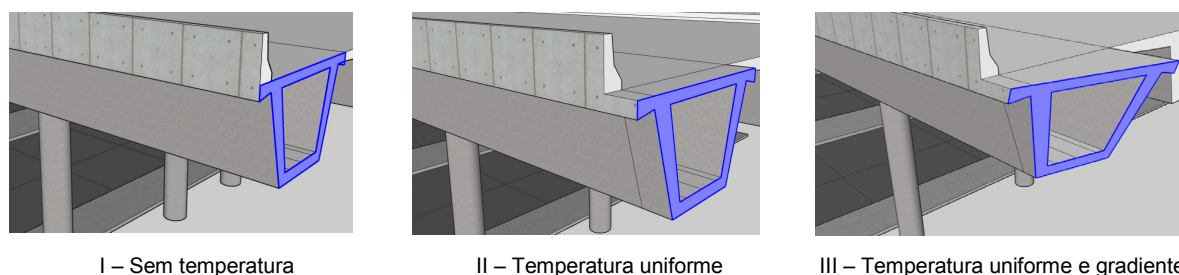
De acordo com O'Brien *et al.* (2020), o monitoramento recente de estruturas tem indicado que, além de produzir ações e deslocamentos, as variações de temperatura podem provocar mudanças na rigidez nas estruturas e, portanto, na sua resposta as demais ações.

2.1.4 Componentes das ações térmicas

Considerando os efeitos da ação da variação da temperatura apresentados no item 2.1.3, observa-se que a presença das restrições e o formato da seção transversal influenciam a distribuição do fluxo de calor e, portanto, os deslocamentos e rotações, bem como, os esforços gerados internamente.

Na figura 14, as parcelas correspondentes ao deslocamento provocado pelo efeito da variação de temperatura estão ilustradas, onde se tem, em I, a seção sem o efeito da temperatura onde não há deslocamentos, em II, o efeito da temperatura uniforme com deslocamentos uniformes longitudinais, e, em III, os efeitos da temperatura uniforme associados aos efeitos do gradiente de temperatura na seção provocando deslocamentos e rotações não uniformes na seção.

Figura 14 - Representação esquemática das variações geométricas da seção em função dos efeitos da temperatura uniforme e do gradiente de temperatura.



I – Sem temperatura

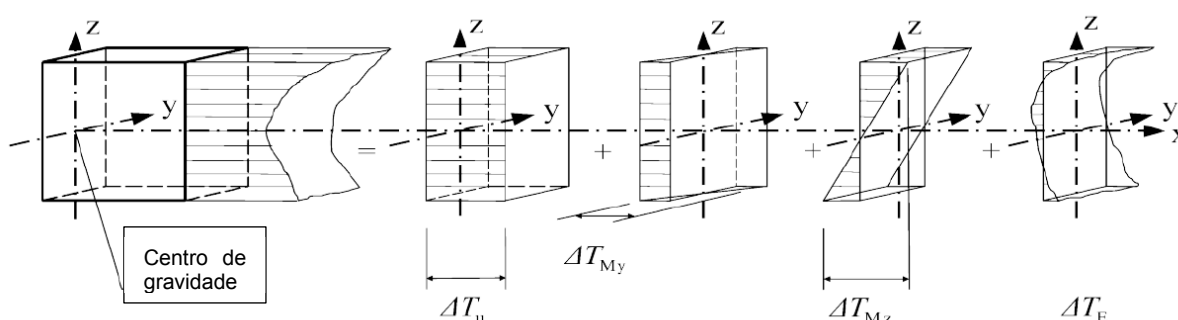
II – Temperatura uniforme

III – Temperatura uniforme e gradiente

Fonte: Autoria própria (2021).

De acordo com o Eurocode 1991-1-5 (CEN, 2003), as componentes de temperatura podem ser divididas em quatro partes, tendo-se a apresentação esquemática destas parcelas na figura 15.

Figura 15 - Representação das componentes da temperatura ao longo das seções.



Fonte: CEN (2003).

Para esta representação, estão consideradas as componentes relativas aos eixos x, y e z, com origem no centro de gravidade da seção, para um elemento estrutural de área A.

A primeira parcela representa a componente da distribuição uniforme de temperatura que provocará o alongamento (expansão) ou encurtamento (contração) de toda a seção do elemento estrutural, de acordo com a variação geométrica indicada na figura 14.

De acordo com JCSS (2015), esta componente pode ser escrita como a integração ao longo da área A:

$$T_N(t) = \frac{1}{A} \int_A T(t) dA \quad (13)$$

Onde:

$T_N(t)$ é a temperatura uniforme efetiva da ponte no tempo t

$T(t)$ é a temperatura no elemento dA no tempo t

A é a área total da seção

dA é a área do elemento infinitesimal

Segundo Larsson e Svensson (2013), esta parcela pode ser calculada de modo discreto com a seguinte equação:

$$\Delta T_N = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n T_i h_i \quad (14)$$

Onde:

T_i é a temperatura média na parte da seção discretizada i

h_i é a espessura de parte da seção discretizada i

h é a espessura total do elemento

A segunda e terceira parcelas correspondem a componente linear auto equilibrada de acordo com o eixo de referência z ou y , podendo ser escrita como (JCSS, 2015):

$$\Delta T_{M\vartheta}(\vartheta, t) = \frac{1}{I_y} \int_A T(\vartheta, t) \vartheta dA \quad (15)$$

Onde:

ΔT_M é a variação de temperatura em relação ao eixo de referência

ϑ representa o eixo de referência, geralmente y e z

A análise discreta, segundo Larsson e Svensson (2013) pode ser expressa da seguinte forma para o eixo z :

$$\Delta T_{Mz} = \frac{12}{h^2} \sum_{i=1}^n T_i h_i x_i \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (16)$$

Onde:

x_i é a distância entre o centro de gravidade do elemento i ao centro de gravidade da seção completa

Finalmente a quarta parcela, que corresponde a componente não linear da temperatura não equilibrada, é obtida subtraindo da temperatura total as parcelas anteriores, conforme JCSS (2015), LARSSON e SVENSSON (2013).

Assim, tem-se a temperatura total dada por:

$$\int_A T(z, t) dA = T_N(t) \int_A dA + \Delta T_{Mz}(t) \int_A z dA + \int_A T_E(z, t) dA \quad (17)$$

E, por sua vez, a quarta parcela através de:

$$T_E(z, t) = T(z, t) - \left[\frac{1}{A} \int_A T(z, t) dA + \frac{1}{I_y} \int_A T(z, t) dA \right] \quad (18)$$

Ou ainda, de modo discreto:

$$\Delta T_E = T_{tot} - T_{avg} - \Delta T \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (19)$$

Como pôde ser observada, a definição das componentes do ponto de vista teórico está solucionada, porém do ponto de vista de aplicação necessitaria da utilização da equação de condução de calor de Fourier no domínio tempo e com a definição da temperatura inicial, o que se torna bastante complexo de determinar com precisão na fase de projeto. Assim, a predição das temperaturas para projeto está separada em duas partes nas normalizações.

A componente uniforme está relacionada a definição da variação de temperatura acima e abaixo do valor tomado como referência inicial. Este valor inicial poderá ser considerado pelo valor estimado de temperatura efetiva da obra na data

da remoção de formas e escoramentos. Como na fase de projetos este valor ainda não está disponível, Soukhov (2000) recomenda para a região do Eurocode a adoção do valor 10°C, considerando obras que foram monitoradas. Desta condição, pode ser escrito, então a equação para as componentes de temperatura uniforme, como:

$$\Delta T_N = T_N - T_0 \quad (20)$$

$$\Delta T_N = T_0 - T_N \quad (21)$$

Onde:

T_N é a temperatura dada em (13)

T_0 é a temperatura inicial quando há a restrição da estrutura

No Brasil este valor pode ser considerado baixo para determinadas regiões onde as temperaturas mínimas do ar têm uma probabilidade diminuta de atingir esse valor, como as regiões norte e nordeste. Neste trabalho é apresentada uma sugestão para a definição deste valor inicial.

A segunda componente, que se refere à temperatura diferencial ao longo da altura ou largura da seção depende principalmente da temperatura do ar e dos efeitos da radiação solar (SOUKHOV, 2000; JCSS, 2015).

Deste modo, para obter as temperaturas efetivas são tomadas como referência as temperaturas do ar à sombra que são obtidas, em geral, pelas estações meteorológicas. O tratamento dos dados registrados das temperaturas e a sua aplicação para a geração dos mapas de temperatura para o Brasil são a ênfase deste trabalho.

Já as demais componentes estão relacionadas nas normas técnicas como um valor de gradiente de temperatura que considera o tipo de seção e os valores experimentais obtidos em obras similares. Na revisão da NBR7187 (ABNT, 2021), no item 7.3.8.2 - Variações não uniformes de temperatura, os critérios para análise destes efeitos foram reinseridos na normalização brasileira, após 18 anos da retirada do critério que existia na mesma norma em sua versão de 1987. Esta questão será retomada no item 2.2.1, onde é apresentado um breve histórico da evolução dos critérios e processos de consideração dos efeitos de variação de temperatura para projetos de estruturas.

2.2 Evolução dos estudos das ações térmicas em estruturas

Neste item, inicialmente é apresentado um histórico dos estudos das ações térmicas em estruturas e da evolução normativa até o presente. As metodologias utilizadas também são apresentadas, incluindo as encontradas nas normas brasileiras, com os devidos comentários acerca da sua aplicação.

2.2.1 Histórico sobre a evolução das pesquisas sobre temperatura no projeto de estruturas

Os primeiros estudos, segundo Lee (2012), sobre temperatura em estruturas de pontes ocorreram nos anos 50 e 60 do Século XX, com o foco em avaliações experimentais e equações empíricas e unidimensionais, destacando-se os trabalhos de Barber (1957) e Zuk (1965) que trataram da estimativa da temperatura superficial do pavimento para prever a temperatura em uma ponte de seção mista (aço e concreto). Dentre as conclusões, Zuk (1965) citou as influências da temperatura do ar, do vento, da umidade, da intensidade da radiação solar e do tipo de material das estruturas.

Nesta época, no Brasil, a norma utilizada era a NB1, de 1960, que no capítulo II, Esforços Solicitantes, item 5, apresentava os seguintes critérios para a consideração da temperatura:

- *Supõe que as variações de temperaturas sejam uniformes ao longo da estrutura, salvo quando a desigualdade dessas variações entre as partes da estrutura é muito acentuada;*
- *O coeficiente de dilatação térmica do concreto armado é considerado igual a 10^{-5} por $^{\circ}\text{C}$;*
- *A variação da temperatura do concreto causada pela variação da temperatura da atmosfera depende do local da obra e deve ser considerada entre $\pm 10^{\circ}\text{C}$ e $\pm 15^{\circ}\text{C}$ em torno da média;*
- *Para peças maciças ou ocas (desde que neste caso os espaços vazios sejam inteiramente fechados) cuja menor dimensão não seja inferior a 70cm, admite-se que essa oscilação seja reduzida, respectivamente, para $\pm 5^{\circ}\text{C}$ e $\pm 10^{\circ}\text{C}$*

- *Em peças permanentemente envolvidas em terra ou água e em edifícios que tenham, em planta, dimensão não interrompida por junta de dilatação maior que 30 metros, dispensa-se o cálculo da influência da variação de temperatura.*

Esta última consideração é tomada como referência até os dias atuais para o posicionamento das juntas de dilatação de modo a desprezar os efeitos da temperatura no projeto de edifícios em concreto armado e para supostamente minimizar os efeitos nas fundações e nas alvenarias de fechamento, bem como, nos demais sistemas que compõe a edificação, mas trata-se de um modelo empírico. A NBR6118 (ABNT, 2014) traz a consideração de espaçamentos entre juntas apenas para concreto simples.

No final da década de 60 e início da década de 70, os estudos passaram a buscar a previsão dos efeitos dos gradientes de temperatura. As pesquisas de Priestley (1972), na Nova Zelândia, e Emerson (1973), no Reino Unido, foram as que primeiro definiram as equações de fluxo de calor unidimensional e bidimensional, separando as variações uniformes e os gradientes de temperatura (CHEN, 2008).

Capps (1968 apud REYNOLDS, 1972) publicou o estudo de dois casos de comportamento térmico, o do Viaduto Beachley e o da Ponte Wye. No mesmo ano, Emerson (1968 apud REYNOLDS, 1972) publicou um estudo sobre temperaturas e movimentos em pontes nas Ilhas Britânicas.

Reynolds (1972) apresentou tese com análise de tensões térmicas e movimentos em pontes tomando como referência registros do escritório de climatologia, concluindo que outros fatores, além da temperatura, devem ser considerados para essas análises, como a fluência, a retração e a umidade (REYNOLDS, 1972).

Emerson (1973 apud CHEN, 2008) apresentou uma proposta de análise através do método das diferenças finitas, considerando a radiação solar, a temperatura do ar e a velocidade do vento como parâmetros para a determinação da distribuição da temperatura para uma Ponte no Reino Unido.

Durante esse período ocorreu a publicação da “*Standard Specifications for Highway Bridges*” adotado pela “*American Association of State Highway Officials*”, AASHTO, de 1973, onde o tratamento dos efeitos da temperatura era orientado de acordo com os seguintes critérios:

- O acréscimo e a redução da temperatura devem ser fixados para a localidade em que a estrutura será construída e deve ser calculado a partir de uma temperatura assumida no momento da ereção.
- A devida consideração deve ser observada para a relação entre a temperatura do ar e a temperatura interna de estruturas ou membros maciços de concreto.
- A faixa de temperatura deve ser a seguinte para estruturas de concreto, geralmente:

Clima moderado:

Temperatura (Acréscimo): 30°F (16,7°C)

Temperatura (Redução): 40°F (22,2°C)

Clima frio:

Temperatura (Acréscimo): 35°F (19,4°C)

Temperatura (Redução): 45°F (25°C)

Hunt e Cooke (1975) apresentaram um método de cálculo da distribuição de temperatura modificando a formulação apresentada por Emerson (1973). Utilizando a temperatura transversal constante, reduziram a um modelo unidimensional, permitindo o emprego de solução numérica com o uso de derivadas em substituição as diferenças finitas.

Em 1978, no Brasil, a NB1 foi revista, sendo renomeada em 1980 para NBR6118 (ABNT, 1980). Nesta revisão a questão de temperatura apresentou apenas um pequeno ajuste de texto para o caso de peças maciças e ocas, mas com o mesmo significado do texto apresentado na NB1:1960.

Berwanger (1983), no início da década de 80, desenvolveu um estudo mediante o uso de modelo reduzido de pontes mistas de concreto e aço, onde pôde monitorar as variações de temperatura com a aplicação de gelo sobre a superfície da laje ao longo do tempo que permitiram a calibração das análises em elementos finitos.

A DIN1072, em sua última versão de 1985, apresenta para obtenção da temperatura uniforme para pontes em concreto a temperatura base de +10°C, indicando os valores das variações para máximo e mínimo, +20°C e -35°C, respectivamente, como valores únicos a aplicar no país. Este valor poderia ser

reduzido para peças com espessura inferior a 70cm. Este critério permaneceu como alternativo ao Eurocode até 2010.

Em 1985, Imbsen *et al.* publicaram o relatório 276 para o Programa Nacional Cooperativo de Pesquisas de Rodovias (NCHRP), denominado Efeitos Térmicos em Superestruturas de Pontes de Concreto. O objetivo do estudo era buscar produzir uma orientação para a padronização dos procedimentos e critérios para a consideração dos efeitos térmicos nas estruturas de pontes dos Estados Unidos. Para isto, efetuaram um levantamento de normas e procedimentos vigentes em vários países, efetuaram uma análise detalhada em estudos de monitoramento de temperatura e concluíram que a AASHTO empregava procedimento impreciso e muito conservador.

No anexo A do relatório apresentado por Imbsen *et al.* (1985), foram sugeridos mapas de isotermas e tabelas de correlação da temperatura máximas e mínimas normais do ar com a temperatura efetiva nas pontes para análise da ação uniforme, além de sugestões para consideração da temperatura diferencial. As isotermas obtidas consideraram os registros de 30 anos, de 1931 a 1960, tendo-se como referência a temperatura média diária.

Vechio e Sato (1990) apresentaram estudo em modelos de pórticos ensaiados em escala natural em laboratório, considerando a variação de temperatura através do controle de temperatura de água posicionada pela face interna, que permitiram avaliar as condições da variação das temperaturas, das deflexões, deformações, fissuras e avaliação de danos locais. O procedimento permitiu investigar a precisão dos métodos analíticos relacionados a cargas térmicas, apresentando a correlação dos registros das variáveis monitoradas.

Em 1992, Moorty e Roeder (1992) apresentaram os resultados de uma pesquisa admitindo a temperatura longitudinal como constante para a estimativa da distribuição da temperatura em seção composta mista de ponte. Por intermédio de um monitoramento em campo puderam avaliar a modelagem proposta. O estudo permitiu analisar o intervalo de temperaturas apresentado pela AASHTO (1990), vigente a época, tendo concluído como muito amplo para esta tipologia de ponte, considerando as diversas localizações nos Estados Unidos da América.

Silveira, Branco e Castanheda (2000) apresentaram um estudo sobre as análises estatísticas para as ações térmicas em pontes, onde foram considerados os fatores de combinação das ações, os períodos de retorno de acordo com a vida útil

prevista para a estrutura e as funções de distribuição de extremos, para temperatura máxima e mínima.

Em 2002, Roeder apresentou um estudo utilizando uma metodologia similar a proposta por Emerson (1979), porém empregando dados de climatologia de sessenta anos de registros para previsão de movimentos térmicos. Para este estudo, a temperatura efetiva de diferentes tipos de estruturas pôde demonstrar a correlação com os parâmetros climáticos. Para isto, foram utilizados os valores extremos de temperatura do ar à sombra, seguindo o Método de Kuppa (KUPPA; RODER, 1991, apud ROEDER, 2002), em vez dos valores sugeridos no Método de Emerson, provando-se este mais adequado para as estruturas analisadas.

Com base na análise de todos os estados americanos, mapas de isotermas foram gerados para pontes em concreto. Também foi constatado neste trabalho, analisando a distribuição de probabilidades, que havia uma tendência das temperaturas efetivas nas pontes apresentarem uma aproximação do limite superior de temperatura do ar.

Entre os estudos desenvolvidos, o de Roeder (2002) merece destaque, assim como o de Emerson (1979), pois junto à análise probabilística desenvolvida por outros pesquisadores, os resultados direcionaram as propostas utilizados atualmente nos códigos de projeto.

Ainda em 2005, a norma *AASHTO Standard Specification For Highway Bridges* incorporou as sugestões e os mapas propostos por Roeder (2002) para utilização no projeto de Pontes em concreto.

Na revisão de 2003 da NBR6118 (ABNT, 2003), a publicação apresentou apenas uma alteração na introdução do tema e algumas informações complementares em relação a versão vigente desde 1980, quais sejam:

- A variação de temperatura da estrutura causada globalmente pela variação da temperatura da atmosfera e pela insolação direta é considerada uniforme. Ela depende do local de implantação da construção e das dimensões dos elementos estruturais que a compõem.
- A escolha de um valor entre esses dois limites pode ser feita considerando 50% da diferença entre as temperaturas médias de verão e inverno no local da obra.

Os limites citados na NBR6118 (ABNT, 2003) são os mesmos apresentados na NB1:1960, ou seja, 10°C a 15°C para peças cuja menor dimensão não seja inferior a 50 cm e 5°C a 10°C para elementos estruturais maciços ou ocos com espaços vazios inteiramente fechados, cuja menor dimensão seja superior a 70 cm.

A Comissão de Normalização Europeia (CEN), em 2003, introduziu no Eurocode os valores característicos de temperatura, que devem ser obtidos dos mapas de isotermas produzidos por cada país. Os valores de máximos e mínimos, assim obtidos, devem ser modificados para valores de temperaturas uniformes efetivas, conforme o tipo da composição da seção, se composta de aço, concreto ou mista.

Xu e Burgoyne (2005) apresentaram um estudo com os efeitos da variação de temperatura na construção de pontes feitas em etapas, muito comuns nas soluções atuais. Destaca-se, para esse caso de obras, a necessidade da consideração dos efeitos de temperatura como parte da sequência construtiva, pois os efeitos vão se acumulando conforme a estrutura vai sendo construída, até a entrada em operação, afetando, em especial, a deformação lenta ou fluência do concreto.

Burdet (2010) apresentou os resultados de estudos de monitoramento do comportamento de diversas pontes durante vinte anos, com particular atenção aos efeitos térmicos. As medidas simultâneas da temperatura ambiente e da temperatura do concreto permitiram concluir a utilidade da temperatura ambiente para a estimativa da temperatura das estruturas.

Em 2010, no 52º Congresso Brasileiro do Concreto, Pinho, Araújo e Régis (2010) apresentaram uma revisão comparativa dos critérios normativos das normas americana, europeia e brasileira, concluindo que, apesar das amplitudes térmicas do Brasil serem relativamente pequenas, os procedimentos adotados são simplificados em relação as normas comparadas.

Rodriguez, Barr e Halling (2014) monitoraram uma ponte integral, em seção caixão, quantificando os efeitos da temperatura através das deformações e efetuaram a calibração de um modelo numérico utilizando o método dos elementos finitos empregando elementos sólidos, observando as condições dos apoios extremos e as tensões geradas.

Zhou e Yi (2013) apresentaram um trabalho sobre o estado da arte com as considerações das cargas térmicas em pontes de grandes dimensões, dando destaque aos efeitos dos gradientes de temperatura transversais as seções, situação

desprezada em diversos estudos anteriores, apesar da descrição no Eurocode (CEN, 2003).

Em 2014, a norma brasileira NBR6118 teve nova revisão, porém o item relacionado à variação de temperatura não foi alterado (ABNT, 2014).

Kromanis e Kripakaran (2014) apresentaram um estudo de predição da resposta térmica de pontes usando modelos de regressão baseado em históricos de medição. Para isto utilizaram algoritmos de regressão múltipla linear (MLR), regressão robusta (RR) e modelo de suporte a regressão vetorial (SVR), além das redes neurais artificiais, demonstrando parâmetros físicos, como deflexões. Constataram a necessidade de considerar a inércia térmica do concreto para a predição das variações diárias.

O *Joint Research Centre* (JRC, 2016) da Comissão Europeia, em 2016, elaborou um relatório com informações sobre as experiências dos países na elaboração dos mapas para ações sísmicas e climáticas, apresentando o estado da arte, como guia para os outros países da região do Balcãs.

A revisão da AASHTO LFRD *Bridge Design Specifications* (2020) para os projetos de pontes nos Estados Unidos, manteve os mapas de isotermas de temperaturas máximas e mínimas e o procedimento para determinação das ações conforme proposto por Roeder (2002).

Nos últimos anos, vários estudos têm sido desenvolvidos para avaliação dos efeitos térmicos nas estruturas, porém são estudos de caso que não podem ser generalizados no momento. Destacam-se os estudos que buscam relacionar a radiação solar, as mudanças de temperatura do ar e a modelagem para pontes em seção caixão e com vigas I, como os de Xue *et al.* (2018), Hagedorn *et al.* (2019), He *et al.* (2021), Abid, Taysi e Özakça (2020), Lin *et al.* (2021), Zhou *et al.* (2020), Lu *et al.* (2021) e Zhang *et al.* (2021), além de sistemas apertados, como o trabalho de Gottsäter e Ivanov (2019). Também se observam publicações de monitoramento da temperatura de pontes e avaliação dos modelos probabilísticos, como os realizados por Lawson, Ryan e Buckle (2020), Gu *et al.* (2020) e Vill *et al.* (2021).

Outros estudos, como de Croce (2018), O'Brien *et al.* (2020) e Nasr *et al.* (2021) tem analisado e destacado os impactos das mudanças climáticas na segurança e no comportamento das pontes existentes e a construir.

Em 2021, a norma brasileira NBR7187 incluiu novamente os critérios relativos aos gradientes de temperatura, se reportando a NBR6118 para a definição das ações de temperatura uniforme (ABNT, 2021).

2.2.2 Considerações sobre a temperatura nas principais normas vigentes

Como apresentado na revisão histórica dos estudos, a análise da temperatura em estruturas pode ser considerada uma linha de pesquisa que apresenta uma complexidade grande e ainda em evolução, especialmente em se tratando do comportamento dos gradientes de temperatura e da correlação e quantificação das variáveis que afetam os fluxos de calor nas estruturas. Ainda pôde ser observado que as ênfases ocorrem para as estruturas de pontes.

Poucos estudos têm buscado avaliar os impactos nas edificações usuais, seja pelo aumento de variáveis envolvidas, como os materiais de interface, seja pelas dimensões dos elementos estruturais. Neste último tema, tem-se o trabalho de Radovanovic e Grebović (2015) que apresentou sugestões para considerações das temperaturas internas e externas como parâmetros para a estimativa dos valores para projetos em edificações, destacando-se as dificuldades em considerar as diversas variáveis e orientações dadas no Eurocode 1.

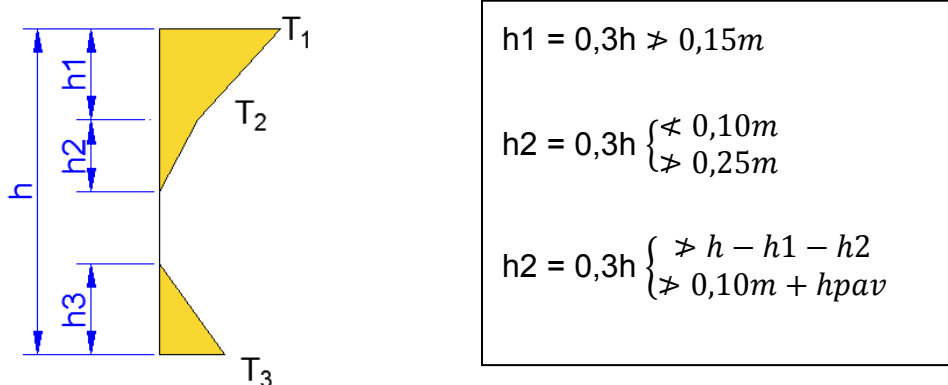
Em razão disto, os diversos códigos normativos têm apresentado os critérios gerais para utilização da temperatura efetiva uniforme baseado em mapas de temperaturas extremas ou apenas valores referenciais simplificados, como na normalização brasileira. Para os gradientes de temperatura, os códigos têm destacado as recomendações de valores e diagramas a serem considerados nas seções transversais apenas para as pontes.

O gradiente de temperatura foi reintroduzido na versão da NBR7187 do ano de 2021 (ABNT, 2021), como citado no item 2.2.1, após ter sido removido na versão de 2003 onde indicava a consulta a NBR6118. Na versão de 1987, essa norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas apresentava as orientações para consideração da temperatura uniforme e para o gradiente de temperaturas, no item 7.1.9 – Variações de temperatura, assim descrito:

Nas estruturas objetos desta Norma, deve ser considerada uma variação uniforme de temperatura de $\pm 15^\circ\text{C}$. Combinada com essa variação, deve ser considerada ao longo da altura de cada seção transversal a distribuição de temperatura definida". (ABNT,1987).

A definição da temperatura ocorre de acordo com a Figura 16 e conforme os valores fornecidos na Tabela 1.

Figura 16 - Diagrama de distribuição da temperatura ao longo da altura da peça da NBR7187:1987.



Fonte: adaptado da ABNT (1987).

Tabela 1 - Tabela 1 da NBR7187:1987.

h (m)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
$\leq 0,2$	8,5	3,5	0,5
0,4	12,0	3,0	1,5
0,6	13,0	3,0	2,0
$\geq 0,8$	13,5	3,0	2,5

Fonte: adaptado da ABNT (1987).

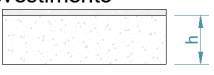


Na revisão da NBR7187 de 2021 (ABNT, 2021), os parâmetros para o gradiente de temperatura na seção transversal passaram a ser, conforme item 7.3.8.2:

Método 1 – item 7.3.8.2.2

As variações da temperatura ao longo da altura de cada seção transversal podem ser consideradas por meio de uma variação linear equivalente.

Na figura 17, podem ser consultados os valores disponibilizados pela NBR7187 (ABNT, 2021) e citados no parágrafo acima, de acordo com a tipologia da seção.

Figura 17 - Variação linear de temperatura ao longo da altura da seção transversal.

		Tipo de Seção Transversal		
		Em laje ou retangular	Em viga	Celular
		revestimento 	revestimento 	revestimento 
$\Delta T_{eq}(^{\circ}C)$	$h \geq 1,5m$	$h < 1,5m$	7	5
	5	7		

Fonte: adaptado da ABNT (2021).

A norma apresenta, ainda, os ajustes nos casos em que a espessura do pavimento seja inferior a 100 mm.

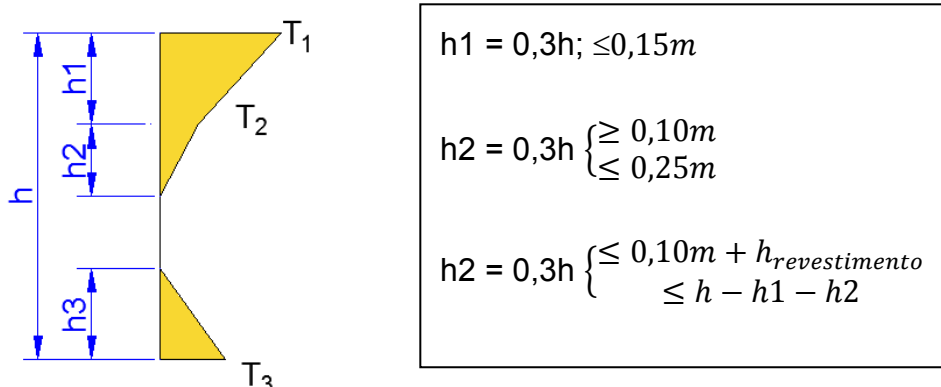
Segundo Pokorski, Radziszewski e Sarnowski (2021), os revestimentos dos pavimentos das pontes estão mais sujeitos as rápidas mudanças de temperatura e aos fatores climáticos, bem como, apresentam espessuras menores do que o usado sobre o solo. Deve-se considerar que esta camada de concreto betuminoso de revestimento interfere na absorção do calor, considerando sua espessura e sua cor.

Método 2 – item 7.3.8.2.3

As variações de temperatura ao longo da altura de cada seção transversal devem ser consideradas combinadas com as variações uniformes de temperatura. (ABNT, 2021).

A orientação da tabela é apresentada na figura 18 e válida para todas as seções representadas na figura 17.

Figura 18 - Distribuição da temperatura ao longo da altura da seção transversal.



Fonte: adaptado da ABNT (1987).

Comparando-se com o proposto na NBR7187:1987, percebe-se que os valores de distribuição de temperatura ao longo da altura são os mesmos descritos na Tabela 1, porém com a indicação das seções consideradas.

A revisão de 2021 acrescenta, ainda, uma tabela que indica a diferença de temperatura positiva que deve ser considerada para diferentes valores de altura de seção transversal versus espessura da pavimentação, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Distribuição de temperatura para diferentes alturas da seção e espessuras de revestimento.

(continua)

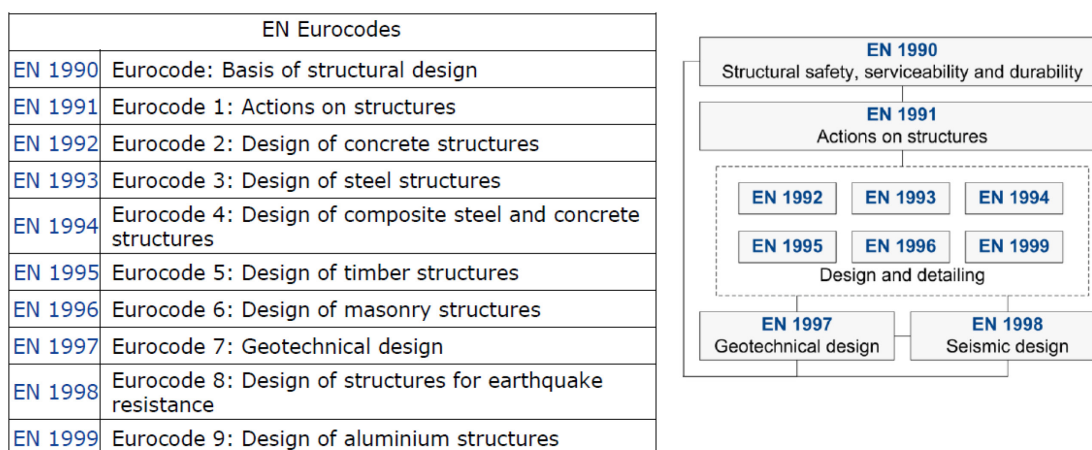
h (m)	Revestimento (mm)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)
≤ 0,2	0	12	5,0	0,1
	50	13,2	4,9	0,3
	100	8,5	3,5	0,5
	150	5,6	2,5	0,2
	200	3,7	2,0	0,5
0,4	0	15,2	4,4	1,2
	50	17,2	4,6	1,4
	100	12,0	3,0	1,5
	150	8,5	2,0	1,2
	200	6,2	1,3	1,0
	0	15,2	4,0	1,4
	50	17,6	4,0	1,8

0,6	100	13,0	3,0	2,0
	(continuação)			
	150	9,7	2,2	1,7
≥ 0,8	200	7,2	1,5	1,5
	0	15,4	4,0	2,0
	50	17,8	4,0	2,1
	100	13,5	3,0	2,5
	150	10,0	2,5	2,0
	200	7,5	2,1	1,5

Fonte: adaptado da ABNT(1987).

Para análise do Eurocode, preliminarmente apresenta-se a organização das partes que o compõe na figura 19, conforme Sousa, Dimova e Pinto (2016) e as nomenclaturas das EN (Normas Europeias). A EN 1991, chamada de Eurocode 1, trata das ações nas estruturas e se relaciona com as normas gerais de segurança, servicibilidade e durabilidade, bem como, com as normas de projeto e detalhamento. Dentro da EN 1991, a parte 5 é a que trata das Ações Térmicas em Estruturas.

Figura 19 - Códigos europeus e sua integração.

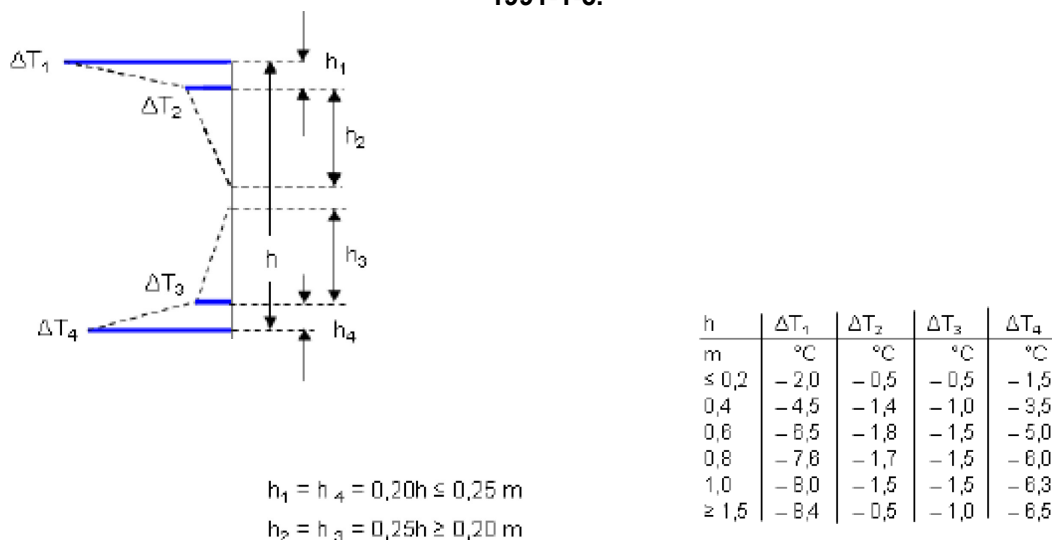


Fonte: Souza; Dimova; Pinto (2016).

Em relação à prescrição do Eurocode para a definição dos gradientes de temperatura, poderá ser observado que o processo apresentado na norma brasileira é similar ao apresentado no Eurocode, com uma exceção. Enquanto a norma brasileira trata apenas dos parâmetros de aquecimento da seção, conforme a figura

18, no Eurocode são apresentados os parâmetros para o gradiente em caso de resfriamento, conforme figura 20.

Figura 20 - Diagrama de distribuição da temperatura ao longo da altura da peça do Eurocode 1991-1-5.

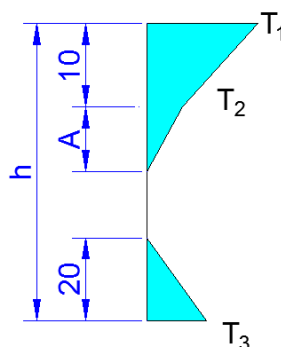


Fonte: Eurocode 1991-1-5 (1991).

Essa situação pode ser compreendida pelas características de clima e da temperatura local, onde o resfriamento tem a mesma proporção do aquecimento em boa parte dos países que compõe a Europa e fazem uso destas normas.

Para os gradientes de temperatura, a AASHTO LRFD *Bridge Design Specification* (2010), apresenta critérios semelhantes. Na figura 21, a distribuição da temperatura ao longo da altura está dividida no mesmo número de trechos das normas brasileiras e europeia, porém os valores de h_1 e h_3 das normas citadas, são fixos em 10cm e 20cm, respectivamente, para a norma AASHTO.

Figura 21 - Diagrama de distribuição da temperatura ao longo da altura da peça, medidas em cm.



Fonte: AASHTO (2020), adaptado.

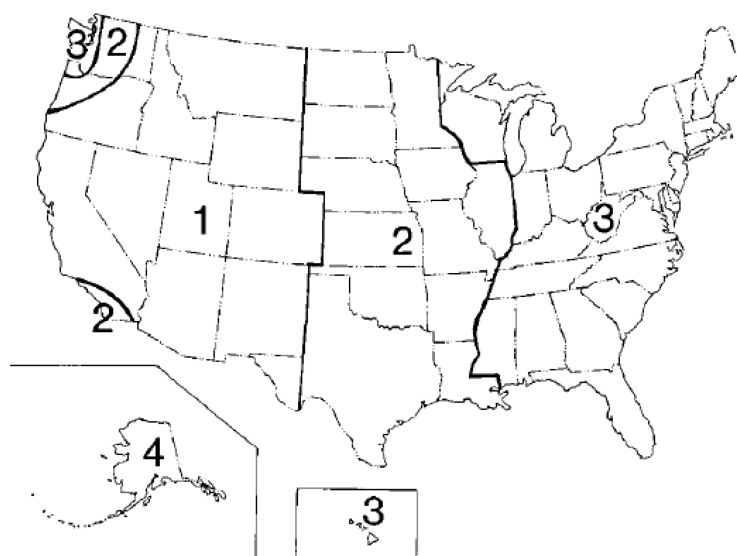
A tabela apresentada na AASHTO (2010), mantida na revisão de 2020, está apresentada na tabela 3, onde encontra-se apenas os valores de T_1 e T_2 , de acordo com a zona de localização da ponte, delimitadas no mapa da figura 22, indicando para T_3 o valor de 0°F ($-17,8^\circ\text{C}$) e permitindo que estudos de lugares específicos possa ser tomado até o máximo de 5°F (-15°C).

Tabela 3 - Tabela 1 da NBR7187:1987.

Zona	T1 ($^\circ\text{F}/^\circ\text{C}$)	T2 ($^\circ\text{F}/^\circ\text{C}$)
1	54/12	14/-10
2	46/7,7	12/-11,1
3	41/5,0	11/-11,7
4	38/3,3	9/-12,8

Fonte: Autoria própria (2021), adaptado.

Figura 22 - Zonas de radiação solar para os Estados Unidos.



Fonte: Imbsen (1985); AASHTO (2010;2020).

Neste código destacam-se os valores negativos elevados e valores positivos inferiores as outras duas normas analisadas, porém observa-se a metodologia similar nas considerações.

Assim, como pôde ser observado em relação aos requisitos de gradientes de temperatura, a NBR7187:2021 voltou a apresentar os critérios necessários em consonância com os padrões das normas europeia e americana.

A outra parcela de temperatura é a componente uniforme, conforme descrito no capítulo 2, item 2.1.4.

Como descrito por Soukhov (2000), a temperatura do ar à sombra é o mais importante parâmetro para a consideração da temperatura efetiva uniforme nas estruturas. Portanto, os valores de temperatura efetivas nas estruturas podem ser considerados como função das temperaturas extremas do ar à sombra.

As ações climáticas, como a temperatura do ar à sombra e a radiação, são tratados como processos estocásticos não estacionários, isto é, aqueles que se desenvolvem através de variáveis aleatórias mensuráveis, mas que se caracterizam por parâmetros aproximadamente constantes ao longo do tempo, já que anualmente têm-se os períodos de inverno e verão com os valores limites anuais de mínimos e máximos, respectivamente.

Para este caso, de modo simples e linear, os efeitos de contração e expansão podem ser descritos por meio da equação (22):

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T \quad (22)$$

Onde:

Δl é a variação do comprimento

l_0 é o comprimento inicial

α é o coeficiente de dilatação térmica do material

ΔT é a variação de temperatura em relação ao valor de referência inicial

O coeficiente de dilatação térmica do concreto armado pode ser obtido pela média ponderada dos coeficientes dos componentes, segundo Imbsen (1985). Na norma AASHTO LRFD (2010), na falta de dados mais precisos, o coeficiente de dilatação térmica recomendado é $10,9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, para concretos de peso normal, e $9,1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ para concretos leves. O Eurocode indica, para concretos com agregados comuns, o valor do coeficiente de dilatação térmica igual a $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e, para concretos com agregados leves, o valor de $7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (CEN, 2003). Na NBR6118:2014 o valor indicado é $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, tanto para o concreto, como para o aço, não informando valor para o caso de concreto leve (ABNT, 2014).

Para a determinação do coeficiente de dilatação térmica linear do concreto está disponível no Brasil a norma NBR12815 – Concreto Endurecido – Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear – Método de Ensaio (ABNT, 2012).

De modo semelhante, podem ser tratados os efeitos da variação da temperatura para análise de deslocamentos superficiais e volumétricos, onde o coeficiente de dilatação térmica superficial, β , é igual a 2α e o coeficiente de dilatação térmica volumétrica, γ , é igual a 3α .

Reforçando o descrito no capítulo 2, item 2.1.3, os movimentos livres da estrutura não geram esforços internos nos elementos da própria estrutura, mas os impedimentos aos movimentos é que os produzirão.

Assim, a questão a ser discutida passa a ser os métodos de determinação das temperaturas efetivas limites atuantes na estrutura para fins de projeto e análise do comportamento e desempenho previstos, os quais serão apresentados no próximo item.

2.2.3 Métodos de determinação das temperaturas para projeto

Neste item estão apresentados os métodos propostos ao longo do tempo e que serviram de embasamento para os modelos atuais, bem como, a descrição dos requisitos para a geração de mapas, além da apresentação de alguns modelos em utilização que permitiram a elaboração da proposta deste estudo.

Dos modelos sugeridos para a consideração da temperatura efetiva de projeto, baseados nos monitoramentos realizados em cinco obras no Reino Unido, o Método de Emerson (1981) apareceu em destaque em todos os trabalhos revisados. Neste método as seguintes equações empíricas foram propostas:

$$T_{AvgMin} = \frac{T_{MaxAr1} + T_{MaxAr2} + T_{MinAr1} + T_{MinAr2}}{4} 1,14 - 3,6 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (23)$$

E:

$$T_{AvgMax} = T_{AvgMin} + 6 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (24)$$

Onde:

T_{AvgMin} é a temperatura estimada média mínima

T_{MaxAr1} é a temperatura máxima do dia à sombra

T_{MaxAr2} é a temperatura máxima do dia anterior à sombra

T_{MinAr1} é a temperatura mínima noturna à sombra

T_{MinAr2} é a temperatura mínima noturna do dia anterior

T_{AvgMax} é a temperatura estimada média máxima

Ainda, do ponto de vista de monitoramento para a obtenção dos valores de temperatura efetiva, Kuppa (1991 apud ROEDER, 2002) propôs a seguinte equação:

$$T_{ef} = \frac{\sum A_i E_i \alpha_i T_i}{\sum A_i E_i \alpha_i} \quad (25)$$

Onde:

T_{ef} é a temperatura estimada média mínima

A_i é a área do segmento i analisado

E_i é módulo de elasticidade do material do segmento i

α_i é coeficiente de dilatação térmica do material do segmento i

Em caso de se desconsiderar a presença do aço, tendo em vista sua baixa proporção na seção, a equação pode tomar a forma proposta por Larsson e Svenson (2013), equação 14, simplificando os valores de E_i e α_i , tomados constantes.

Para o tratamento dos valores, o método de Kuppa (Roeder, 2002) para determinação da temperatura efetiva propõe uma correlação com a média das temperaturas, considerando os quatro dias mais quentes em sequência e os quatro dias mais frios em sequência. Para isto, foram avaliadas as temperaturas de pontes metálicas, mistas e de concreto em várias cidades dos Estados Unidos, bem como, as variáveis ambientais, como a cobertura de nuvens, precipitação de chuvas e velocidade do vento.

As equações obtidas para as pontes de concreto foram as seguintes:

$$T_{AvgMax} = \frac{T_{MaxAr1} + T_{MaxAr2} + T_{MaxAr3} + T_{MaxAr4}}{4} 0,953 + 4,6 \text{ (}^\circ\text{F)} \quad (26)$$

$$T_{AvgMin} = \frac{T_{MinAr1} + T_{MinAr2} + T_{MinAr3} + T_{MinAr4}}{4} 1,186 + 17,24 \text{ (}^\circ\text{F)} \quad (27)$$

Onde:

T_{AvgMax} é a temperatura estimada média máxima

T_{MaxAr1} é a temperatura máxima do dia à sombra correspondente a cada um dos quatro dias de máxima no local

T_{AvgMin} é a temperatura estimada média mínima

T_{MinAr1} é a temperatura mínima do dia à sombra correspondente a cada um dos quatro dias de mínima no local

No estudo desenvolvido foram observadas pequenas variações para as pontes em seção caixão e pontes com vigas pré-moldadas protendidas, mas as diferenças foram consideradas insuficientes para separar os limites indicados para projeto.

Com base no estudo de Kuppia, Roeder (2002) produziu um estudo para o *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) de modo a definir critérios para consideração das temperaturas efetivas de projeto, tendo como resultado a obtenção de mapas de isotermas. Para isto, foram utilizados os dados de 1273 estações meteorológicas, cobrindo os Estados Unidos, Alaska e Hawaii, onde a maioria dos locais apresentou dados contínuos de 60 anos, com precisão aceitável.

Os mapas de isotermas propostos por Roeder (2002) foram incorporados a norma americana, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (2005), porém permitiu a manutenção do procedimento anterior com os devidos ajustes previstos na *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges* (2005).

O primeiro, chamado de procedimento A e tratado como um procedimento histórico, trata-se de proposta similar as indicações da AASHTO (1973), porém com os valores máximos e mínimos de temperatura efetiva a ser considerados. Assim, no caso de pontes de concreto, tem-se:

Clima moderado:

Temperatura: 10°F (-12,2°C) até 80°F (26,7°C)

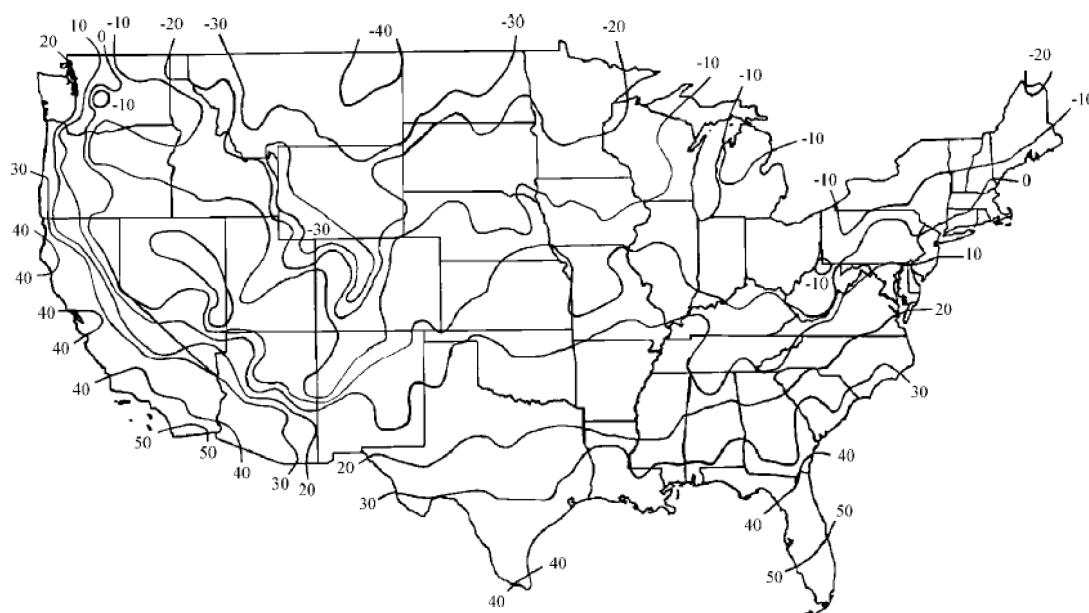
Clima frio:

Temperatura: 0°F (-17,8°C) até 80°F (26,7°C)

O segundo procedimento, chamado de procedimento B, trata-se da aplicação de mapas com as temperaturas máximas e mínimas de projeto, denominadas $T_{maxDesign}$ e $T_{minDesign}$. Como citado em 2.2.1, estes são os mapas sugeridos por Roeder (2002) para pontes de concreto e incorporados na AASHTO *Standard* e, posteriormente, na AASHTO LRFD (2010), conforme pode ser observado nas figuras 23 e 24.

Nestes mapas, a representação utilizada para os isovalores de temperatura é através de linhas, como nas curvas de nível empregadas em topografia.

Figura 23 - Mapa proposto por Roeder e incorporado a AASHTO Standard para temperaturas mínimas de projeto em graus Fahrenheit (°F).

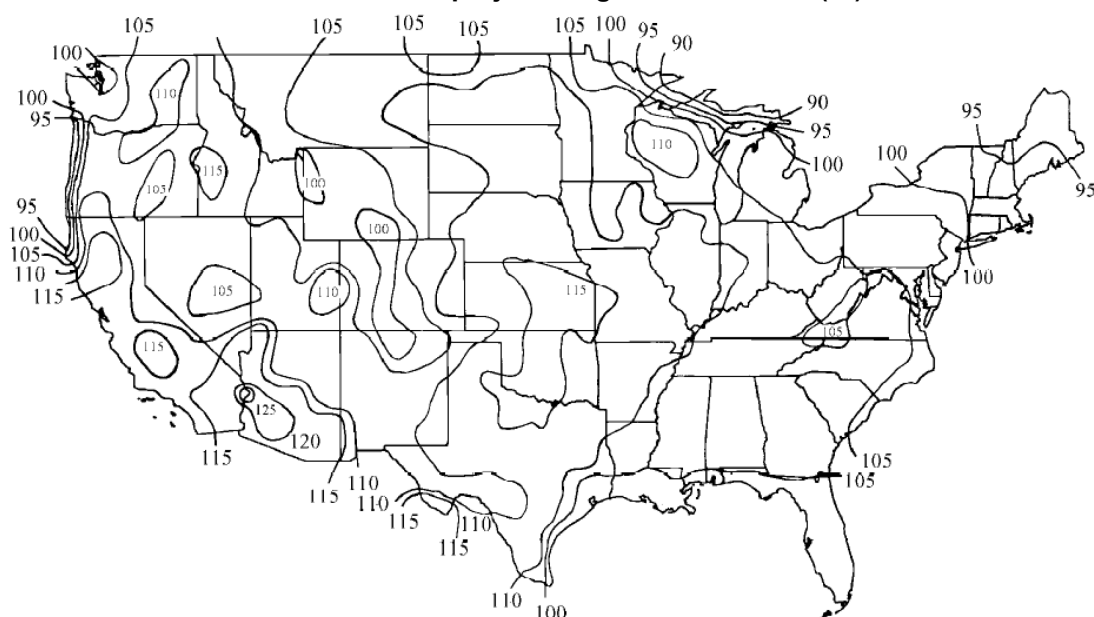


Fonte: Roeder (2002).

No mapa da figura 23 estão representadas as isocurvas de temperaturas mínimas de projetos, em graus Fahrenheit, onde podem ser observadas variações limites de -40°F a $+50^{\circ}\text{F}$, conforme a localização, o que corresponde a -40°C e $+10^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

O mapa da figura 24 tem representadas as isocurvas de temperaturas máximas de projeto, onde podem ser encontradas valores variando de extremos de se observam valores de 95°F a 125°F , conforme a localização, isto é, valores de 35°C a 52°C .

Figura 24 - Mapa proposto por Roeder e incorporado na AASHTO para temperaturas extremas máximas de projeto em graus Fahrenheit (°F).



Fonte: Roeder (2002).

Para a aplicação na simulação numérica da estrutura, deve ser determinada a variação térmica de projeto através do cálculo da diferença entre o valor máximo e o valor mínimo obtidos nos mapas.

A norma europeia, Eurocode 1, parte 5 (CEN, 2003), seguindo a tendência dos estudos de determinação das temperaturas efetivas para uso regional, delegou a responsabilidade pelo desenvolvimento de mapas de temperatura para os países, sendo tratados como anexos regionais. Para a produção destes mapas foram definidos os critérios base para a correlação com as temperaturas efetivas, publicados no Eurocode 1 (CEN, 2003), quais sejam:

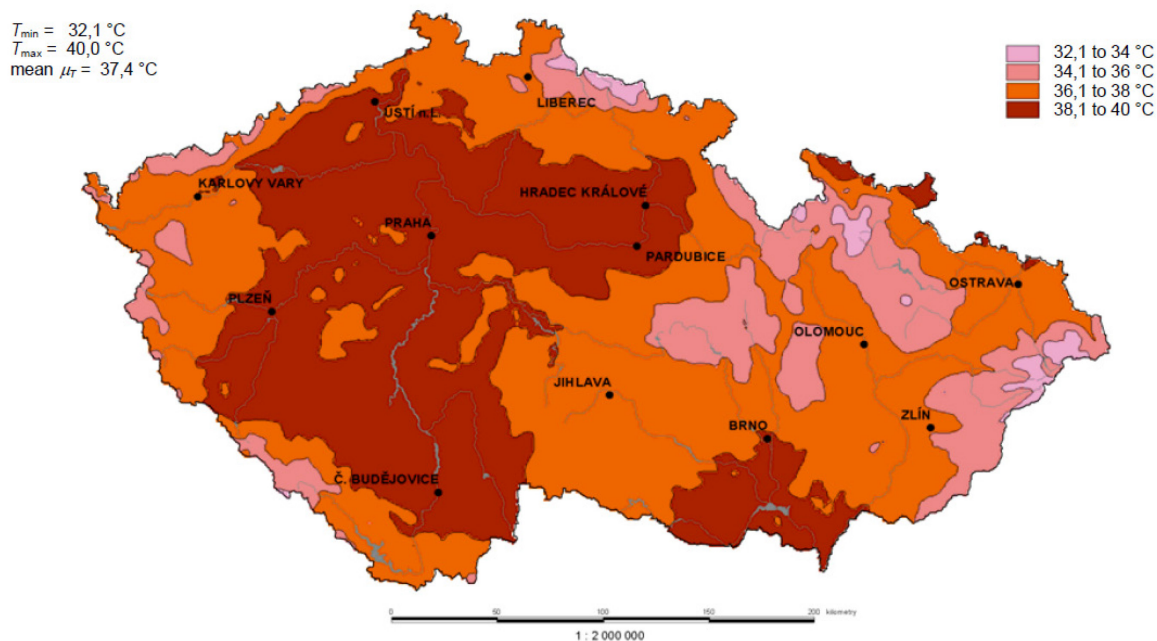
- Os valores característicos das temperaturas mínimas e máximas do ar à sombra para o local devem ser obtidos, por exemplo, a partir de mapas nacionais de isotermas.
- Esses valores característicos devem representar as temperaturas do ar à sombra em nível do mar, em campo aberto, com probabilidade anual de ser ultrapassado de 0,02.
- Para outras probabilidades anuais de serem excedidas (p diferente de 0,02), altura acima do nível do mar e condições locais, os valores devem ser ajustados.

Estes requisitos definem a situações gerais e consideram a grande diversidade de climas na região, bem como, os efeitos das grandes altitudes de certas cidades, prevendo uma correção para os ajustes nestas condições, tendo em vista que a presença de neve constante em determinados períodos afetam as condições gerais de transferência de calor.

A probabilidade de ocorrência anual de 0,02 corresponde a um tempo de recorrência de 50 anos e, ao final deste período, a 63,6% de chances de ter ocorrido. De acordo com Formichi (2016), este valor característico está relacionado com os coeficientes parciais de segurança dos métodos dos estados limites de projeto e, por sua vez, com índice de confiabilidade estrutural superior a 3,8 para os 50 anos.

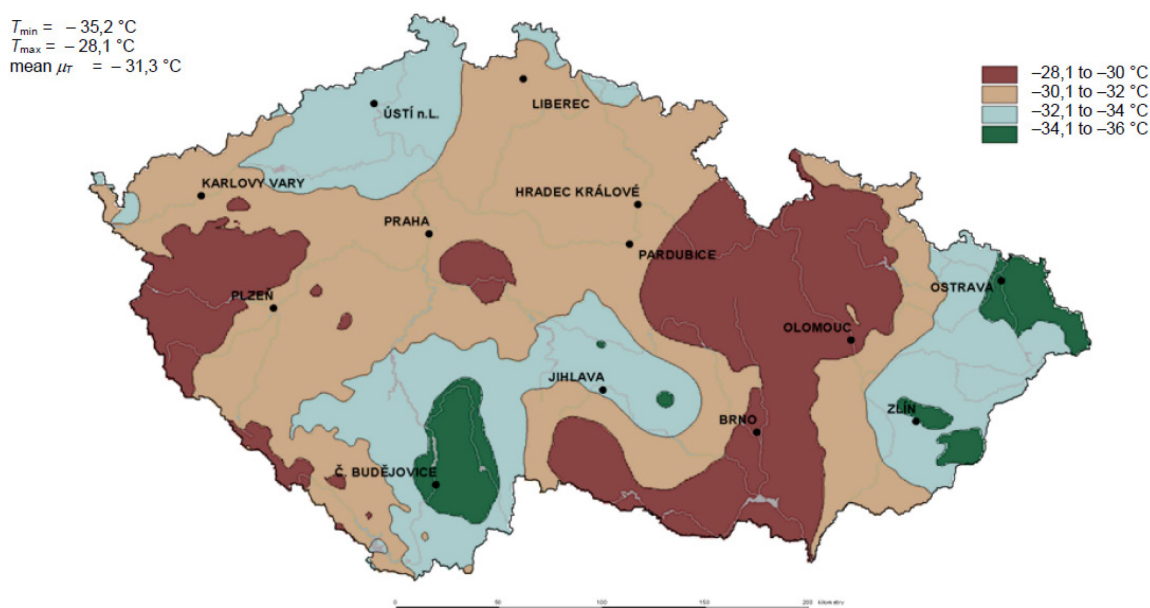
Conforme Marková e Holický (2009), os valores de temperatura foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia do país de modo a produzir os mapas da República Tcheca, indicados nas figuras 25 e 26, onde são apresentadas as isotermas de temperatura máxima e mínima, respectivamente.

Figura 25 - Mapa de temperatura máxima do ar à sombra na República Tcheca.



Fonte: Marková; Holický (2009).

Figura 26 - Mapa de temperatura mínima do ar à sombra na República Tcheca.



Fonte: Marková; Holický (2009).

Nos mapas das figuras 25 e 26, pode ser observado que as temperaturas são representadas por cores correspondentes aos intervalos de temperatura, variando de 32,1°C até 40°C, para temperatura máxima, e de -28,1°C a -36°C para temperatura mínima.

No Relatório do JRC (2016), “*Elaboration of maps for climatic and seismic actions for structural design with the Eurocodes*”, vários resultados de mapas climáticos foram apresentados, bem como, as diferenças observadas em processos de coleta de dados dos institutos meteorológicos, os diferentes métodos de tratamento estatístico dos dados e as formas diferentes de apresentação dos mapas. Destacam-se os mapas da Grécia (Malakatas, 2016), da Itália (Croce, 2016), da Bulgária (Nikolov; Gocheva, 2016).

Nos mapas da Bulgária, figuras 27 e 28, a variação de cores se apresenta em escala gradual de 22°C a 46°C, para a temperatura máxima, e de -21°C a -33°C, para temperatura mínima, demonstrando a diferença nos valores ao longo do país. Além disso, pode ser observada a escala lateral de coordenadas com as latitudes e longitudes que auxiliam na definição da localização.

Apesar da diferença de apresentação, os valores das amplitudes obtidos atingem 70°C para determinadas regiões em ambos os países, o que denota a importância das análises dos efeitos de expansão e contração. Observa-se que se trata também de uma situação improvável para o clima brasileiro.

Para consideração como ação sobre a estrutura, os valores das temperaturas do ar extremas à sombra máximas e mínimas ($T_{máx}$ e $T_{mín}$) obtidas das isotermas devem ser correlacionadas com as temperaturas efetivas máximas e mínimas ($T_{e,máx}$ e $T_{e,mín}$) e, posteriormente, determinadas as variações correspondentes a expansão e contração, conforme as equações 20 e 21, para simulação do comportamento e determinação de esforços da estrutura.

Esta correlação, como citado em 2.1.4, foi obtida através do monitoramento das temperaturas do ar do ambiente, das temperaturas das seções do elemento estrutural e dos deslocamentos uniformes da estrutura. A EN1991-1-5 apresenta como critérios para essa correlação a figura 29, derivada das seguintes correlações:

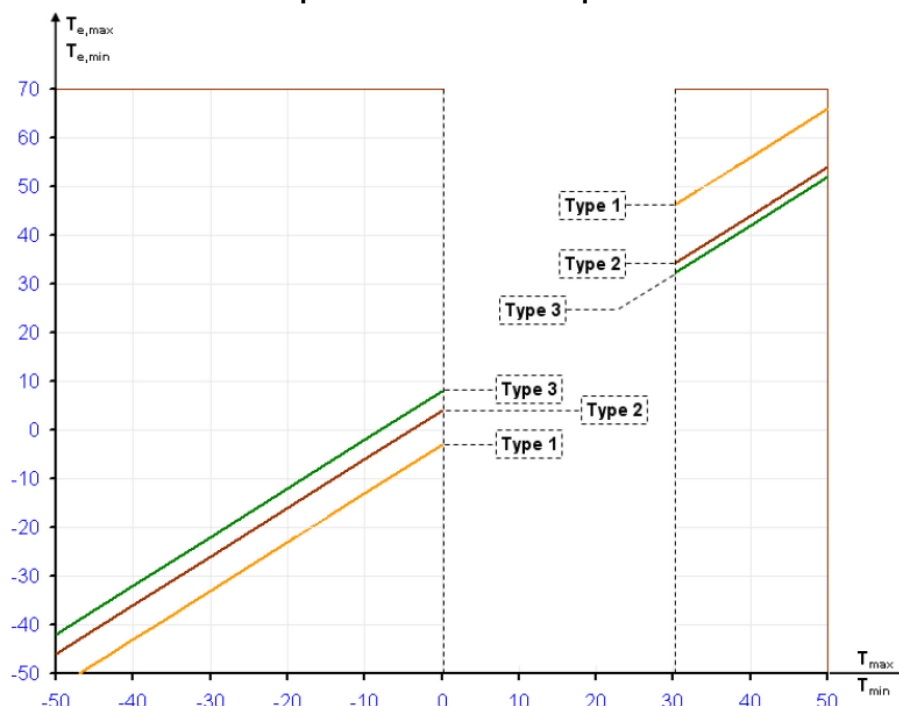
$$\begin{cases} T_{e,max} = T_{max} + 16^{\circ}\text{C} \\ T_{e,max} = T_{max} + 4^{\circ}\text{C} \\ T_{e,max} = T_{max} + 2^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad \text{para } 30^{\circ}\text{C} \leq T_{max} \leq 50^{\circ}\text{C} \quad (28)$$

$$\begin{cases} T_{e,min} = T_{min} - 3^{\circ}\text{C} \\ T_{e,min} = T_{min} + 4^{\circ}\text{C} \\ T_{e,min} = T_{min} + 8^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad \text{para } -50^{\circ}\text{C} \leq T_{max} \leq 0^{\circ}\text{C} \quad (29)$$

As três equações de cada caso se referem aos três tipos de estruturas citados na figura 29, quais sejam:

- Tipo 1: Pontes metálicas.
- Tipo 2: Pontes mistas concreto e metálica.
- Tipo 3: Pontes em concreto.

Figura 29 - Correlação entre temperaturas extremas do ar à sombra e componentes da temperatura uniforme em pontes



Fonte: CEN (2003).

Na figura 29, destaca-se a ausência de valores no intervalo de 0 a 30°C, tendo em vista que os valores de temperaturas extremas mínimas e máximas do ar para a região do Eurocode, em geral, se apresenta fora do intervalo.

Para a aplicação como ação sobre as estruturas, os valores obtidos na consulta aos mapas ($T_{máx}$ e $T_{mín}$) são então corrigidos de acordo com as equações 28 e 29 ou através do gráfico da figura 29, obtendo-se os valores efetivos de temperatura na estrutura ($T_{e,máx}$ e $T_{e,mín}$). Na sequência determina-se a diferença entre o valor da temperatura de referência inicial (T_0), valor tomado como representativo do instante de remoção dos cimbrantes, e os valores das temperaturas efetivas. Estes valores são, então, aplicados na simulação estrutural como variação de temperatura.

A revisão destes critérios e as correspondentes considerações permitiram a seleção do método a ser empregado para elaboração dos mapas de isotermas para o Brasil, tendo como conclusão a necessidade de que se considerem as características das normas tomadas como referência e a brasileira, bem como, a disponibilidade de dados e as correlações. Estas condições serão tratadas no capítulo 3, deste trabalho.

2.3 Critérios relacionados aos Estados Limites de Projeto

Os problemas de engenharia que envolvem projetos, avaliações e planejamento estão relacionados as decisões que se fundamentam em uma combinação de incertezas inerentes aos processos e ao ambiente. De acordo com Faber (2008), estas condições já estão consideradas há mais de 30 anos, baseados na teoria de decisão Bayesiana e nos modelos de probabilidade Bayesiana que hoje se traduzem nos métodos de análise de confiabilidade estrutural. Trata-se de uma evolução da interpretação frequentista, onde o modelo de probabilidades se baseia apenas nas observações contáveis, e da interpretação formal, onde se confia totalmente nas análises que são baseados em ideias e julgamentos sem as devidas evidências, como a ausência de confirmações de comportamento físico.

Na análise Bayesiana, os dois conceitos são aceitos e as incertezas podem ser tratadas, permitindo que diversas fontes de evidências sejam utilizadas.

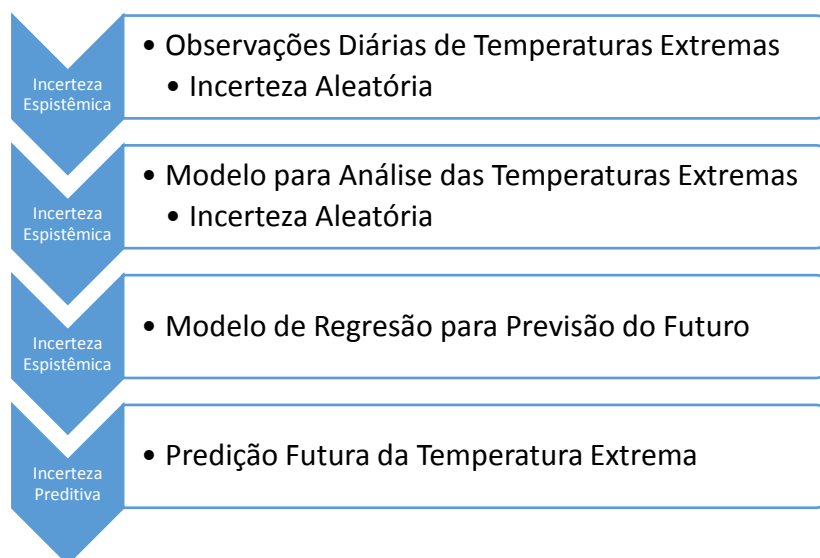
As considerações dos períodos de retorno como parâmetro único trouxeram durante anos certa confusão na interpretação do significado de segurança e do risco associado a alguns acontecimentos que envolvem as obras de engenharia.

Assim, dentro do estudo das ações em estruturas, sempre é pertinente esclarecer as correlações entre os modelos estatísticos e probabilísticos empregados para a obtenção de valores a serem empregados em projetos e para a avaliação de riscos vinculados a segurança das estruturas de modo mais realístico (Song *et al.*, 2020).

Quando se avaliam as variáveis envolvidas em um fenômeno, as incertezas são tratadas a partir da simplificação do universo, tratando o mesmo como determinístico e perfeito. Isto permite aceitar a quantificação das variáveis através da amostragem, já que não é possível se registrar todas as informações, bem como aceitar a representação por parâmetros, como, por exemplo, a média, o desvio padrão, o coeficiente de distorção ("*skewness*"), entre outros.

Na figura 30, a relação das incertezas relacionadas as previsões das temperaturas extremas estão apresentadas. Nas três fases iniciais observam-se as incertezas epistêmicas, isto é, onde há a informação incompleta, sendo que, na coleta e no modelo de tratamento, as incertezas são tratadas como aleatórias. Com a geração do modelo de regressão, define-se o processo estocástico que produz como resposta um modelo determinístico a ser aplicado.

Figura 30 - Incertezas típicas no processo de engenharia aplicada as temperaturas extremas.



Fonte: Autoria própria (2021), baseado em Faber (2008).

Assim, quando se trata de projetos de estruturas, a definição de equações e modelos de obtenção de valores para aplicação nos processos de simulação de estruturas, estas incertezas estarão sendo ajustadas por meio da análise de probabilidades.

Dependendo da natureza das ações, a classificação apresentada no JCSS *Probabilista Model Code* (2015) especifica que as ações que causam deslocamentos impostos ou efeitos térmicos na estrutura são denominadas de ações indiretas.

Ainda, de acordo com JCSS (2015), a variação no tempo permite a classificação das ações em:

- Permanentes, as quais apresentam pequenas variações em torno da média ao longo do tempo ou suas variações são lentas (peso próprio e empuxo do solo, por exemplo) ou, ainda, que apresentam um limite monotônico (como a protensão, retração, deformação lenta e efeitos de temperatura)
- Variáveis, as quais são caracterizadas por grandes variações e com grande frequência (como, por exemplo, a carga de utilização dos ambientes e ações externas, como o vento)
- Excepcionais, as quais apresentam considerável magnitude, porém baixa probabilidade de ocorrência (casos de cargas de impacto, explosões, por exemplo)

Para a NBR8681 (ABNT, 2003), as ações de temperatura estão classificadas como ações acidentais, item 4.2.1.2, sendo, portanto, uma questão que exigirá o ajuste entre os modelos de estados limites propostos pelas diferentes normas de projetos.

Nos conceitos básicos de projetos, as ações são representadas sobre a estrutura a partir de duas variáveis constituintes, F_o e W , correspondentes à ação que causa o efeito na estrutura e o parâmetro de conversão da ação para os efeitos considerando o tipo e porte da estrutura, respectivamente. O primeiro considera a ação externa e sua variabilidade no tempo e, o segundo, o efeito interno e a distribuição no espaço. A equação 30 descreve essa relação.

$$F = f(F_o, W) \quad (30)$$

Estes modelos poderão, então, descrever processos estocásticos e randômicos, variáveis sequenciais, variáveis randômicas aleatórias e valores determinísticos ou funções que representem as ações.

Como interesse nos processos simples com distribuição de extremos, o valor representativo de carga para determinado período de tempo pode ser avaliada pela distribuição de máximos gaussianas, na maioria dos casos, e dada por (31), conforme JCSS (2015):

$$F_{maxF}(a) \cong \exp[-t_0 v^+(a)] \quad (31)$$

Onde:

F_{max} é a força máxima da ação

t_0 é o período de tempo de referência

a é a ação

A frequência limite superior $v^+(a)$ é dada por:

$$v^+(a) = P\{F_t < a \text{ and } F_{t+dt} > a\}/dt \quad (32)$$

Para o modelo de Ferry Borges Castanheda (FBD), $v^+(a)$ é dada, simplesmente, por:

$$v^+(a) = (1 - F_F(a))F_F(a)/\Delta t \cong (1 - F_F(a))/\Delta t \quad (33)$$

No caso de um processo gaussiano contínuo, $v^+(a)$ será representado como:

$$v^+(a) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\rho''(0)} \exp(-\beta^2/2) \quad (34)$$

Onde:

$$\beta = (a - \mu(F))/F(F)$$

ρ é a função de correlação

Cabe destacar que a representação de valores extremos tem buscado utilizar funções de distribuição de probabilidade que apresentem melhor aderência aos dados observados, permitindo melhor ajuste e, portanto, melhor previsão dos valores das ações e dos efeitos.

Segundo Formichi (2016), os requisitos de segurança e estabilidade dos Estados Limites Últimos de Projeto (ELU) e as verificações de desempenho nos Estados Limites de Serviço (ELS) devem atender todas as possíveis situações de projeto que a estrutura poderá estar sujeita, desde a execução, período de serviço, reparo e eventual descomissionamento.

Observando as prescrições da NBR8681 (ABNT, 2003), de modo a compatibilizar os coeficientes de ponderação e os fatores de combinação dos estados limites de projeto, destacam-se os valores característicos de acordo com os seguintes critérios:

- As distribuições de valores extremos têm um período de referência de 50 anos, por convenção, agindo de modo independente;
- Para ajuste as diferentes vidas úteis previstas, ajustam-se os valores de acordo com o período de retorno e a probabilidade de ocorrência de cada ação;
- Serão tomados como valores característicos os correspondentes a probabilidade de 25% a 35% de serem ultrapassados durante o período de referência, isto é, 50 anos.

Como visto no item 2.1.8, o Eurocode 1 utiliza como referência a probabilidade de ocorrência de 0,02, correspondente a um tempo de retorno de 50 anos, caracterizando uma probabilidade de 63,5% de ser ultrapassado neste período.

Assim, não basta aplicar o mesmo período de retorno indicado nesta norma, mas é necessário determinar o período de retorno compatível com a previsão da NBR8681 (ABNT, 2003) para determinação dos valores das temperaturas extremas para projeto.

Com a probabilidade indicada pela NBR8681 (ABNT, 2003) é possível se avaliar os tempos de recorrência compatíveis.

Com p^{50} , denominada probabilidade de ocorrência para cinquenta anos, igual a 0,35, pode ser obtida a probabilidade de não ocorrência para este período, q^{50} .

$$q^{50} = 1 - p^{50} \quad (35)$$

Portanto, para $p^{50} = 0,35$, tem-se:

$$q^{50} = 0,65 \quad (36)$$

Assim,

$$q = 0,65^{\frac{1}{50}} \quad (37)$$

Ou seja,

$$q = 0,99 \quad (38)$$

Retornando para p , assim escrito:

$$p = 1 - q \quad (39)$$

Tem-se, portanto, a seguinte probabilidade:

$$p = 0,01 \quad (40)$$

Concluindo, tem-se um tempo de retorno de 100 anos para fins da determinação das temperaturas extremas de acordo com os parâmetros utilizados nos métodos de estados limites no Brasil. Para evitar um erro conceitual, deve ser desvinculado para este raciocínio a previsão de vida útil de 50 anos que se trata de premissa da NBR6118 (ABNT, 2003) para avaliação do desempenho das estruturas.

Neste caso, tomou-se como referência as duas casas decimais usuais nos valores de probabilidade normativas, mas se for aplicada todas as decimais tem-se um tempo de retorno de 116,7 anos. Como a temperatura se trata de uma variável truncada, como poderá ser observado na apresentação dos resultados de regressão e ajuste dos modelos estatísticos, a variação dos valores extremos entre os períodos de 50 e 100 anos são pequenos, da ordem de 1° Celsius.

No Eurocode é apresentada uma equação para correlação com outras probabilidades que forem adotadas, sendo indicadas nas temperaturas máximas variações de 3%, aproximadamente, e para temperaturas mínimas variação de 11%, que no caso dos valores extremos de temperatura representam valores entre 0,1 e 1° Celsius.

2.4 Estatística de valores extremos

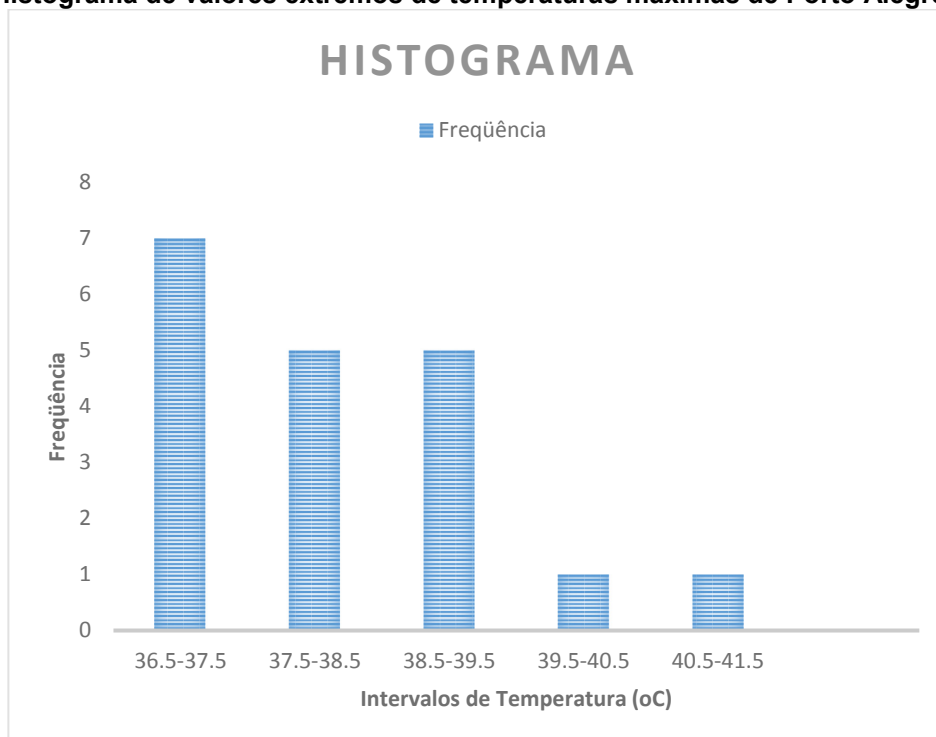
Para a aplicação dos ajustes das funções de probabilidade que são empregadas nas definições de valores extremos, neste item serão apresentados os conceitos gerais que regem a estatística de extremos, bem como, as equações das funções utilizadas.

As variáveis aleatórias de distribuição para a aplicação nos modelos de ações de estruturas, como visto no item anterior, devem ser obtidos pela análise de valores extremos. Este é um campo da estatística e probabilidade que trata da determinação de valores máximos e mínimos em processos estocásticos que são determinados pelos valores caudais inferiores e superiores de uma distribuição de probabilidades, de acordo com Castillo (1988); Haan e Ferreira (2006).

Estes modelos são aplicados rotineiramente para estudos climatológicos e de hidrologia utilizados na engenharia e em outras áreas do conhecimento que envolvem o controle de desastres, agropecuária, entre outras diversas utilidades. Na figura 31, pode ser observada a frequência e os intervalos de temperatura no histograma que

exemplifica a característica das distribuições de valores extremos, tendo como exemplo as temperaturas máximas da cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul.

Figura 31 - Histograma de valores extremos de temperaturas máximas de Porto Alegre/RS.



Fonte: Autoria própria (2021).

Para a aplicação, de acordo com a teoria de valores extremos original, os valores extremos de um determinado período de tempo em análise são classificados em ordem crescente (CHEN, 2008). As probabilidades teóricas são obtidas pela probabilidade acumulativa e obtidas pela equação 41:

$$p_i = \frac{i}{n + 1} \quad (41)$$

Onde:

i é o índice em ordem crescente correspondente aos valores da amostra

p_i é o valor empírico da distribuição acumulativa de índice i

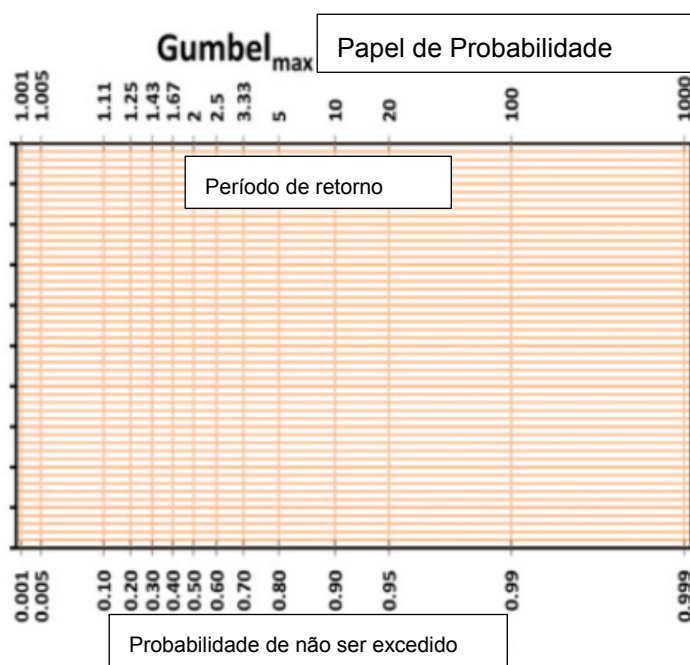
n é o número de amostras

Na sequência a função de distribuição cumulativa (FDC) empírica é plotada em papel de probabilidade de Gumbel, tendo como coordenadas $[x_i, \ln(-\ln\pi)]$. Na figura 32, tem-se um exemplo do papel de probabilidade de Gumbel com os valores correspondentes nas abcissas do período de retorno.

Então, na sequência, é verificado visualmente se há a aderência entre a curva obtida com a correspondente função de Gumbel. Caso seja rejeitada, plota-se no papel de probabilidades de Weibull.

E, com a FDC adequada, calcula-se o valor extremo para o período de retorno desejado.

Figura 32 - Papel de probabilidade de Gumbel genérico.



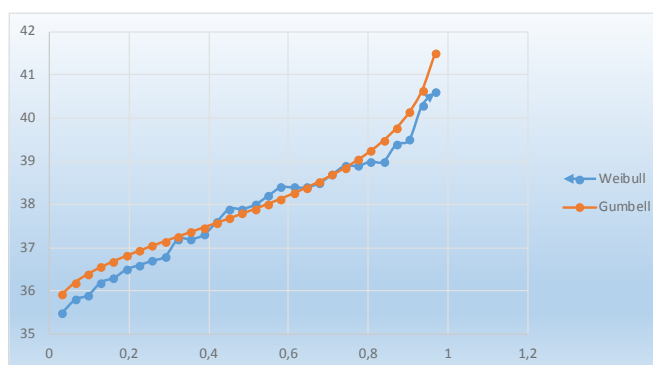
Fonte: adaptado de Naghettini; Pinto (2017).

O modelo empírico proposto pode ser utilizado em planilhas eletrônicas onde a sequência de procedimentos pode ser organizada para facilitar as repetições. Na figura 33 está apresentado um estudo preliminar deste trabalho com a utilização de uma planilha para determinação do valor de máximo com o emprego dos dados obtidos da estação meteorológica de Porto Alegre.

Figura 33 – Estudo de máximos utilizando planilha eletrônica e as funções de distribuição de Weibull e Gumbel.

Cálculo do Caudal (T) máximo e mínimo com tempo de retorno de 100 anos Weibull e Gumbel

Weibull	Ordem	P>X	F(x)	X (Gumbel)
40,6	1	0,032258	0,967742	41,496
40,3	2	0,064516	0,935484	40,646
39,5	3	0,096774	0,903226	40,140
39,4	4	0,129032	0,870968	39,775
39,0	5	0,161129	0,83871	39,486
39,0	6	0,193548	0,806452	39,245
38,9	7	0,225806	0,774194	39,037
38,9	8	0,258065	0,741935	38,853
38,7	9	0,290323	0,709677	38,686
38,5	10	0,322581	0,677419	38,534
38,4	11	0,354839	0,645161	38,393
38,4	12	0,387097	0,612903	38,260
38,4	13	0,419355	0,580645	38,135
38,2	14	0,451613	0,548387	38,015
38,0	15	0,483871	0,516129	37,900
37,9	16	0,516129	0,483871	37,789
37,9	17	0,548387	0,451613	37,680
37,6	18	0,580645	0,419355	37,573
37,3	19	0,612903	0,387097	37,468
37,2	20	0,645161	0,354839	37,363
37,2	21	0,677419	0,322581	37,258
36,8	22	0,709677	0,290323	37,151
36,7	23	0,741935	0,258065	37,042
36,6	24	0,774194	0,225806	36,930
36,5	25	0,806452	0,193548	36,812
36,3	26	0,83871	0,161129	36,686
36,2	27	0,870968	0,129032	36,547
35,9	28	0,903226	0,096774	36,390
35,8	29	0,935484	0,064516	36,198
35,5	30	0,967742	0,032258	35,929



	t retorno=	100 anos
Gumbell	P>X=1/100	0,01
	F(x)=1-01	0,99
	Tmax r=100 X=	42,9 oC

Fonte: Autoria própria (2021).

As funções para o tratamento de distribuição de extremos apresentadas derivam da Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV), onde a função de distribuição acumulada é a seguinte:

$$F(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{\frac{1}{\xi}} \right\} \quad (42)$$

Definida para os seguintes limites:

$$-\infty < x < \mu - \frac{\sigma}{\xi} \quad \text{para } \xi < 0$$

$$-\infty < x < +\infty \quad \text{para } \xi \rightarrow 0,$$

$$\mu - \frac{\sigma}{\xi} < x < +\infty \quad \text{para } \xi > 0$$

Sendo:

μ, σ e ξ os parâmetros de locação, escala e de forma, respectivamente, com $\sigma > 0$.

As distribuições de Fréchet e Weibull são casos particulares da GEV, onde $\xi > 0$, para Fréchet, e $\xi < 0$, para Weibull.

Se for fixado o valor de ξ tendendo a 0 (zero), tem-se a função de distribuição acumulada de Gumbel, ou seja:

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right] \quad (43)$$

Onde o parâmetro de locação é μ (média da amostra) e de escala é σ (desvio padrão da amostra).

Estes modelos de avaliação inicialmente utilizados para a determinação de probabilidades de valores extremos possibilitou a expansão para ajustes através de outras funções de distribuição de probabilidade, como as que são apresentadas no quadro 1.

Quadro 1 - Funções de distribuição

(continua)

Tipo de distribuição	Parâmetros	Momentos
Retangular $a \leq x \leq b$ $f_x(x) = \frac{1}{b-a}$	$1 = a$ $2 = b$	$m = \frac{a+b}{2}$ $s = \frac{b-a}{\sqrt{12}}$
Normal $\sigma > 0$ $f_x(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2 \right)$	$1 = \mu$ $2 = \sigma$	$m = \mu$ $s = \sigma$
Lognormal $x > 0, \quad \xi > 0$ $f_x(x) = \frac{1}{x\xi\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi} \right)^2 \right)$	$1 = \lambda$ $2 = \xi$	$m = \exp \left(\lambda + \frac{\xi^2}{2} \right)$ $s = \exp \left(\lambda + \frac{\xi^2}{2} \right) \sqrt{\exp(\xi^2) - 1}$

Quadro 1 - Funções de distribuição

(continuação)

Tipo de distribuição	Parâmetros	Momentos
<p>Lognormal deslocada</p> <p>$x > \varepsilon, \quad \xi > 0$</p> <p>$f_x(x) =$</p> $\frac{1}{(x - \varepsilon)\xi\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x - \varepsilon) - \lambda}{\xi}\right)^2\right)$	<p>1 = λ</p> <p>2 = ξ</p> <p>3 = ε</p>	<p>$m = \varepsilon + \exp\left(\lambda + \frac{\xi^2}{2}\right) + \varepsilon$</p> <p>$s = \exp\left(\lambda + \frac{\xi^2}{2}\right) \sqrt{\exp(\xi^2) - 1}$</p>
<p>Exponencial deslocada</p> <p>$x \geq \varepsilon, \quad \lambda > 0$</p> <p>$f_x(x) = \lambda \exp(-\lambda(x - \varepsilon))$</p>	<p>1 = λ</p> <p>2 = ε</p>	<p>$m = \frac{1}{\lambda} + \varepsilon$</p> <p>$s = \frac{1}{\lambda}$</p>
<p>Gama deslocada</p> <p>$x \geq 0, \quad b > 0, \quad p > 0$</p> <p>$f_x(x) = \frac{b^p}{\Gamma(p)} \exp(-b(x - \varepsilon))(x - \varepsilon)^{p-1}$</p>	<p>1 = p</p> <p>2 = b</p> <p>3 = ε</p>	<p>$m = \frac{p}{b} + \varepsilon$</p> <p>$s = \frac{\sqrt{p}}{b}$</p>
<p>Beta</p> <p>$a \leq x \leq b, \quad r, t \geq 1$</p> <p>$f_x(x) = \frac{(x - a)^{r-1}(b - x)^{t-1}}{(b - a)^{r+t-1} B(r, t)}$</p>	<p>1 = a</p> <p>2 = b</p> <p>3 = r</p> <p>4 = t</p>	<p>$m = a + (b - a) \frac{r}{r + t}$</p> <p>$s = \frac{b - a}{r + t} \sqrt{\frac{rt}{r + t + 1}}$</p>
<p>Gumbel (Máximo)</p> <p>$-\infty < x < +\infty, \quad \alpha > 0$</p> <p>$f_x(x) =$</p> <p>$\alpha \exp(-\alpha(x - u) - \exp(-\alpha(x - u)))$</p>	<p>1 = u</p> <p>2 = α</p>	<p>$m = u + \frac{0,577216}{\alpha}$</p> <p>$s = \frac{\pi}{\alpha\sqrt{6}}$</p>
<p>Fréchet (Máximo)</p> <p>$\varepsilon \leq x < +\infty, \quad u, k > 0$</p> <p>$f_x(x) =$</p> $\frac{k}{u - \varepsilon} \left(\frac{x - \varepsilon}{u - \varepsilon}\right)^{-k-1} \exp\left(-\left(\frac{x - \varepsilon}{u - \varepsilon}\right)^{-k}\right)$	<p>1 = u</p> <p>2 = k</p> <p>3 = ε</p>	<p>$m = \varepsilon + (u - \varepsilon) \Gamma\left(1 - \frac{1}{k}\right)$</p> <p>$s =$</p> $(u - \varepsilon) \sqrt{\Gamma\left(1 - \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 - \frac{1}{k}\right)}$

Quadro 1 - Funções de distribuição

(conclusão)

<p>Weibull (Máximo)</p> $\varepsilon \leq x < +\infty, \quad u, k > 0$ $f_x(x) = \frac{k}{u - \varepsilon} \left(\frac{x - \varepsilon}{u - \varepsilon} \right)^{-k-1} \exp \left(- \left(\frac{x - \varepsilon}{u - \varepsilon} \right)^{-k} \right)$	$1 = u$ $2 = k$ $3 = \varepsilon$	$m = \varepsilon + (u - \varepsilon) \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)$ $s = (u - \varepsilon) \sqrt{\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right)}$
<p>Pearson Tipo III</p> $\alpha > 0, x > \varepsilon$ $\alpha < 0, x < \varepsilon$ $\beta > 0$ $f_x(x) = \frac{1}{ \alpha \Gamma(\beta)} \left(\frac{x - \varepsilon}{\alpha} \right)^{\beta-1} \exp \left(- \frac{x - \varepsilon}{\alpha} \right)$	$1 = \beta$ $2 = \alpha$ $3 = \varepsilon$	$\hat{X}_F = \hat{\varepsilon} + \hat{\alpha} \cdot y_F \cdot (\hat{\beta})$ <p>ou</p> $\hat{X}_F = \hat{\mu}_x + \hat{\sigma} \cdot K_F \cdot (\gamma_{P3})$

Fonte: adaptado do Código Modelo JCSS – Part 2: Load Models (JCSS, 2015)

A aceitação da aderência do modelo é feita através da análise visual e para os casos de distribuição de extremos através do teste de *Kolmogorov-Smirnov*. Neste teste compara-se a proporção de valores esperados em relação aos resultados da distribuição teórica, tendo-se aceito quando o módulo de desvio máximo observado é menor que o máximo tabelado de acordo com o nível de significância, ou seja,

$$D_{obs} = M_{ax} |F_{(x)} - S_{(x)}| \leq D_{tab} \quad (44)$$

Independente das verificações descritas deve ser observado que a qualidade dos resultados depende da disponibilidade dos dados, da seleção dos mesmos e da verificação de falhas de coleta que podem ocorrer devido a problemas no sensor, na transmissão, no registro ou no processamento dos dados (NAGHETTINI; PINTO, 2017) e, portanto, todo o processo deve ser conferido e ajustado ao longo do estudo, com a verificação dos *outliers* e remoção de eventuais falhas de leitura.

2.5 Considerações sobre a revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica permitiu observar o panorama do desenvolvimento dos estudos das temperaturas em estruturas, bem como, determinar os parâmetros necessários para desenvolvimento de um procedimento metodológico que observasse as recomendações existentes para a obtenção de mapas de temperatura para projetos.

A análise das ações térmicas em estruturas possibilitou correlacionar os fatores que afetam a variação térmica, os efeitos sobre os elementos estruturais e a identificação da parcela tratada neste trabalho, esclarecendo como a temperatura uniforme e o fluxo de calor afetam os esforços internos solicitantes.

A revisão sobre as pesquisas sobre o tema, além de apresentar a evolução do conhecimento, permitiu a comparação dos critérios normativos e a apreciação dos resultados obtidos na produção de mapas de temperaturas para projetos, de modo a nortear a definição dos objetivos, as hipóteses e o resultado esperado. Destacam-se as representações dos mapas utilizados nos Estados Unidos da América e os mapas de alguns países europeus, com representações com isocurvas e cores, respectivamente.

O estudo comparativo sobre os métodos dos estados limites permitiu a observações de parâmetros associados a ponderação de ações que necessitam de ajustes, tendo em vista as considerações dos tempos de recorrência definidos nas diferentes normas.

Para o tratamento dos dados, conclui-se que a aplicação da estatística de valores extremos é necessária para a estimativa dos valores representativos de temperatura de modo a ajustar os modelos de previsão.

Assim, estas premissas orientaram o desenvolvimento de uma proposta para a organização, tratamento e adequação de dados, a definição do período de retorno e de um procedimento para elaboração de mapas com a utilização dos valores obtidos, tendo em consideração que os mapas desenvolvidos deverão ser atualizados periodicamente para que possam se ajustar as mudanças climáticas e eventuais mudanças de critérios normativos.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo estão apresentados os procedimentos, métodos e técnicas que foram empregados para a obtenção dos mapas de isotermas máximas e mínimas para o Brasil. O objetivo é permitir a repetibilidade do processo e a revisão dos resultados, tanto para validação, quanto para aplicação em novas coletas de dados com amostragem atualizada ao longo tempo. O processo de atualização periódica trará confiabilidade e a adequação dos valores das temperaturas de referência para projetos considerando as mudanças climáticas, conforme reportado na revisão bibliográfica.

3.1 Métodos e técnicas

A programação do estudo e das etapas de desenvolvimento pode ser observada através da figura 34, que descreve o método aplicado de modo a integrar os conhecimentos obtidos na revisão bibliográfica com os ajustes necessários as características locais, que vão desde a dimensão do país e a disponibilidade de dados, como ajuste de critério, no caso o tempo de retorno para a adequação aos Estados Limites de Projeto da normalização brasileira.

Figura 34 - Método proposto para obtenção dos mapas de temperatura.



Fonte: Autoria própria (2021).

O método proposto está associado à metodologia de pesquisa descritiva, onde se buscou efetuar uma coleta de dados e informações referentes a temperatura nas estruturas, para posterior elaboração de um procedimento, usando as técnicas da estatística e da geociência, para tratamento dos dados e obtenção dos mapas de temperatura. De acordo com Gil (2002), em geral, a pesquisa descritiva que pretende identificar a relação entre as variáveis, passa a ter o viés de explicativa, oferecendo as contribuições para a revisão e extensão dos estudos.

3.2 Levantamento e seleção dos dados

Neste item, serão apresentadas as informações sobre o levantamento de dados e suas características, descritas no método proposto como fase 1 e 2.

Para a verificação dos dados disponíveis, seguiu-se a sugestão dos trabalhos de Roeder (2002) e CEN (2003) que recomendam que sejam utilizados os dados obtidos dos institutos meteorológicos do país.

Verificando a disponibilidade de dados no Brasil, algumas instituições apresentam bancos de dados das coletas das informações meteorológicas, entre as quais o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), através do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, entre outros órgãos regionais, como o Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná). As informações destes bancos de dados provêm em grande parte das mesmas estações meteorológicas e, assim, pela possibilidade de seleção dos dados de interesse, organização em formato de planilhas eletrônicas e rápida obtenção dados, optou-se pela utilização dos dados fornecidos pelo INMET, órgão este vinculado ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

Os dados do INMET podem ser obtidos no portal BDMEP, no seguinte endereço eletrônico: <https://bdmep.inmet.gov.br/>, onde se selecionam as variáveis desejadas e o período de tempo. Os dados são encaminhados em arquivo no formato .csv (*character-separated values*) para o endereço eletrônico que for indicado.

Segundo o Código Modelo Probabilístico, JCSS (2015), para a confiança na avaliação estatística dos valores representativos da temperatura do ar à sombra, deve ser utilizado observações de dados de pelo menos 25 anos. Croce (2016) sugere um intervalo entre 30 e 50 anos de dados observados.

Como no Brasil a distribuição das estações meteorológicas pelo país tem se ampliado a partir de 1990, apesar de existir medições em algumas estações do início do século passado, optou-se pela utilização dos dados dos últimos trinta anos, ou seja, de 1991 a 2020. Os dados foram coletados de estações automáticas e, nos locais onde não estão disponíveis os dados de trinta anos, foram coletados das estações convencionais. As leituras destas são realizadas às 9h, 12h e 15h, enquanto as primeiras registram os dados de minuto em minuto com integração ao sistema nacional.

Na fotografia 1 é possível se observar a instalação de uma estação meteorológica automática integrada ao sistema nacional e na fotografia 2 os componentes.

Segundo o INMET (2011), a instalação deverá ocorrer em área afastada de construções, com área livre de efeitos de construções ao redor superior a 50m², em local isolado por tela metálica com dimensões de 18 metros por 14 metros e com proteção do solo por meio de gramado na região interna.

Fotografia 1 - Estação Meteorológica Automática típica – EMA.



Fonte: Nota Técnica No 001/2011 INMET (2011).

Fotografia 2 - Componentes de uma Estação Meteorológica Automática típica – EMA



Fonte: Nota Técnica No 001/2011 INMET (2011).

Na fotografia 2, destaca-se do lado direito o sensor de temperatura, a esquerda tem-se o pluviômetro e ao centro a antena de comunicação via satélite. (INMET, 2011).

Na fotografia 3, tem-se um modelo de Estação Meteorológica Convencional, localizada no Campus Medianeira da UTFPR, onde se destaca a presença da edificação onde ficam instalados os termômetros protegidos da ação direta do sol.

Fotografia 3 – Modelo Estação Meteorológica Convencional, Campus Medianeira da UTFPR.

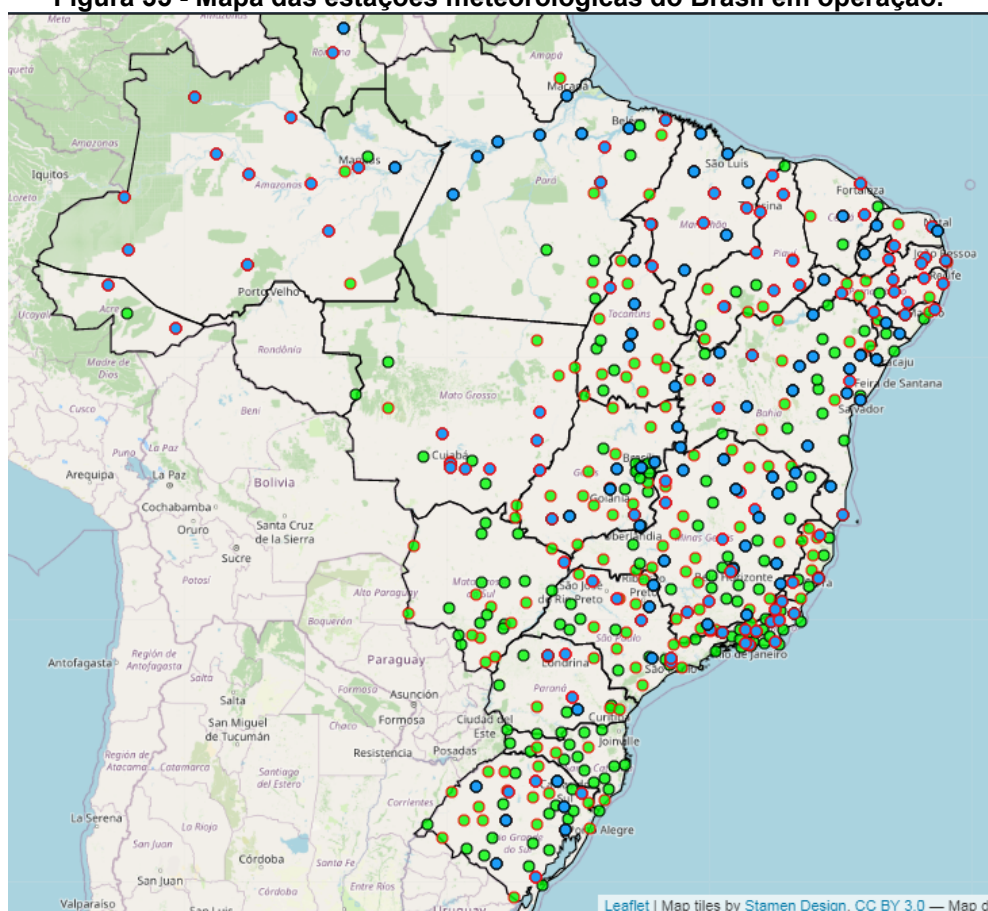


Fonte: Autoria própria (2021).

No mapa da figura 35 estão apresentadas as localizações das instalações das estações automáticas, em verde, e das estações convencionais, em azul, correspondente ao dia 10/10/2021 e que compõe a rede do INMET.

Neste mapa pode ser constatado que em algumas regiões ainda não há a presença de estações meteorológicas, o que afeta diretamente a qualidade dos resultados de isotermas da região, como no caso da região norte e parte do centro-oeste.

Figura 35 - Mapa das estações meteorológicas do Brasil em operação.



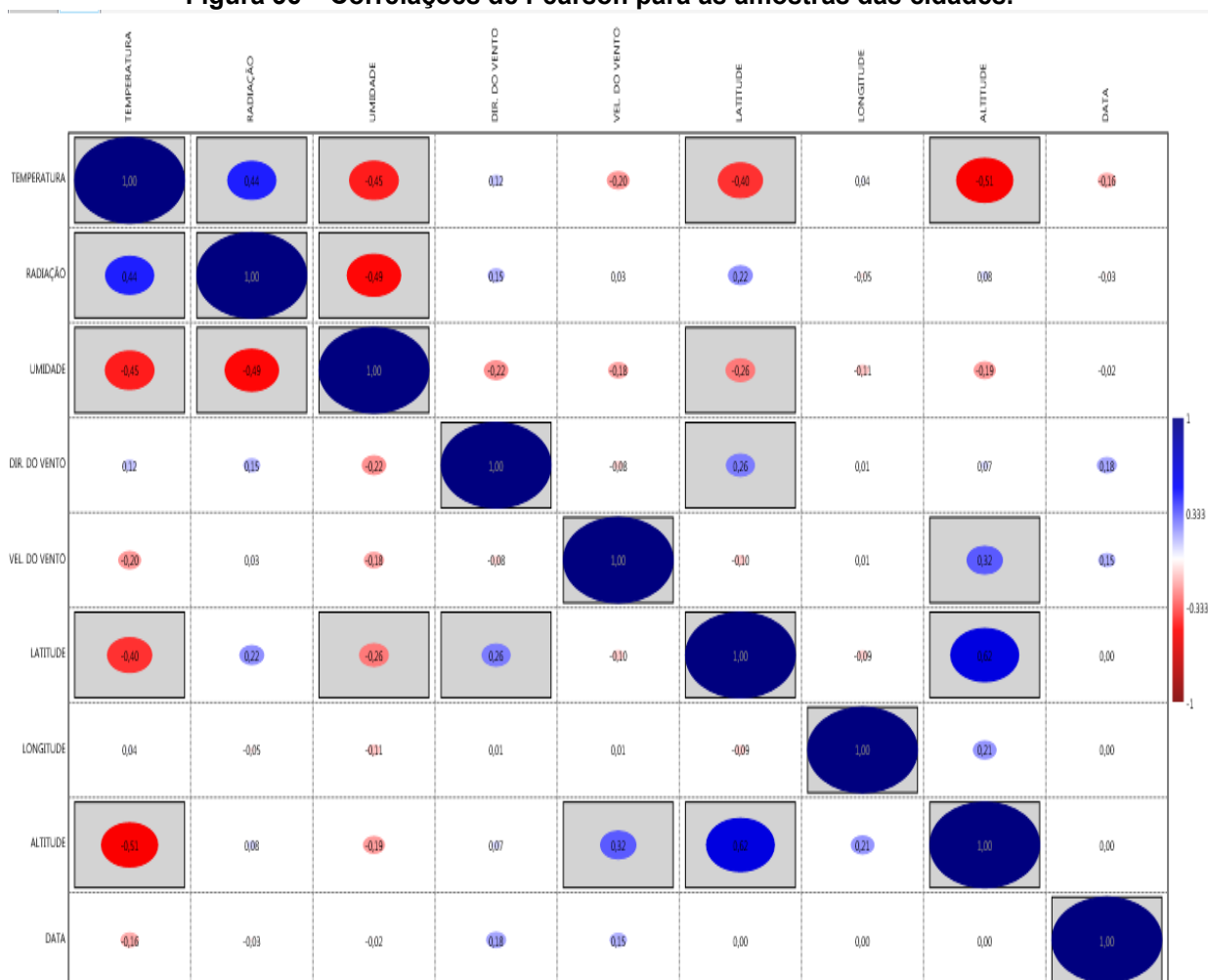
Fonte: INMET (2021).

Foram coletados os dados diários das temperaturas máximas e mínimas, radiação, direção do vento, velocidade do vento, umidade, latitude, longitude e altitude de 171 estações convencionais e 570 estações automáticas, perfazendo um total de dados superior a 2,4 milhões.

Estas informações prévias foram utilizadas para a análise de correlação entre as variáveis utilizando uma amostragem de cidades representativas de todas as regiões a fim de determinar quais são as que afetam significativamente a variável de interesse, isto é, a temperatura.

Na análise a duas variáveis, os valores das correlações de Pearson demonstraram a influência das seguintes variáveis: radiação, umidade, latitude e altitude, com níveis de significância semelhantes, conforme a figura 36. A hipótese inicial de que poderia haver uma relação efetiva entre a localização, a radiação e os valores da temperatura, foi comprovada. Destaca-se na questão da localização, que a longitude não foi considerada como significativa. Por outro lado, a variável umidade, suposta inicialmente com menor relevância, se apresentou como significativa.

Figura 36 – Correlações de Pearson para as amostras das cidades.



Fonte: Autoria própria (2021).

Os valores destacados com retângulos hachurados correspondem as correlações com o valor para significância $p < 0,05$, indicando a hipótese verdadeira da correlação entre as variáveis. Os valores em cada quadro correspondem ao valor r linear de Pearson, com valor 0 para inexistência de relação linear e 1 para relação linear perfeita positiva ou negativa.

Analisando esta resposta, conclui-se que a mesma pode estar relacionada as variáveis intensidade de chuvas e cobertura de nuvens que não estavam disponíveis ou não foram mensuradas.

A análise permite identificar a possibilidade de determinar o parâmetro temperatura do ar à sombra do local a estudar através destas variáveis, bem como, considerar que as variações da temperatura entre o ponto de coleta de dados de temperatura do ar e a localização efetiva da obra também podem sofrer influência destas variáveis. Como descrito no item 2.2.1, estudos no sentido de entender a relação entre estas variáveis estão sendo desenvolvidos através de estudos de caso e buscam caracterizar o valor da temperatura efetiva de projeto. Como as conclusões a cerca destas relações ainda não permitem uma extrapolação, esta pesquisa manteve a ênfase na obtenção das temperaturas do ar à sombra como parâmetro para obtenção dos valores das temperaturas de projeto, seguindo as recomendações das normalizações atuais que utilizam os mapas de isotermas como referência.

3.3 Comportamento da temperatura

Para compreensão e validação do comportamento da temperatura em obras, conforme casos apresentados no item 2.1, foram elaborados alguns estudos preliminares para a verificação do fluxo de calor ao longo do dia, correlacionando as temperaturas monitoradas pela estação meteorológica e as temperaturas nas partes componentes de algumas estruturas.

Para isto, foi utilizada a termografia infravermelha que, apesar de apresentar algumas influências externas, permite a coleta de dados de temperatura sem provocar danos nas estruturas e sem requerer a estimulação externa, chamada termografia passiva, usando apenas a energia solar (Rocha e Póvoas, 2017).

Para a determinação do valor correspondente da temperatura, a termografia aplica a equação de Stefan-Boltzmann, conforme a equação 11, apresentada no item 2.1.2.

As medições de temperatura foram realizadas em estruturas de pontes e viadutos em algumas cidades de diferentes regiões do país. Os valores de temperatura das estruturas foram obtidos com a utilização de uma câmera termográfica compacta da marca Flir, modelo C2, com sensibilidade inferior a $0,10^{\circ}\text{C}$, precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ e correção de emissividade.

Observando as orientações de Takeda e Mazer (2018), foram analisados previamente os valores da emissividade do concreto entre 0,90 e 1,00, tendo-se utilizado como padrão o valor de 0,95. Além disso, foram consideradas as distâncias das superfícies, como segundo parâmetro necessário à configuração da câmera.

Os valores da temperatura do ar à sombra da cidade onde encontram-se as estruturas foram obtidas por meio da consulta ao portal BDMEP do INMET, tomando-se o valor correspondente ao dia e a hora inicial do intervalo de medição. Para verificação de eventual ocorrência da variação representativa das temperaturas que afetassem a comparação dos valores, foi observado o valor da temperatura correspondente a hora seguinte dos registros das estações. Nestes estudos preliminares, a temperatura em todos os casos foi obtida das estações automáticas da região.

Os resultados desta análise constam do capítulo 4, Resultados e Discussões.

Como apresentado no item 2.2.4, as análises de eventos extremos se utilizam de funções de distribuição de probabilidade que são ajustadas aos valores coletados que representa o histórico de ocorrências de um evento, neste estudo a temperatura.

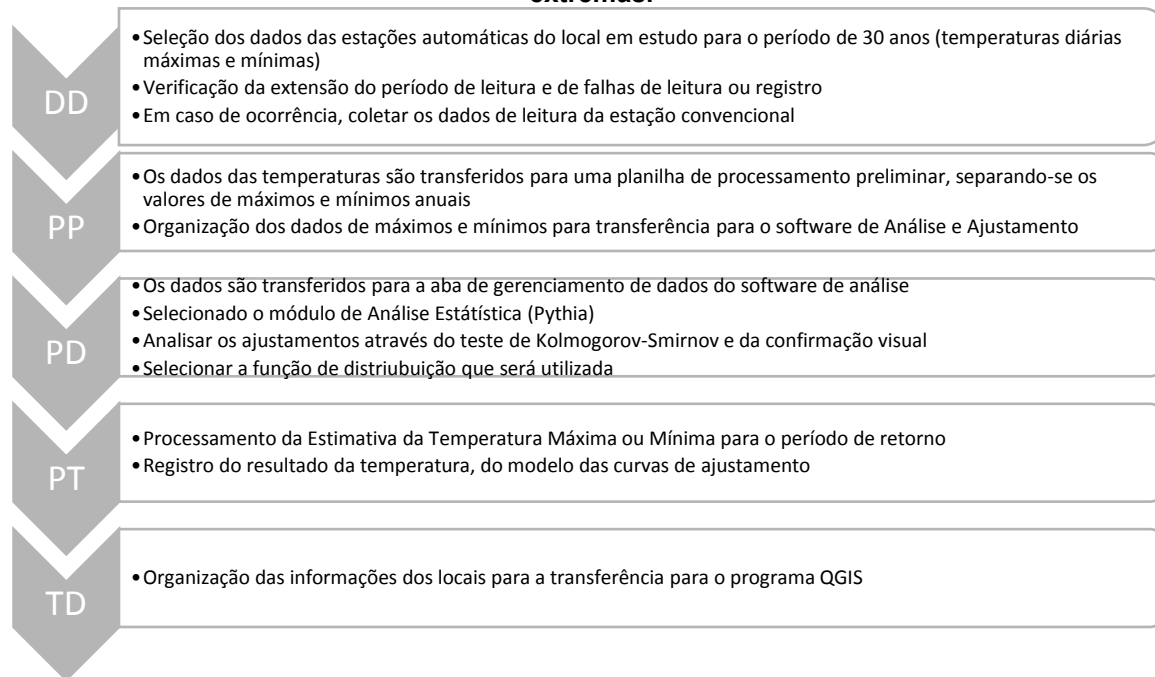
3.4 Tratamento dos dados de temperatura

Na análise das temperaturas do ar à sombra dos locais para a definição dos mapas de temperatura máximas e mínimas para projetos de estruturas, foi necessário se estabelecer um procedimento sequencial para o tratamento dos dados. A definição do programa de análise e a orientação do processo de análise destes dados para a obtenção dos resultados desejados da temperatura máxima e da temperatura mínima, correspondente ao tempo de recorrência previsto, é obtido por meio do ajustamento de uma função de distribuição válida para eventos extremos, conforme demonstrado no item 2.4.

Assim, para alcançar o ajustamento e a seleção da função que melhor represente a amostra para posterior estimativa do valor da temperatura do ar à sombra, com tempo de recorrência estipulado em 100 anos, conforme descrito no item 2.2.3, foi proposto o método de tratamento dos dados, de acordo com a figura 37. Como apresentado, há uma fase inicial de depuração de dados (DD), uma segunda de pré-processamento dos dados (PP), uma terceira de processamento de dados,

ajuste e validação do modelo (PD) e uma quarta de obtenção da temperatura estimada para o período de retorno estabelecido (PT).

Figura 37 – Método de tratamento de dados proposto para a obtenção das temperaturas extremas.



Fonte: Autoria própria (2021).

Como citado anteriormente, o período considerado para atender os 30 anos de coleta de amostras foi de 01/01/1991 a 31/12/2020. Em determinadas situações, onde o período de coleta das estações automáticas não atendeu a amostragem, foram coletadas informações de estações convencionais. Em outros casos, os dados da estação não estavam disponíveis, devido a falha de operação ou do sensor da estação meteorológicas, sendo desprezados esses intervalos e extraídos os valores representativos dos valores válidos.

Para análise estatística foram avaliados alguns programas computacionais, mas os que se destacaram são os que foram desenvolvidos com foco em análise de extremos, com utilização rotineira em estudos de hidrologia.

O Software Hydrognomon é um software livre, desenvolvido para análise de séries temporais pelo Departamento de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Técnica Nacional de Atenas. Segundo Kozanis, Christofides e Efstratiadis (2010), o módulo para análise estatística inclui ferramentas computacionais para a análise de amostragens, análise de funções

de distribuição, previsão estatística, simulação de Monte-Carlo e análise de eventos extremos. A versão disponível que foi empregada é a 4.1.0.26.

Outro software similar é o EasyFit, desenvolvido pela MathWave Technologies, permitindo o ajuste automático ou manual de funções de distribuição aos dados e a seleção do modelo. A versão utilizada foi a 5.6 de outubro de 2015, porém este programa não é um software livre (OBAIDAT; KACPRZYK; ÖREN, 2015).

Assim, optou-se pelo emprego do Software Hydrognomon, após a validação dos resultados com o Software EasyFit, considerando a facilidade de operação e a ausência de custos de aquisição. A limitação na utilização deste software é a transferência de dados que precisa ser feita manualmente, já que não possui um módulo de leitura de dados a partir de um arquivo externo.

Acessando o módulo de Estatística (Phytas) do software Hydrognomon, os dados são lidos e é possível selecionar as funções de distribuição para a verificação do ajuste de modo visual, bem como, através dos testes de ajuste e aceitação das diversas distribuições de probabilidade.

Para a obtenção do valor representativo da variável temperatura para o período de retorno definido, o software apresenta como resposta os resultados para todas as funções disponíveis.

Ainda, através da análise estatística gerada é possível identificar os valores para determinado intervalo de confiança.

Esse procedimento é repetido para cada estação para a obtenção dos valores de temperaturas máximas e mínimas e os valores registrados e organizados junto as informações de geolocalização que são transferidas para os mapas do Brasil para a etapa de construção das isotermas, o que será descrito no próximo item.

3.5 Mapas de temperaturas extremas para o Brasil

O objetivo do emprego de mapas para a consulta dos valores de temperatura é facilitar ao usuário a identificação da localização onde será implantada a obra e os correspondentes valores de temperatura, considerando a homogeneidade da distribuição dos valores na região.

Para a organização destes valores de modo gráfico, a primeira alternativa é a definição de curvas de isovalores de temperatura (isotermas) a partir da interpolação entre as estações mais próximas. Esse procedimento geralmente é resolvido com a

criação de uma malha triangular conectando-se os pontos, para os quais são fornecidas as coordenadas x , y e z , o que permite criar uma superfície de pontos.

No caso de isocurvas de temperatura, serão utilizadas como ponto de localização as informações de latitude e longitude, correspondentes a x e y . A informação correspondente à altitude é substituída pelo valor da temperatura máxima ou mínima calculada, conforme métodos e procedimentos descritos no item 3.4. Definidos os intervalos de referência como, por exemplo, 2º Celsius, a conexão dos pontos gera as curvas.

Coelho (2015), cita mais de doze métodos de interpolação, sendo que os mais utilizados, especialmente na área de geodésia, são: o inverso do quadrado da distância, Krigagem, curvatura mínima e triangulação de Delaunay. No caso de emprego de um programa computacional baseado no Sistema de Informação Geográfica (GIS ou SIG), a seleção do método pode estar disponível para seleção pelo usuário ou pode ser um padrão adotado pelo mesmo. No trabalho, optou-se pelo método de triangulação de Delaunay, tendo em vista sua utilização frequente no desenvolvimento de desenhos de curvas de níveis em topografia e mapas geodésicos.

Atualmente, como alternativa a esta apresentação de curvas, estão sendo empregados mapas com intervalos de cores, como os descritos no item 2.2, que exemplificam mapas de temperatura desenvolvidos na Europa.

Assim, seguindo esta tendência de representação e a fim de facilitar a leitura dos valores pelo usuário, optou-se pela utilização dos mapas com escala de cores mantendo-se sobrepostas as curvas com os valores de curvas de referência.

Para a produção dos mapas temáticos é necessário ter uma base cartográfica e, atualmente, empregar um software GIS. Na consulta destes softwares, foram encontrados diversos, destacando-se o Spring, desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens do INPE e tornado “*open source*” em 2018, e o QGIS, pela sua estabilidade, utilização acadêmica e disponibilidade de material para aprendizagem.

Partindo-se desses critérios, além de considerar os cursos e tutoriais disponíveis, optou-se pela utilização do QGIS, versão 3.16.

Vianna *et al.* (2017) apresentaram estudo sobre os bancos de dados do Estado de Santa Catarina de vários órgãos e identificaram alguns problemas relacionados ao georreferenciamento. Considerando as conclusões do trabalho,

foram observados os cuidados de confirmação das coordenadas das estações utilizadas para que não afetassem os resultados finais dos mapas.

Para início do trabalho no Software QGis, foi necessário a definição do sistema de referência de coordenadas (SRC), tendo-se utilizado o SIRGAS 2000 que é o sistema adotado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e a seleção do arquivo da Base Cartográfica Nacional IBGE 2019, em escala 1:250.000 (shapefile).

Os dados e resultados obtidos foram organizados para a transferência para o Software QGis através de uma planilha eletrônica, tendo em vista a possibilidade de leitura direta dos dados deste modelo. A entrada das informações é organizada em uma nova camada, usando os entes pontos, neste software.

A parte operacional que envolve a manipulação do software pode ser consultada no Livro Explorando O QGIS 3.X, de Corte *et al.* (2020).

Na operação do software QGis, dadas as instruções de geração de curvas e aplicação de mapas de calor, a região em estudo é preenchida com os resultados do processamento dos dados fornecidos da localização e temperatura, conforme descrito inicialmente neste item, e os mapas de temperatura extremas são obtidos seguindo a triangulação selecionada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

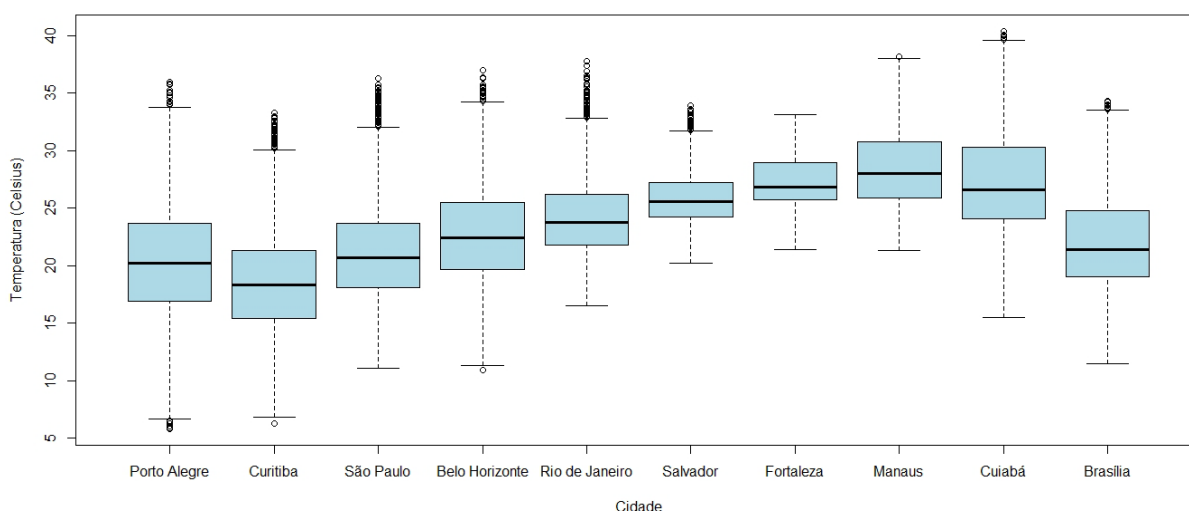
Neste capítulo estão apresentados os resultados da aplicação dos procedimentos descritos no capítulo anterior, procedimentos metodológicos, discutindo-se o processo, bem como analisando-se as etapas e as respostas obtidas.

4.1 Fase preliminar: análise do comportamento das temperaturas

Na análise preliminar, de modo a compreender o comportamento das temperaturas dentro dos critérios de aplicação para a análise das estruturas localizadas no Brasil, em contraste com o apresentado nos estudos europeus e americanos, procurou-se avaliar as variações de temperatura de modo comparativo entre as principais cidades do país, representando as regiões que o compõe.

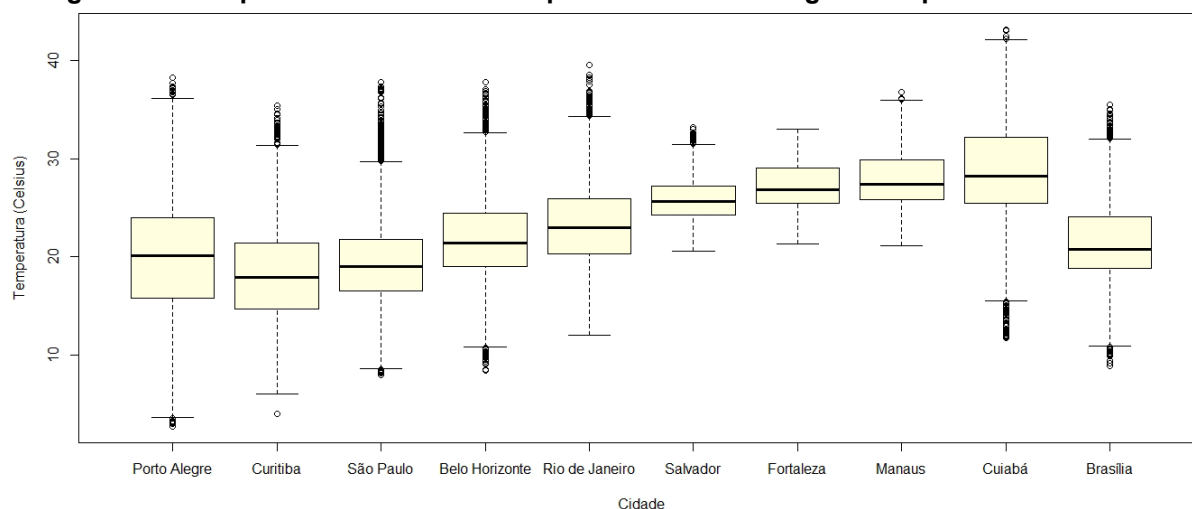
A distribuição de frequência da variável temperatura está resumida no *boxplot* das figuras 38 e 39, obtida através da aplicação do Software R, e que permite identificar as diferenças entre as temperaturas médias e as variações limites destas cidades para dois anos, 2015 e 2020, a fim de confirmar as condições de comportamento em anos diversos.

Figura 38 - Temperaturas em cidades representativas das regiões do país do ano de 2015.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 39 - Temperaturas em cidades representativas das regiões do país do ano de 2020.

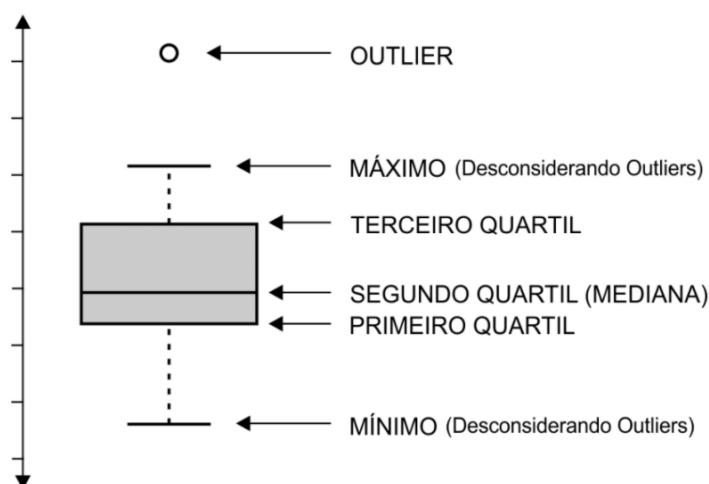


Fonte: Autoria própria (2021).

Para a geração desta análise, foram tomadas todas as temperaturas registradas durante o período de um ano em cada localidade, com dados selecionados no portal do INMET.

Em ambas as figuras é possível se destacar a amplitude das temperaturas das cidades da região nordeste e norte em relação à amplitude das cidades das demais regiões, com valores variando entre 10 e 15 °C para as primeiras, alcançando valores próximos a 40 °C para a cidade de Porto Alegre, como exemplo. Na figura 40 está apresentada a legenda do *boxplot* que auxilia na sua interpretação.

Figura 40 – Legenda do *boxplot*.



Fonte: Autoria própria (2021).

Na representação dos chamados *outliers*, podem ser observadas as presenças das temperaturas extremas em quase todas as cidades. Nesta

representação, estes valores estão considerados quando ultrapassa o limite correspondente à diferença entre o dobro do primeiro quartil e 1,5 vezes o terceiro quartil.

Para análise de semelhança da variável temperatura para estas cidades, foi utilizado inicialmente o teste de Tukey que permite comparações múltiplas com distribuições normais de observações independentes e variância constante dentro do grupo. Na tabela 4 estão apresentados os resultados do valor-p obtido no teste para cada par de cidade, com valores inferiores a 0,05, o que permite concluir que os valores médios das amostras são todos significativamente diferentes.

Tabela 4 – Teste de Tukey. Valores de -p.

	Porto Alegre	Curitiba	São Paulo	Belo Horizonte	Rio de Janeiro	Salvador	Fortaleza	Manaus	Cuiabá	Brasília
Porto Alegre		1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05
Curitiba	59,87		1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05
São Paulo	47,74	12,13		1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05
Belo Horizonte	16,1	43,77	31,64		1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05
Rio de Janeiro	10,87	70,74	58,61	26,97		1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05	1,249E-05
Salvador	57,47	117,3	105,2	73,57	46,6		0,9854	2,608E-05	1,249E-05	1,249E-05
Fortaleza	59,01	118,9	106,8	75,12	48,14	1,548		0,002486	1,249E-05	1,249E-05
Manaus	64,68	124,6	112,4	80,78	53,81	7,216	5,668		1,249E-05	1,249E-05
Cuiabá	80,99	140,9	128,7	97,1	70,13	23,53	21,98	16,31		1,249E-05
Brasília	31,19	28,68	16,55	15,09	42,06	88,65	90,2	95,87	112,2	

Fonte: Autoria própria (2021).

Da mesma forma, através da análise dos valores do intervalo de confiança apresentados na tabela 5, chega-se a mesma conclusão, pois o valor 0 (zero) não está contido nos intervalos, ou seja, cada par de valor contém apenas números positivos ou apenas números negativos.

Tabela 5 – Teste de Tukey. Intervalos de Confiança.

	Porto Alegre	Curitiba	São Paulo	Belo Horizonte	Rio de Janeiro	Salvador	Fortaleza	Manaus	Cuiabá	Brasília
Porto Alegre		3,406; 3,974	2,658; 3,227	0,7082; 1,277	-0,9541; -0,3856	-3,826; -3,258	-3,922; -3,353	-4,271; -3,702	-5,276; -4,708	1,638; 2,207
Curitiba	-3,974; -3,406		-1,032; -0,4633	-2,982; -2,413	-4,644; -4,076	-7,516; -6,948	-7,612; -7,043	-7,961; -7,393	-8,967; -8,398	-2,052; -1,484
São Paulo	-3,227; -2,658	0,4633; 1,032		-2,234; -1,666	-3,897; -3,328	-6,769; -6,2	-6,864; -6,296	-7,214; -6,645	-8,219; -7,651	-1,305; -0,7361
Belo Horizonte	-1,277; -0,7082	2,413; 2,982	1,666; 2,234		-1,947; -1,378	-4,819; -4,25	-4,914; -4,346	-5,263; -4,695	-6,269; -5,7	0,6456; 1,214
Rio de Janeiro	0,3856; 0,9541	4,076; 4,644	3,328; 3,897	1,378; 1,947		-3,156; -2,588	-3,252; -2,683	-3,601; -3,033	-4,607; -4,038	2,308; 2,876
Salvador	3,258; 3,826	6,948; 7,516	6,2; 6,769	4,25; 4,819	2,588; 3,156		-0,3796; 0,1889	-0,729; -0,1605	-1,735; -1,166	5,18; 5,749
Fortaleza	3,353; 3,922	7,043; 7,612	6,296; 6,864	4,346; 4,914	2,683; 3,252	-0,1889; 0,3796		-0,6336; -0,06509	-1,639; -1,071	5,275; 5,844
Manaus	3,702; 4,271	7,393; 7,961	6,645; 7,214	4,695; 5,263	3,033; 3,601	0,1605; 0,729	0,06509; 0,6336		-1,29; -0,7213	5,625; 6,193
Cuiabá	4,708; 5,276	8,398; 8,967	7,651; 8,219	5,7; 6,269	4,038; 4,607	1,166; 1,735	1,071; 1,639	0,7213; 1,29		6,63; 7,199
Brasília	-2,207; -1,638	1,484; 2,052	0,7361; 1,305	-1,214; -0,6456	-2,876; -2,308	-5,749; -5,18	-5,844; -5,275	-6,193; -5,625	-7,199; -6,63	

Fonte: Autoria própria (2021).

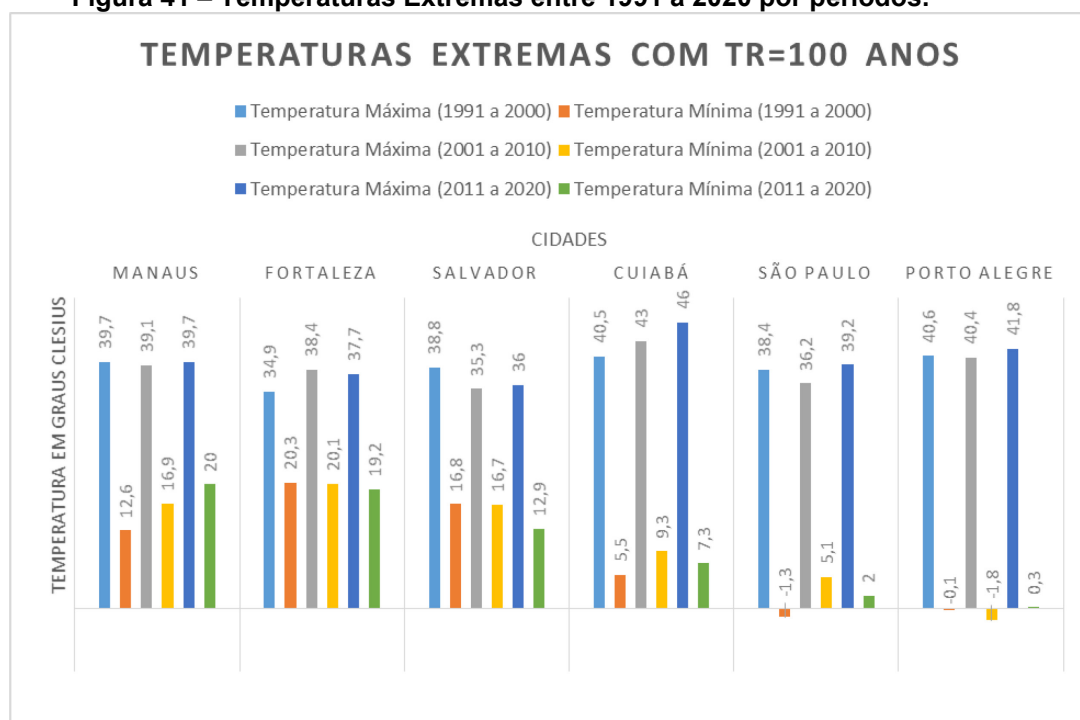
Em relação aos valores representativos das temperaturas máxima e mínima do ar à sombra, como, em geral, não há normalidade em sua distribuição de frequência, o tratamento dos valores exige o emprego de métodos estatísticos de determinação de valores extremos.

Na análise dos valores das temperaturas extremas por período (décadas) com tempo de recorrência de 100 anos, tomando-se seis capitais representativas das regiões do Brasil, conforme indicado na figura 41, ocorreram algumas mudanças de centragem dos valores mínimos.

Para Manaus constata-se a tendência da elevação dos valores mínimos, partindo-se de 12,6°C, para o período de 1991 a 2000, e atingindo 20°C, para o período de 2011 a 2020. Salvador apresentou como hipótese verdadeira na análise de variância para possível redução, porém para uma conclusão precisa seria necessário estender o período de análise. Para as demais cidades, apesar das variações numéricas, a ordenação dos períodos não permite definir uma tendência, apenas destacar as alterações que podem ocorrer nas amplitudes térmicas para o tempo de recorrência de 100 anos, tendo como referência estes períodos de tempo.

Em relação às temperaturas máximas tendo como base estas três décadas, Cuiabá foi a única que apresentou a tendência de progressão no acréscimo das temperaturas. Já para a cidade de Salvador, apesar da redução nos valores dos máximos das décadas mais recentes em relação à década de 1991 a 2000, a análise de variância não permite caracterizar a diferença significativa entre os resultados.

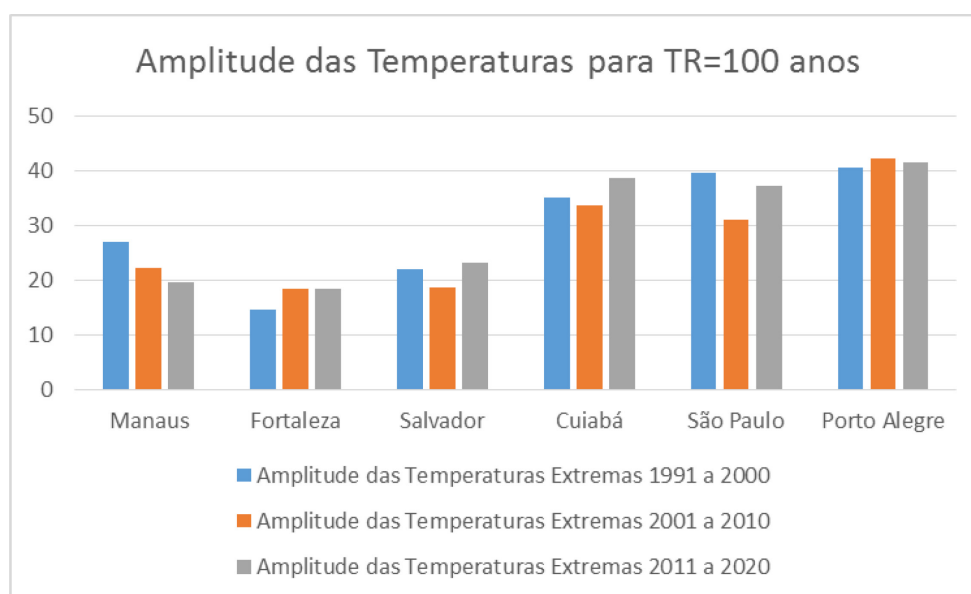
Figura 41 – Temperaturas Extremas entre 1991 a 2020 por períodos.



Fonte: Autoria própria (2021).

Na figura 42 estão apresentados os resultados das amplitudes das temperaturas extremas considerando o tempo de recorrência de 100 anos. Destacam-se as maiores amplitudes à medida que as cidades se localizam mais ao sul do país.

Figura 42 – Amplitude das Temperaturas Extremas entre 1991 a 2020 por períodos.



Fonte: Autoria própria (2021).

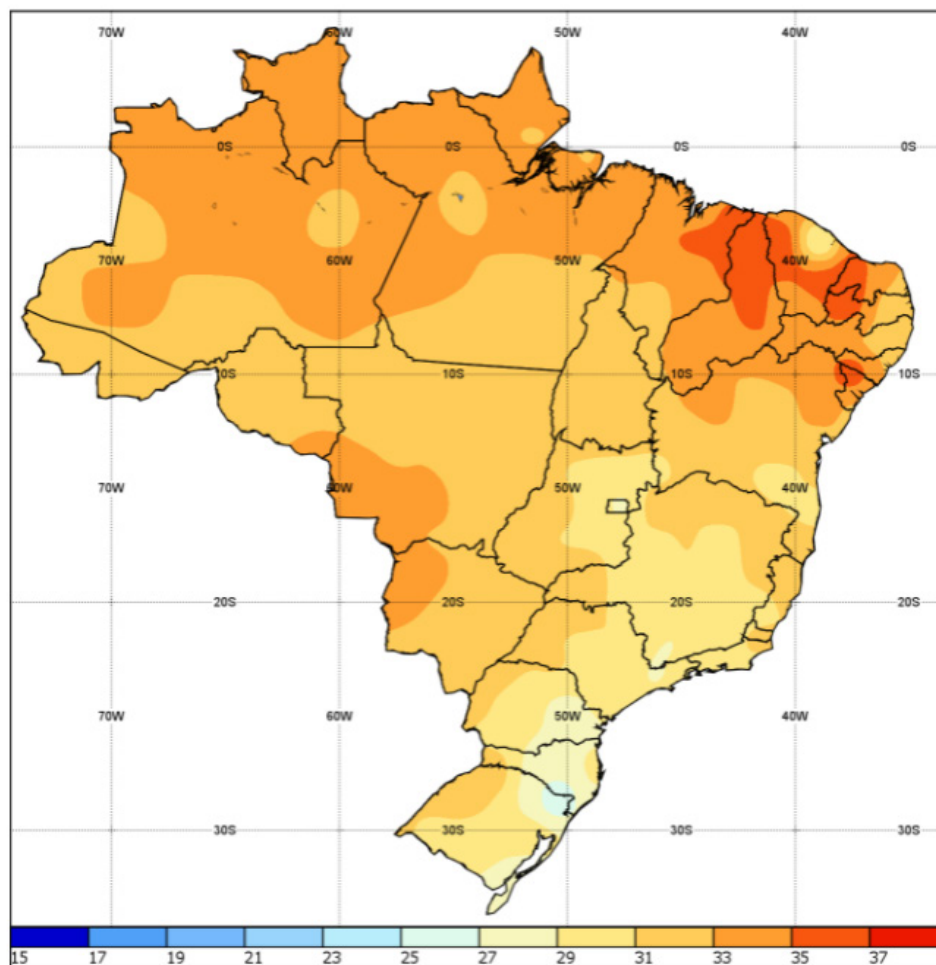
Em que pese a ocorrência de variações nos períodos estudados, do ponto de vista estatístico com análise de variância, apenas a cidade de Manaus, na região Norte, apresentou tendência de redução na amplitude, enquanto as demais cidades apresentaram tendência de manutenção das amplitudes históricas.

Essa análise permite identificar a importância da atualização dos mapas de temperatura periodicamente, de modo que estas tendências possam estar representadas em cada nova edição.

Em relação à mediana, observou-se certa simetria para valores de temperatura, podendo-se entender como uma referência para a adição da temperatura de início do processo (liberação da obra), já que as referências da norma europeia sugerem o valor de 10°C e que não condiz com os climas subtropical e tropical encontrados em grande parte do Brasil.

O INMET disponibiliza os mapas de normais climatológicas onde são apresentados os valores das temperaturas médias e as médias de temperaturas mínimas e máximas, considerando o período de 1961 a 1990, representados nas

Figura 44 - Temperaturas máximas em dezembro do Brasil, no período de 1981 a 2010.

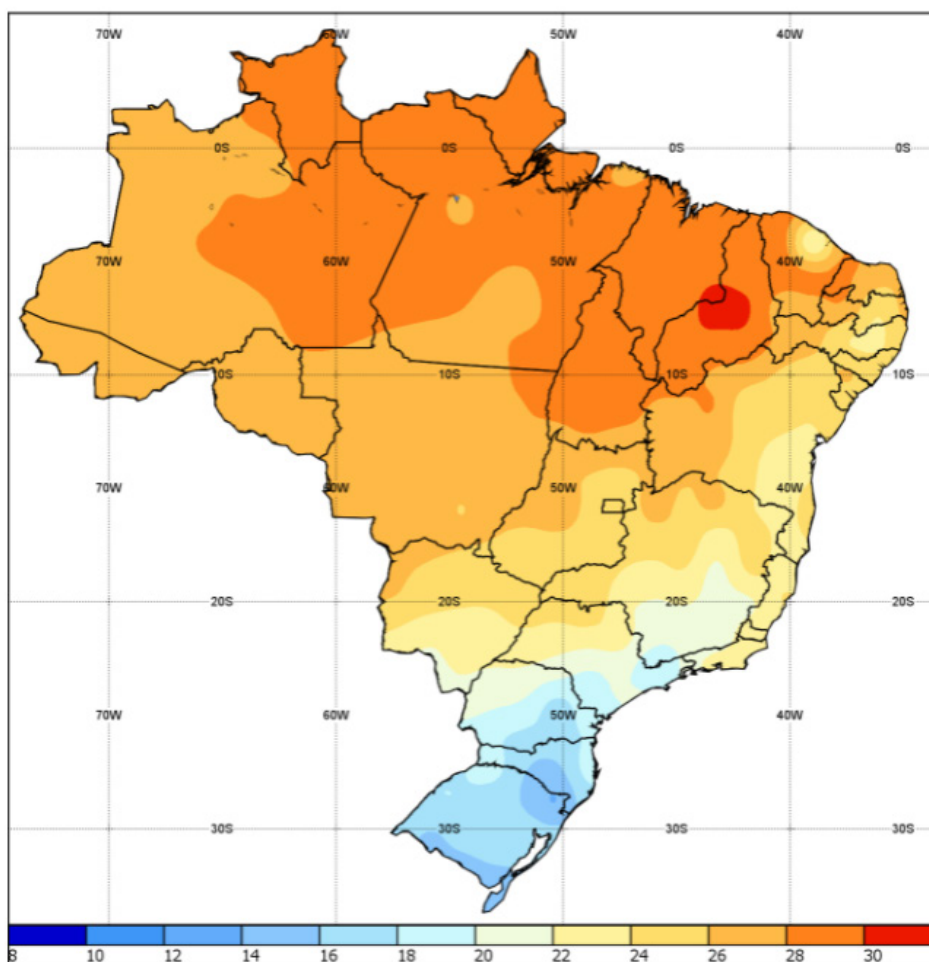


Fonte: INMET (2021).

Para as temperaturas médias máximas, conforme figura 44, o valor na região sul corresponde a um intervalo de 29°C a 33°C, enquanto nas regiões norte e nordeste estão na faixa de 33°C a 37°C.

Já, considerando as temperaturas médias anuais, pode ser observado na figura 45 que as temperaturas no sul estão entre 14°C e 20°C e no norte e nordeste estão entre 26°C e 30°C. Na ausência de medições locais, os valores disponíveis nestes mapas podem ser tomados como referência para o valor da temperatura inicial, ou seja, o valor a partir dos quais são consideradas as variações que provocam os encurtamentos e alongamentos.

Figura 45 - Temperaturas médias anuais do Brasil, no período de 1981 a 2010.




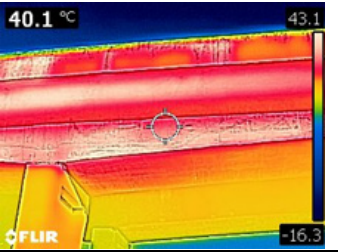

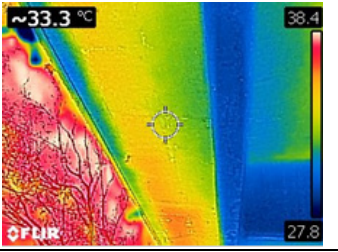

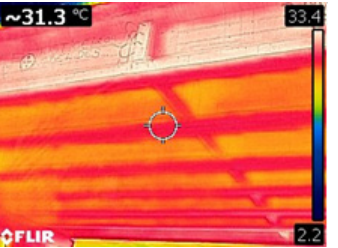
Fonte: INMET (2021).

Dentro deste aspecto, é possível considerar que a condição de um possível equilíbrio entre a temperatura do ar à sombra e da temperatura efetiva da estrutura possa ocorrer nos locais onde a variação destas é menor.

Para ilustrar este efeito, foram efetuadas medições de temperatura em estruturas em algumas cidades de diferentes regiões do país. No quadro 2 estão registradas as temperaturas medidas nas estruturas, obtidas por meio da termografia, e as temperaturas ambientes no horário da medição. Apesar da margem de erro da medição, que afeta a análise quantitativa, do ponto de vista de análise qualitativa o levantamento forneceu subsídios para o entendimento das dispersões nos valores e a compreensão sobre a temperatura efetiva das estruturas. Na coluna da temperatura do elemento está indicado o valor no ponto de foco da câmera e, entre parênteses, o valor da variação registrada na escala de cores para o elemento.




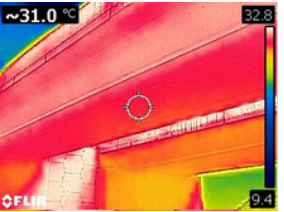

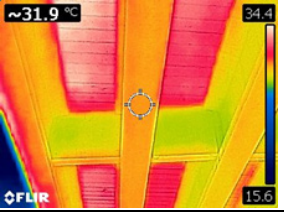

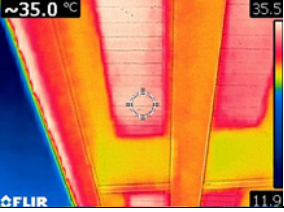
Quadro 2 - Medições de temperatura em estruturas.

(continua)

Obra	Imagem da obra	Imagem térmica	Temperatura do ar °C	Temperatura do elemento °C	Data	Hora de Brasília
Ponte 1 BR101-BA			32,9	40,1 (a 36,5)	09/12/2016	17:36
Ponte 2 BR101-BA			32,7	33,3 (a 27,8)	11/12/2016	14:27
Viaduto BR116-CE			30,1	31,3 (a 25,0)	22/05/2018	14:01


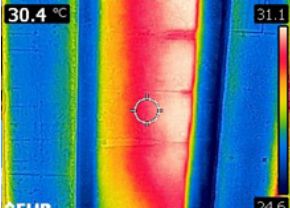

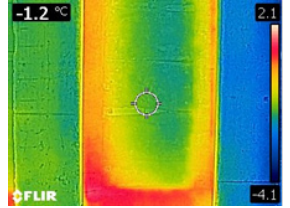
Quadro 2 - Medições de temperatura em estruturas.

(continuação)

Obra	Imagem da obra	Imagem térmica	Temperatura do ar °C	Temperatura do elemento °C	Data	Hora de Brasília
ETA Paranaguá			27,9	26,7 (a 23,1)	26/10/2017	18:23
Viaduto 1 BR364-RO			31,3	31,0	01/05/2018	18:53
Viaduto 2 sobre BR364-RO			31,3	31,9 (a 34,4)	01/05/2018	19:01
Viaduto 2 sobre BR364-RO			31,3	35,0 (29,5)	01/05/2018	19:01

Quadro 2 - Medições de temperatura em estruturas.

(conclusão)

Obra	Imagem da obra	Imagem térmica	Temperatura do ar °C	Temperatura do elemento °C	Data	Hora de Brasília
Viaduto de acesso à PR415			27,9	30,4 (24,6)	10/04/2021	15:53
Viaduto de acesso à PR415			-0,8	-1,2 (2,1)	30/06/2021	07:52

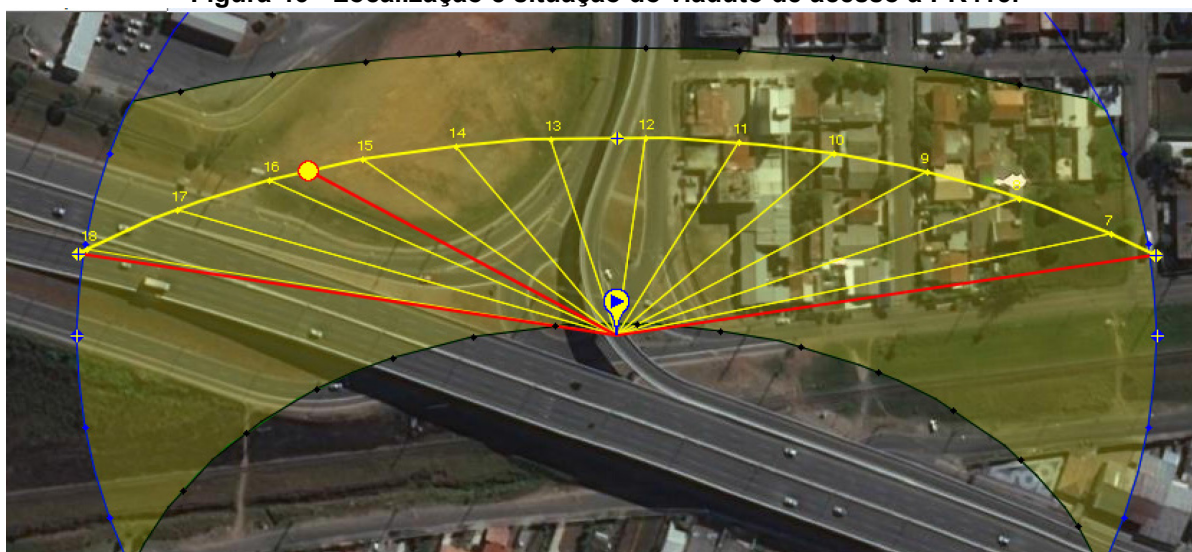
Fonte: Autoria própria (2021).

Com amplitudes de temperatura maiores ao longo do dia, a distribuição das temperaturas entre as peças que compõem a estrutura se diferenciam com mais destaque nas estruturas de regiões onde as amplitudes térmicas são inferiores. Destaca-se, como exemplo comparativo com as demais estruturas, a estrutura do viaduto de acesso a PR415, localizado na região metropolitana do município de Curitiba/PR, que enfrentou uma amplitude maior de valores em um prazo de tempo relativamente curto, dois meses e meio, aproximadamente. A ocorrência de uma amplitude deste nível tem uma probabilidade quase nula de acontecer nas obras do norte e nordeste, como constatado nos valores de temperatura mínima e máxima constantes das figuras 38, 39, 41 e 43.

No sentido de esclarecer o comportamento da variação das temperaturas ao longo do dia e entre as partes da estrutura, manteve-se o monitoramento do viaduto de acesso à PR415 por períodos sazonais de dois dias, observando-se dias de valores elevados de temperatura do ar e de valores considerados baixos para a região onde a estrutura se insere.

Para a compreensão dos resultados obtidos desta estrutura, na figura 46 está apresentada a localização da obra, tendo a posição norte localizada na direção vertical e em sentido superior da imagem, bem como, a descrição do caminho do sol para o dia exemplificado e as faixas de transição do sol ao longo do ano descrito com a sombra amarela.

Figura 46 - Localização e situação do viaduto de acesso a PR415.



Fonte: Sunearthtools (2021).

A descrição do caminho do sol pode ser obtida por softwares de análise de eficiência energética e arquitetura ou por aplicativos de acesso livres na internet, como o Sunearthtools que foi utilizado para produção desta imagem.

O viaduto possui três longarinas pré-moldadas e lajes maciças produzidas com sistema de pré-lajes apoiadas sobre estas longarinas. A seleção considerou a orientação da estrutura principal com faces laterais orientadas para leste e oeste que possibilitou o acompanhamento de variações de temperatura por efeito do sol atuando diretamente sobre as duas faces. Na fotografia 4 e 5 está visível a morfologia descrita.

Fotografia 4 – Vista lateral do viaduto de acesso a PR451.



Fonte: Aatoria própria (2021).

Na fotografia 5, destacam-se as posições das longarinas, a região de apoio e a transversina de vão. As medições foram realizadas na região ao lado desta transversina para os diversos elementos que compõem a seção transversal, fixando-se os pontos de coleta das imagens térmicas, a distância e a emissividade.

As medições foram realizadas sempre na parte central das longarinas laterais, a leste e a oeste, e no fundo da laje na posição central do segundo vão. Também foi registrada a temperatura do ar à sombra fornecida pelos registros do INMET para cada horário.

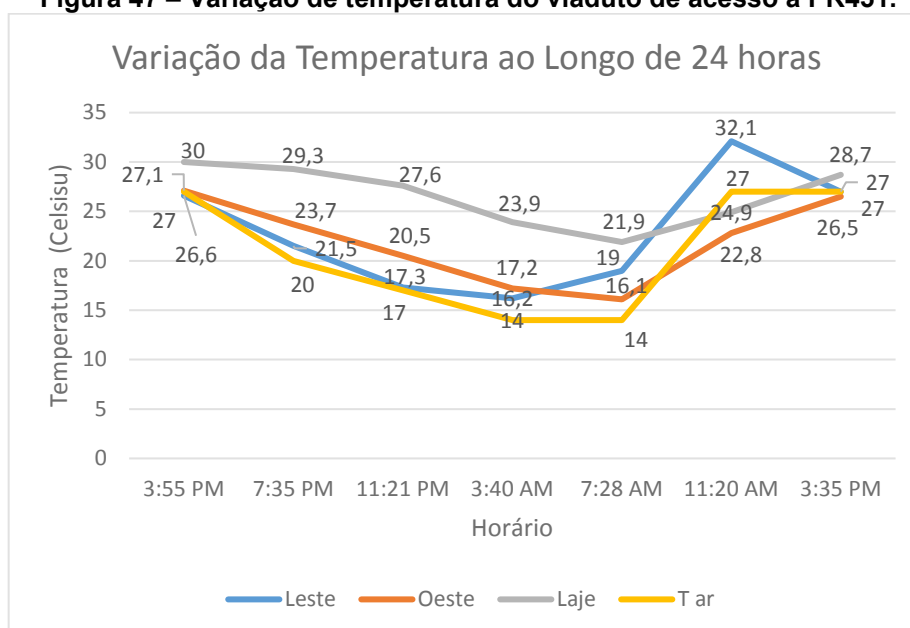
Fotografia 5 – Vista inferior da estrutura do viaduto de acesso a PR451.



Fonte: Autoria própria (2021).

Na figura 47 estão apresentados os resultados do monitoramento do dia 09/04/2021, a partir das 15h55, até o dia 10/04/2021 as 15h35. Foram efetuadas medidas de quatro em quatro horas, aproximadamente, utilizando a câmera térmica descrita no item 3.3.

Figura 47 – Variação de temperatura do viaduto de acesso a PR451.



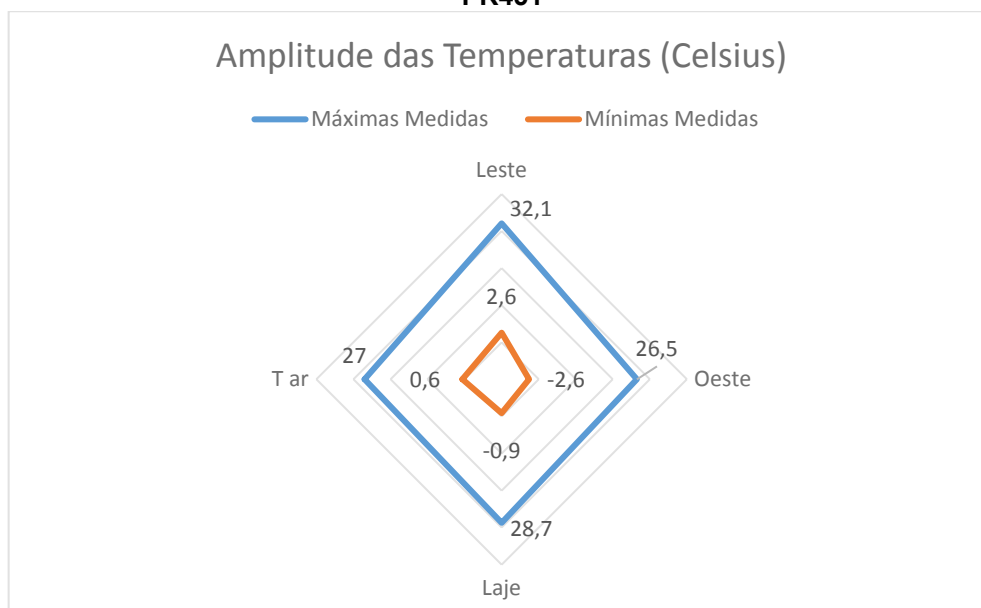
Fonte: Autoria própria (2021).

Comparando-se a temperatura do ar com as temperaturas dos elementos estruturais observa-se que a temperatura da estrutura tende a acompanhar as variações da temperatura do ar, porém com valores mais próximos para a longarina da face leste no período da tarde e noite. Neste período, a longarina da face oeste apresenta valores superiores tendo-se como provável razão o acúmulo de energia calorífica durante o período que ficou exposto a radiação solar direta, demonstrando também a inércia térmica do sistema. No período da manhã o processo inverte-se, com a exposição direta do lado leste da obra, tendo-se reflexo em valores superiores da longarina presente nesta face. A laje, como elemento praticamente plano horizontal, com a superfície superior exposta a radiação solar em boa parte do dia e revestimento em concreto betuminoso, apresenta uma provável absorção e acúmulo de energia superior aos demais elementos, demonstrando menores variações de temperatura ao longo das vinte e quatro horas, apesar de apresentar a superfície inferior em contato com o ar que permite maior troca de calor.

Dos valores registrados, também se confirmam as orientações dadas por Roeder (2002) em relação à complexidade de obtenção de valores representativos das temperaturas uniformes, para os quais seriam necessários monitoramentos dos deslocamentos de expansão e contração linear. Para isso, seria necessário um monitoramento por um período de alguns anos, utilizando sensores de deformações (*strain gages*) em vários elementos, acompanhados do registro das temperaturas nas seções dos elementos, a fim de se proceder a integração numérica proposta por Roeder (2002), conforme a equação 46. Como não se trata de resultado vinculado a proposta e objetivos do presente estudo, não foram realizadas estas análises.

Ainda, durante o período de monitoramento desta obra, tomando-se os dias de máxima e mínima temperatura do ar à sombra, foi possível traçar o diagrama comparativo entre estes valores e os encontrados nas longarinas face oeste e face leste, bem como na laje, onde se percebe a amplitude de valores para cada um destes elementos, conforme figura 48. Destacam-se as temperaturas ligeiramente superiores da face leste em relação aos demais elementos, tanto na temperatura máxima como na mínima. Em relação à amplitude, enquanto a temperatura do ar à sombra ficou em 26,4°C, as dos elementos da estrutura variaram de 29,1°C a 29,6°C, portanto em torno de 3°C superiores nos pontos de medição.

Figura 48 – Temperaturas máximas e mínimas no período de monitoramento do viaduto da PR451



Fonte: Autoria própria (2021).

As variações observadas não estão atendidas pelos critérios que estão apresentados no Eurocode 1991-1-5 (CEN, 2009) e que foram descritos no item 2.2. Assim, é necessário prever uma adequação ao critério para a determinação da temperatura efetiva que considere a inércia térmica e os valores das temperaturas do ar à sombra extremas de cada local.

Partindo-se da recomendação do Eurocode 1991-1-5 (CEN, 2009) e considerando que a temperatura inferior na maior parte do Brasil está acima de zero graus Celsius, será necessário interpolar os valores para o intervalo entre 0°C e 30°C para as estruturas de pontes em concreto armado, podendo-se atribuir a definição da temperatura efetiva a partir do seguinte critério:

$$\begin{cases} T_e = 0,8.T + 8 \text{ } ^\circ\text{C} & \text{para } -5^\circ\text{C} \leq T < 30^\circ\text{C} \\ T_e = T + 2^\circ\text{C} & \text{para } 30^\circ\text{C} \leq T < 50^\circ\text{C} \end{cases} \quad (45)$$

Deste modo, valores de T_e, min para T_{min} do ar igual a 0°C, seguem o valor proposto pelo Eurocode, apresentando uma transição de valores entre 0°C e 30°C, onde novamente o critério proposto por esta normativa são mantidos.

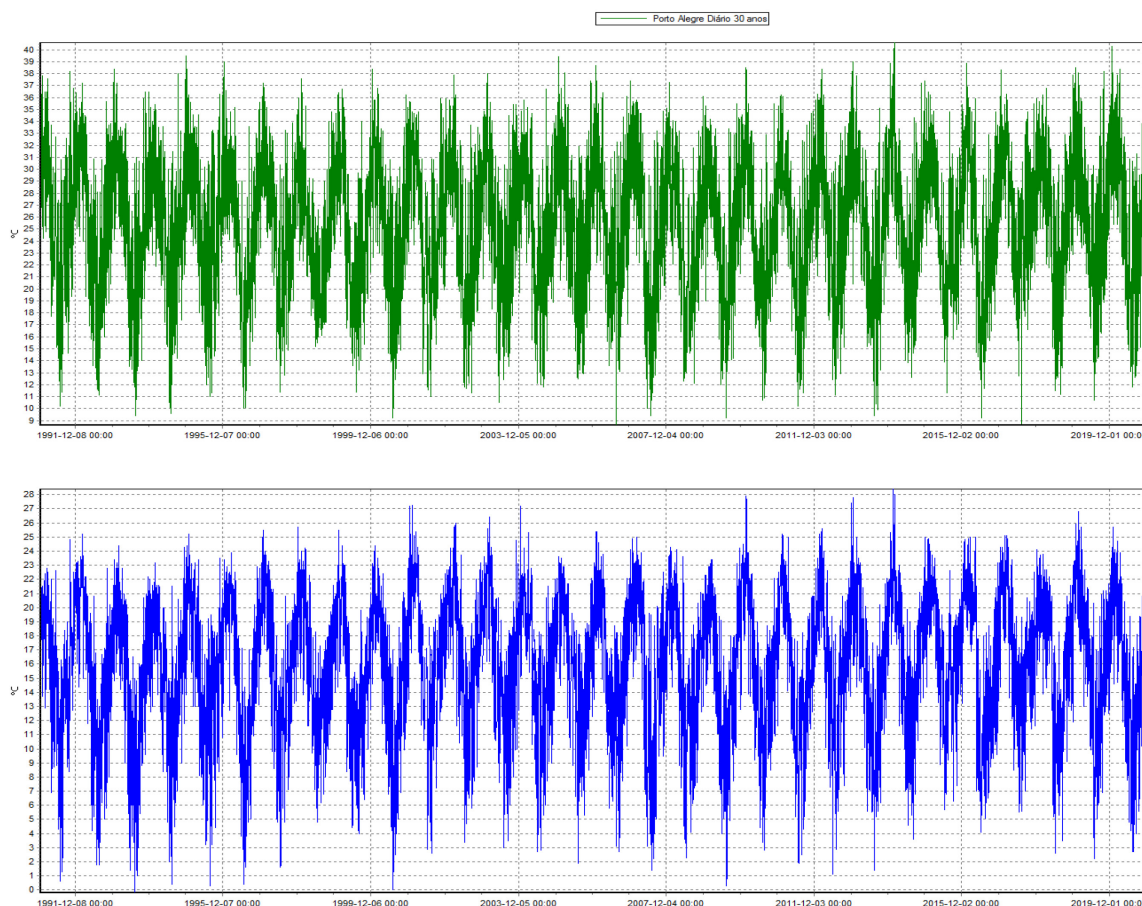
No próximo item serão apresentados os procedimentos para a obtenção dos valores representativos das temperaturas máximas e mínimas do ar, considerando a análise de eventos extremos e os dados obtidos junto ao INMET.

4.2 Temperaturas máximas e mínimas

Para a obtenção dos valores das temperaturas máximas do ar à sombra que serão utilizados para a obtenção das temperaturas efetivas, conforme descrito em 3.4, os valores das temperaturas máximas registrados no local deverão receber tratamento de acordo com o método proposto no item 3.4, figura 37.

Na figura 49 está apresentado o histórico das temperaturas, com todos os valores de leituras de temperatura do período em estudo, ou seja, 30 anos contados a partir de janeiro de 1991 a dezembro de 2020, com valores máximos e mínimos diários. Neste exemplo, estão apresentados os registros organizados da estação A801, localizada em Porto Alegre, onde é possível se observar os ciclos de temperaturas de intensidade menor e maior que afetam tanto os valores de máximos, quanto os valores de mínimos diários.

Figura 49 – Gráfico com série de leituras diárias de temperatura do período de estudo da estação A801 – Porto Alegre/RS.



Fonte: Autoria própria (2021).

Os registros deste exemplo destacam temperaturas com valores mínimos da ordem de 0°C e valores máximos atingindo a 40°C.

Na figura 50, está a parcela inicial dos dados correspondentes as informações das temperaturas máximas e mínimas diárias que foram selecionados do arquivo recebido do INMET para cada estação, como ilustração da organização destes.

Figura 50 – Organização dos dados de temperaturas máximas e mínimas diárias fornecidos pelo INMET.

Nome: PORTO ALEGRE Codigo Estacao: A801 Latitude: -30.05361111 Longitude: -51.17472221 Altitude: 41.18	Dados para Localização de Valores	
Situacao: Operante Periodicidade da Medicao: Diaria		
Data Medicao		
01/01/1991 a 31/12/2020	TEMPERATURA MAXIMA, DIARIA (AUT_MAN)(Â°C)	TEMPERATURA MINIMA, DIARIA (AUT_MAN)(Â°C)
01/01/1991	31,6	17,7
02/01/1991	32,3	19
03/01/1991	27,3	21,4
04/01/1991	27	17,4
05/01/1991	27,9	17,4
06/01/1991	30,7	18
07/01/1991	32,8	18,1
08/01/1991	34,5	20,3
09/01/1991	36,3	20,5
10/01/1991	30,4	21,4
11/01/1991	27,6	19,4
12/01/1991	26,8	17,9
13/01/1991	28	19,2

Fonte: Autoria própria (2021).

No pré-processamento dos dados foram utilizadas funções de rastreamento de máximos e mínimos dentro dos períodos anuais, separando-se, assim, os valores representativos destas temperaturas, conforme pode ser observado na Tabela 6, onde estão apresentados os resultados obtidos da análise da estação A801, organizados em ordem crescente de anos.

Os valores da tabela já apresentam um indicativo da variabilidade das temperaturas máximas e mínimas registradas ao longo dos 30 anos.

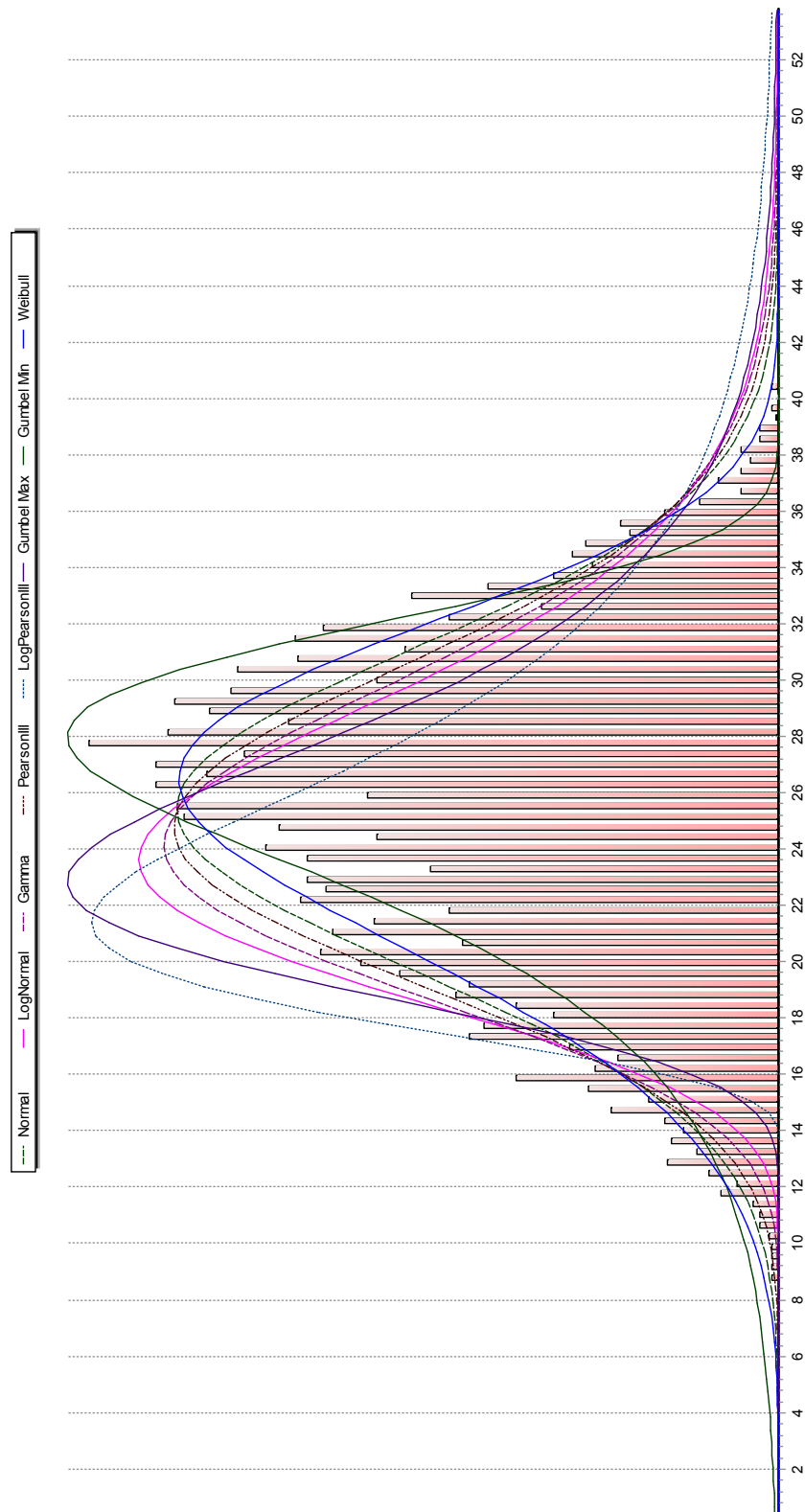
Tabela 6 – Valores de temperaturas máximas e mínimas anuais – Estação A801.

Dados a Enviar para Análise Estatística		
Ano	Tmax °C	Tmin °C
1991	38,2	0,6
1992	38,4	1,8
1993	37,2	-0,2
1994	39,5	0,4
1995	39	0,3
1996	36,6	0,4
1997	37,2	1,6
1998	37,6	4,8
1999	38,4	4
2000	36,8	0
2001	35,9	2,6
2002	37,9	3,4
2003	38	3
2004	36,7	2,7
2005	39,4	1,9
2006	38,7	2,7
2007	35,8	1,4
2008	37,3	2,3
2009	35,5	0,3
2010	38,5	2,8
2011	36,2	1,9
2012	39	1,1
2013	38,9	1,4
2014	40,6	3,6
2015	36,5	5,7
2016	38,9	4,1
2017	36,3	5,5
2018	37,9	2,6
2019	40,3	2,2
2020	38,4	2,7

Fonte: Autoria própria (2021).

Do ponto de vista de análise do fenômeno, a organização dos dados do período através de um histograma permite concluir que, para o conjunto de informações, o comportamento da amostra tem um comportamento que pode ser ajustado a uma distribuição normal e outras funções de distribuição próximas, com melhor aproximação para as funções de densidade de probabilidade de Weibull e Gumbell, conforme pode ser observado na Figura 51.

Figura 51 – Histograma e funções de densidade probabilidade da amostra das temperaturas.

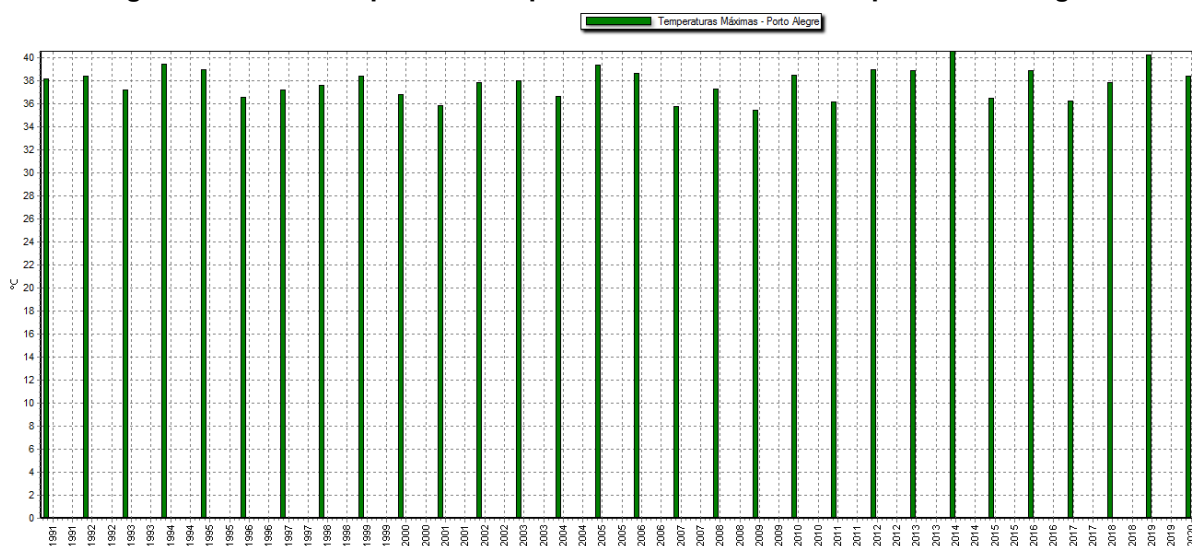


Fonte: Autoria própria (2021).

Mas, analisando os valores extremos da curva, a representação do conjunto através de funções teria pouca aderência aos valores efetivamente registrados, como pode ser verificado na figura 51 pelo afastamento das linhas dos valores representados no histograma, indicando que o estudo tem que ser desenvolvido a partir do modelo de análise de extremos.

Assim, o estudo deve ser tomado, portanto, utilizando os dados que representam a temperatura máxima ou mínima para a unidade de tempo de referência para a recorrência, isto é, anos. Da amostra total de 7.408 dados, foram separados os valores de máximos e mínimos por ano, ficando assim a amostra reduzida a 30 valores, conforme a tabela 6, do exemplo, e a distribuição das figuras 51 e 52, respectivamente.

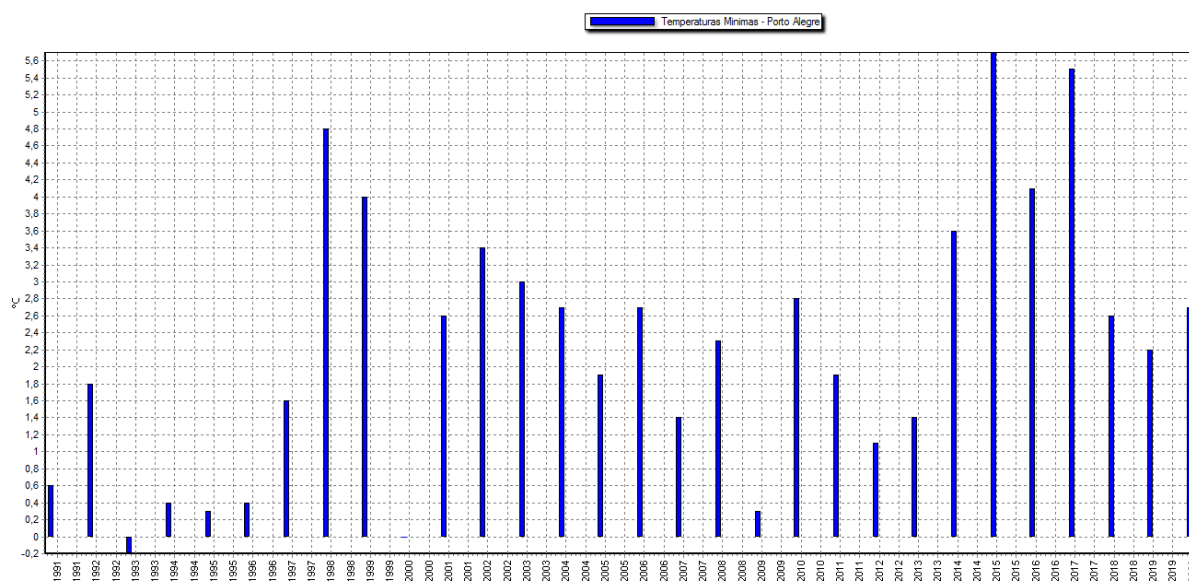
Figura 52 – Série temporal de temperaturas máximas anuais para Porto Alegre.



Fonte: Autoria própria (2021).

Na figura 52, os valores das temperaturas máximas apresentam variação entre 35,5°C e 40,6°C, enquanto para os valores das temperaturas mínimas, figura 53, tem-se os -0,2°C e +5,7°C, caracterizando intervalos de 5°C a 6°C, aproximadamente, para o período de 30 anos considerado.

Figura 53 - Série temporal de temperaturas mínimas anuais para Porto Alegre.

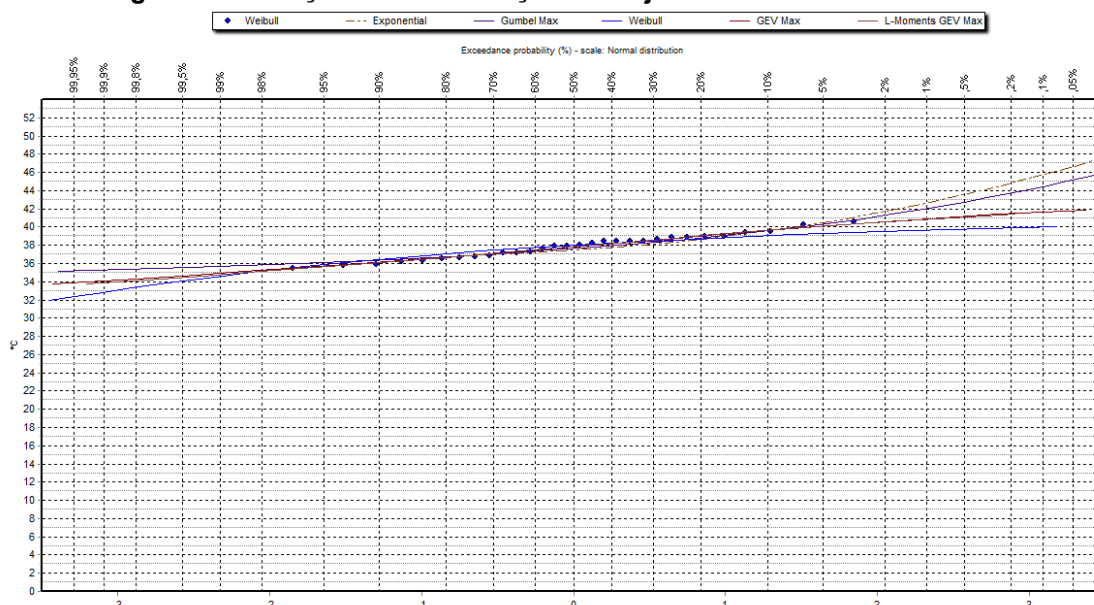


Fonte: Autoria própria (2021).

Por meio do módulo de Estatística (Phytas) do programa Hydrognomon, os dados lidos são processados, tendo-se como os resultados iniciais as curvas das funções de ajuste, como os da figura 54. Os pontos apresentados correspondem a distribuição empírica de Weibull e as linhas correspondem as funções de distribuição selecionadas para os ajustes, conforme apresentado nos estudos preliminares. Nas ordenadas são apresentadas as temperaturas em °C e nas abcissas estão apresentadas as distribuições de probabilidade com a escala da distribuição normal.

A escala do gráfico pode ser alterada para apresentar nas abcissas os períodos de retorno em anos para os valores de máximo ou mínimo, conforme exemplificado na figura 55. Nesta figura, foram selecionadas apenas as distribuições que tiveram melhor ajuste para tendência de máxima. Considerando o tempo de recorrência de 100 anos, por meio das curvas das funções que estão agrupadas, se obtém o valor aproximado de 43°C para a temperatura máxima.

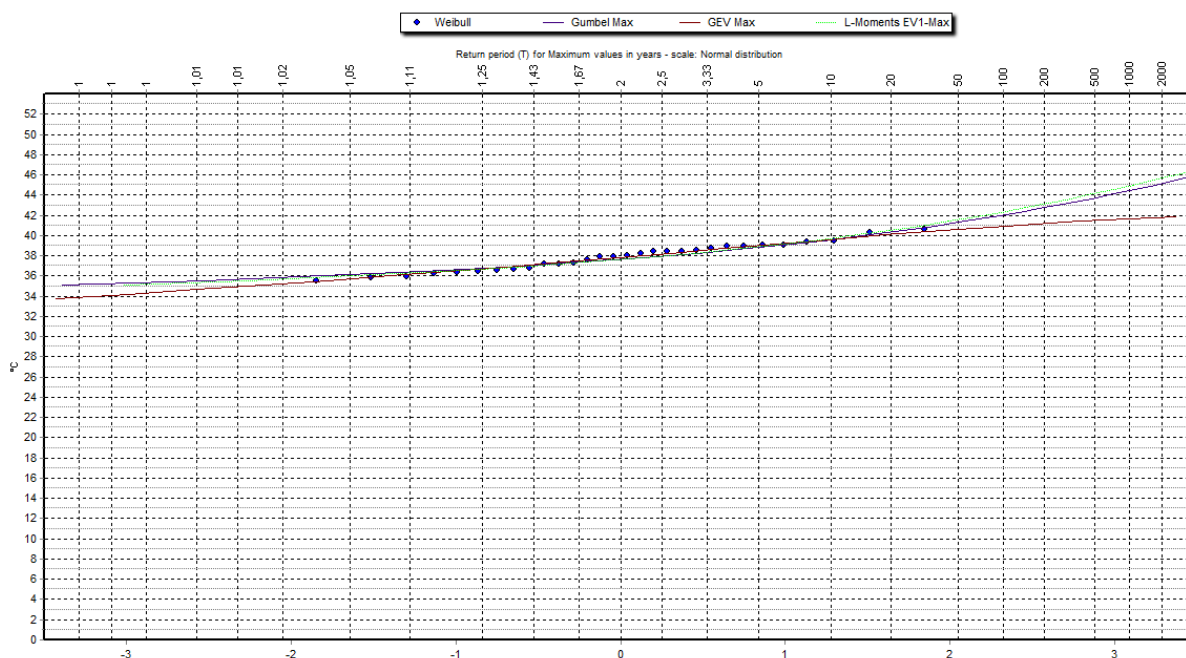
Figura 54 – Funções de distribuição com ajustes aos dados fornecidos.



Fonte: Autoria própria (2021).

Neste gráfico também é possível confirmar a pequena variação nos valores de temperatura entre o tempo de retorno de 100 anos e o de 200 anos, da ordem de 1°C.

Figura 55 – Período de retorno (em anos) versus temperatura máxima (°C).



Fonte: Autoria própria (2021).

Os resultados do cálculo do módulo de desvio máximo observado (D_{obs}) estão apresentados na figura 56, conforme a equação 44 do teste de Kolmogorov-Smirnov

utilizado na validação das funções de ajustes de extremos. A aceitação de maior percentagem correspondente ao menor valor do desvio, D.

Portanto, na comparação dos resultados, várias distribuições atendem os critérios, sendo necessária a seleção pelas percentagens mais altas, complementada por meio da análise visual, a fim de selecionar a curva de melhor tendência e de modo a não se tomarem valores não representativos da previsão.

Para a situação exemplificada, as Funções Generalizadas de Eventos, GEV máx e GEV mín, apresentaram a melhor resposta através deste critério.

Figura 56 – Resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov para o exemplo.

Distribution functions plots	Histogram - Density functions plots			Parameter values - Forecasts	
Kolmogorov-Smirnov test for: All data	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97,9617%	0,07866
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98,7906%	0,07456
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96,3685%	0,08406
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96,8543%	0,08261
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	17,9222%	0,19318
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	18,6743%	0,19146
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97,9617%	0,07866
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97,9617%	0,07866
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96,4485%	0,08383
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	55,9274%	0,13707
EV2-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	49,9251%	0,14388
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	83,3293%	0,10633
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	51,5008%	0,14206
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97,6325%	0,07996
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98,6587%	0,07533
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96,0008%	0,08507
GEV-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99,2450%	0,07135
GEV-Min (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	99,4487%	0,06942
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	60,4893%	0,13205
EV2-Max (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	53,5100%	0,13977
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	89,5559%	0,09768
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93,1813%	0,09142
Pareto (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	93,2697%	0,09125
GEV-Max (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	25,0769%	0,17864
GEV-Min (kappa specified)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	96,6813%	0,08314
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	28,1902%	0,17328
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98,3644%	0,07685

Fonte: Autoria própria (2021).

Apesar destes resultados, como se trata da temperatura máxima no exemplo, considera-se a seleção da função representativa dos valores de máximo.

Na figura 57, têm-se os resultados da previsão da temperatura para o período de retorno selecionado, em anos, de acordo com as funções disponíveis.

Figura 57 – Valores das temperaturas máximas para as funções de acordo com o período de retorno selecionado.

All data - T(Max) = 100,000 y	Value
Normal	40,9509
Normal (L-Moments)	41,0373
LogNormal	41,0547
Galton	41,0270
Exponential	42,6537
Exponential (L-Moments)	43,4210
Gamma	40,9509
Pearson III	40,9509
Log Pearson III	41,0559
EV1-Max (Gumbel)	42,0315
EV2-Max	42,1560
EV1-Min (Gumbel)	40,0389
EV3-Min (Weibull)	39,6489
GEV-Max	40,9302
GEV-Min	40,9287
Pareto	40,2339
GEV-Max (L-Moments)	40,8869
GEV-Min (L-Moments)	40,9418
EV1-Max (Gumbel, L-Moments)	42,3350
EV2-Max (L-Moments)	42,5302
EV1-Min (Gumbel, L-Moments)	40,1977
EV3-Min (Weibull, L-Moments)	40,2687
Pareto (L-Moments)	40,1228
GEV-Max (kappa specified)	42,6266
GEV-Min (kappa specified)	40,4867
GEV-Max (kappa specified, L-Moments)	43,4361
GEV-Min (kappa specified, L-Moments)	40,5720

Fonte: Autoria própria (2021).

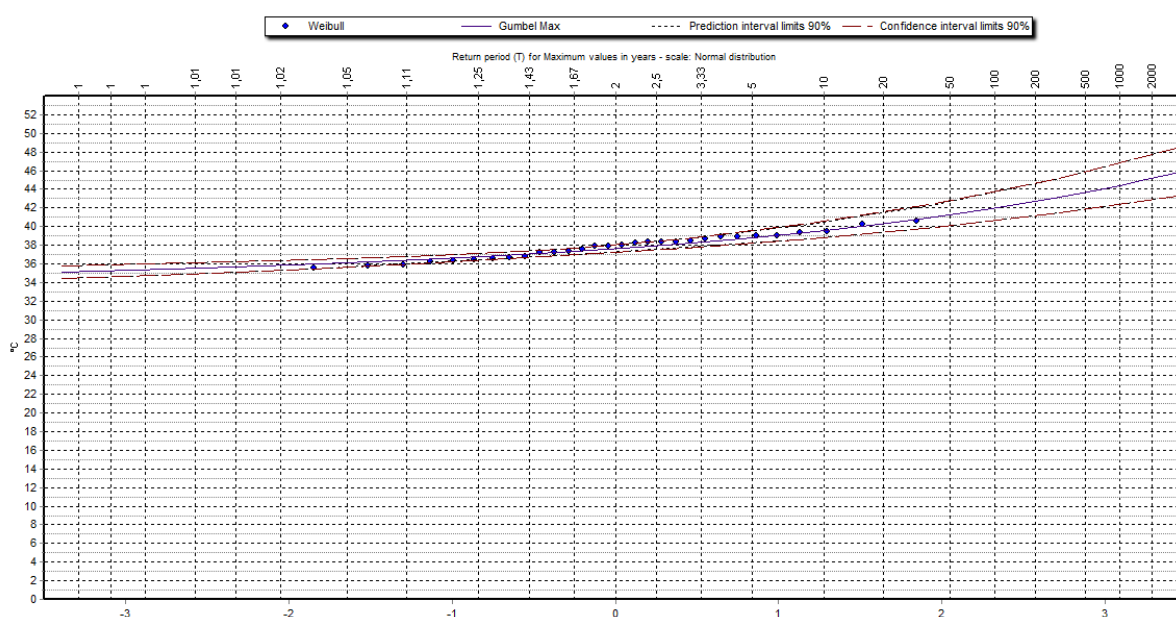
Das funções selecionadas conforme o ajuste, a Função Exponencial, a Função Gumbel de Máximo, a Função Generalizada de Eventos (GEV –Máx) e a Função de Eventos Deslocada (EV2 –Máx), resultaram valores que variam de 40,9 a

42,7, se considerado arredondamento matemático, demonstrando que a variação dos valores a serem assumidos para a aplicação na produção dos mapas tem como recomendação a seleção da função por meio do melhor ajuste.

Como comentado na análise dos ajustes do período de retorno, para atender o modelo utilizado na normalização brasileira para os Estados Limites de Projeto, se for utilizado 117 anos, estes mesmos valores estariam no intervalo de 42,3°C e 42,9°C, podendo-se manter a referência de 100 anos para fins de emprego na normalização.

Ainda, por meio da simulação de Monte Carlo, são gerados os valores para determinado intervalo de confiança. Em eventos extremos, segundo JCSS (2015), o valor usual é de 90%. Na figura 58 estão apresentados os resultados tomando-se como referência a função de distribuição Gumbel de Máximo, onde para tempo de recorrência de 100 anos têm-se valores estimados entre 40,8°C e 43,8°C.

Figura 58 – Valores das temperaturas máximas para o intervalo de confiança de 90%.



Fonte: Autoria própria (2021).

Esse procedimento é repetido para cada estação para a obtenção dos valores de temperatura mínima.

Na figura 59 estão apresentadas as funções de melhor aderência aos dados fornecidos, sendo observado que a Função Generalizada de Eventos (GEV Min)

apresentou o valor mais adequado, considerando as funções de extremos e o desvio D, tendo alcançado o valor de 97,95% na aproximação.

Figura 59 - Período de retorno (em anos) versus temperatura mínima (°C).

Kolmogorov-Smirnov test for:All data	a=1%	a=5%	a=10%	Attained a	DMax
Normal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97,3409%	0,08101
Normal (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	98,2224%	0,07752
LogNormal	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	19,2860%	0,19010
Galton	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	95,1820%	0,08714
Exponential	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	40,4519%	0,15547
Exponential (L-Moments)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	41,9032%	0,15360
Gamma	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	46,3846%	0,14806
Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	95,5929%	0,08613
Log Pearson III	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	18,0769%	0,19282
EV1-Max (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	74,2376%	0,11705
EV2-Max	REJECT	REJECT	REJECT	%	0,93548
EV1-Min (Gumbel)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	64,8955%	0,12727
EV3-Min (Weibull)	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	64,8526%	0,12731
GEV-Max	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	95,2835%	0,08689
GEV-Min	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97,9454%	0,07873
Pareto	ACCEPT	ACCEPT	ACCEPT	97,7968%	0,07933

Fonte: Autoria própria (2021).

Os resultados de temperatura para o tempo de recorrência de 100 anos estão apresentados na figura 60, onde se tem $-0,7^{\circ}\text{C}$, segundo a função GEV Min.

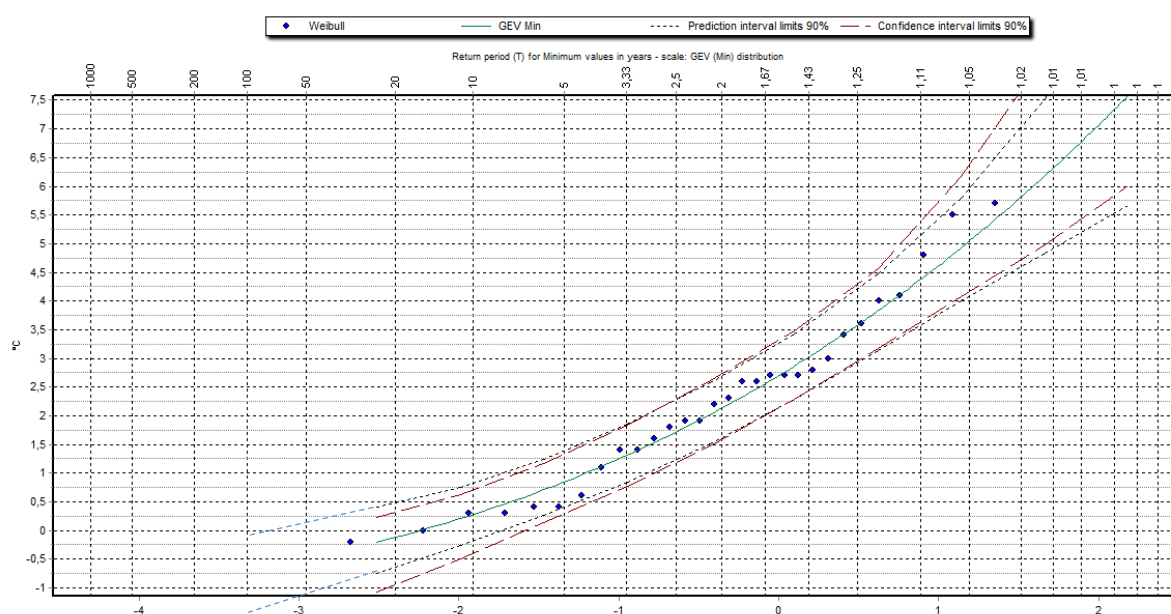
Figura 60 - Valores das temperaturas mínimas para as funções de acordo com o período de retorno selecionado.

All data - T(Min)= 100,0000 y	Value
Normal	-1,41719
Normal (L-Moments)	-1,47379
LogNormal	0,42465
Galton	-0,92895
Exponential	0,69138
Exponential (L-Moments)	0,46369
Gamma	0,17398
Pearson III	-0,90356
Log Pearson III	0,48045
EV1-Max (Gumbel)	-0,33650
EV2-Max	0,98524
EV1-Min (Gumbel)	-2,69766
EV3-Min (Weibull)	0,10391
GEV-Max	-0,86523
GEV-Min	-0,66720
Pareto	-0,03803

Fonte: Autoria própria (2021).

Na figura 61 estão apresentados os valores das temperaturas mínimas para o intervalo de confiança de 90% para essa função, tendo-se obtido $-0,1^{\circ}\text{C}$ e $-1,5^{\circ}\text{C}$ como valores limites do intervalo e que, do ponto de vista de Estados Limites de Projeto e dos correspondentes coeficientes de ponderação das ações previstos, estão atendidos na combinação limite, onde o coeficiente para combinações normais de ações vale 1,2 para temperatura.

Figura 61 – Valores das temperaturas mínimas para o intervalo de confiança de 90%.



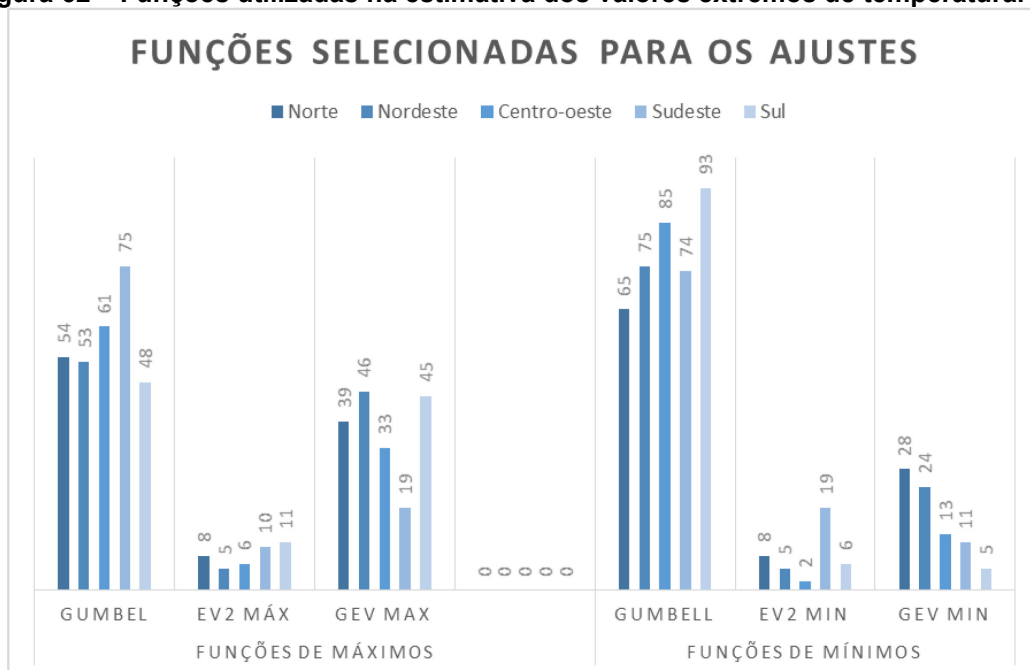
Fonte: Autoria própria (2021).

O procedimento apresentado para a estação A801 foi repetido para as 740 estações meteorológicas disponíveis, sendo os resultados registrados e organizados junto às informações de geolocalização para etapa de construção das isotermas que será descrita no próximo item.

Das análises realizadas, foram catalogadas as funções que foram selecionadas para representar cada local com dados registrados. De acordo com a figura 62, a função de probabilidade que apresentou maior número de aplicações em todas as regiões foi Gumbel, tanto para os valores de máximos, como para os valores de mínimos e, portanto, demonstrando que as recomendações dos estudos de estatística de extremos na utilização desta função para análise de temperaturas esta coerente também para o Brasil. Não obstante, para maior precisão nas estimativas dos valores de recorrência das temperaturas, foi necessário empregar a função

generalizada de extremos (GEV) e, em alguns casos, a função EV Tipo II. Cabe ressaltar que as funções de Gumbel e EV Tipo II, tem como referência a função generalizada, sendo observadas adequações de posicionamento, forma e escala da função que definirá como será o limite inferior ou superior da distribuição assintótica ou se não ocorrerá mudança no limite, caso da função de Gumbel.

Figura 62 – Funções utilizadas na estimativa dos valores extremos de temperatura.



Fonte: Autoria própria (2021).

Por outro lado, isso permite concluir que não há uma função única que deva ser empregada para os ajustes das temperaturas de extremos, quando se busca a maior precisão nas previsões estatísticas.

4.3 Mapas de temperaturas extremas por regiões

Neste item estão apresentados os mapas de temperatura extremas obtidos com os processamentos realizados com a aplicação do software QGis para as cinco regiões que compõe o Brasil.

Os dados e resultados obtidos organizados na planilha eletrônica foram transferidos para o Software QGis.

Na tabela 7 está apresentado um modelo de organização de dados da planilha eletrônica para transferência para o software. Foram dispostas a informação do código

e nome da estação, da localização (latitude, longitude e altitude) e os valores das temperaturas máximas e mínimas do ar à sombra resultante da análise estatística.

Tabela 7 – Amostra da planilha de transferência de dados para o software QGIS.

ESTAÇÃO:	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE	50 ANOS MÁXIMO	100 ANOS MÁXIMO	50 ANOS MÍNIMO	100 ANOS MÍNIMO
A801-83967 – PORTO ALEGRE	-30.0536	-51.17472	41.18	40,6	40,9	-0,4	-0,6
A802-83995 – RIO GRANDE	-32.078	-52.1677	4.92	37,328	37,6535	-1,11878	-1,54983
A803-83936 – SANTA MARIA	-29.72499	-53.7205	103.1	39,382	39,6392	0,0039	0,00142
A804-83953 – SANTA DO LIVRAMENTO	-30.75055	-55.401388	196	39,0506	39,9252	-1,33065	-1,44533
A805- – SANTO AUGUSTO	-27.85434	-53.791179	489.67	36,9391	37,2825	0,06632	0,03142
A806-83897 – FLORIANÓPOLIS	-27.60253	-48.620096	4.87	38,4013	38,8737	1,07131	0,76525
A807-83842 – CURITIBA	-25.4486	-49.230555	922.91	34,8342	35,156	-2,03008	-2,46931
A808-83948 – TORRES	-29.35027	-49.73333	8.44	37,3937	37,8315	1,09663	0,94774
A809-83927 – URUGUAIANA	-29.8398	-57.081899	74.29	40,7634	41,0027	-0,76503	-0,816

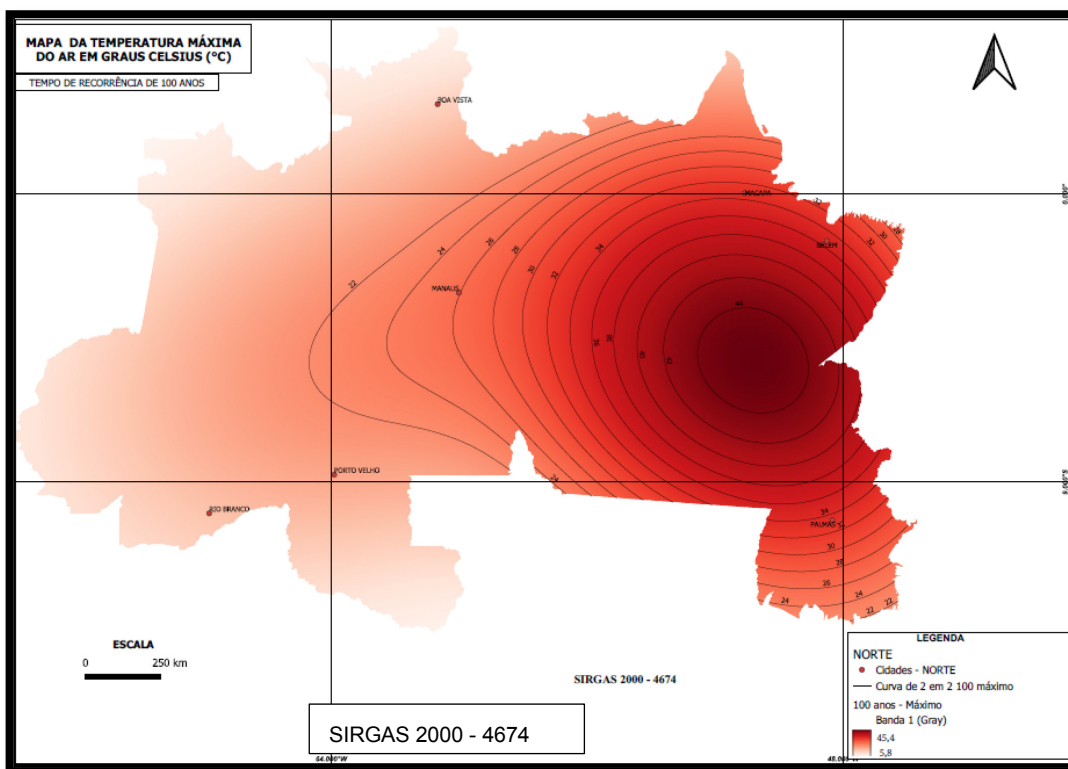
Fonte: Autoria própria (2021).

Na sequência estão apresentados os mapas obtidos para cada uma das regiões.

Na figura 63, está apresentado o mapa das temperaturas máximas do ar à sombra e, na figura 64, o mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra para o tempo de retorno de 100 anos para a região norte. No mapa de temperatura máxima desta região, apesar da qualidade da representação das isocurvas de temperaturas e das cores, observa-se a esquerda uma região sem representação de curvas, demonstrando que a aplicação da interpolação para esta região pode não ser confiável. Como observado na figura 35 do capítulo 3, item 3.2, nesta região há poucas estações meteorológicas instaladas, que corresponde à região da Amazônia com poucos acessos e cidades.

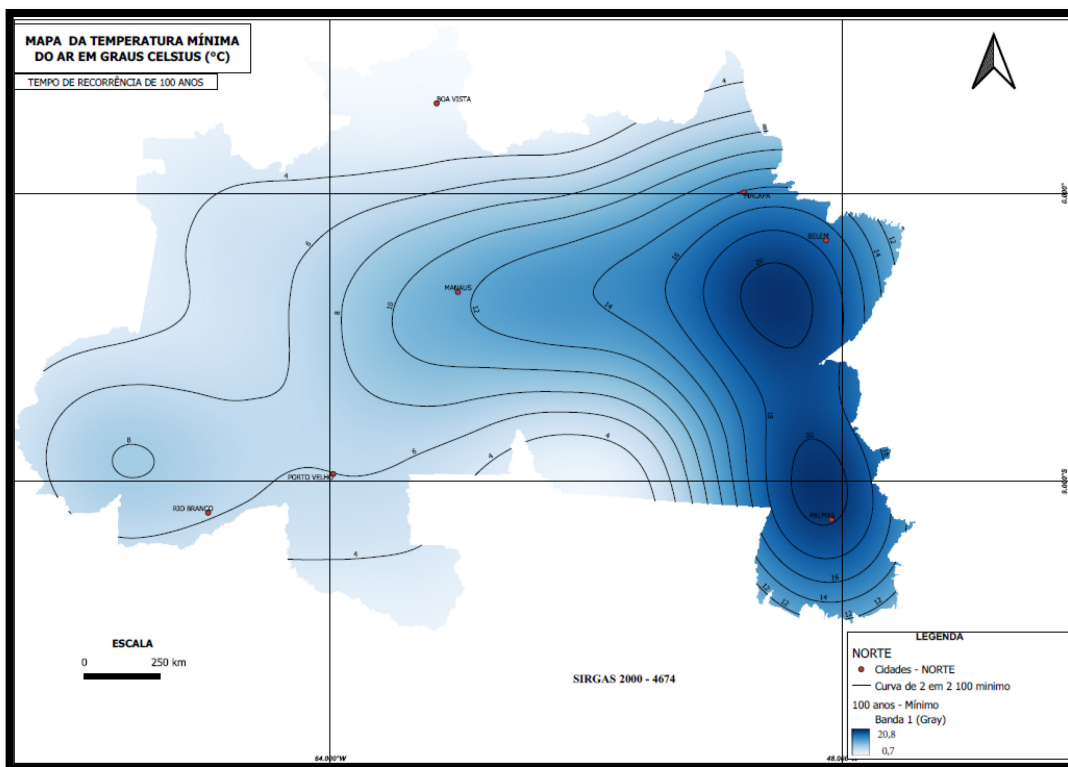
Esta situação prejudica a interpolação local e pode resultar em valores não adequados para a aplicação nos projetos, sendo, portanto, necessário verificar a influência das regiões que fazem limites com essa.

Figura 63 – Mapa das temperaturas máximas do ar à sombra da região norte com tempo de recorrência de 100 anos.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 64 – Mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra da região norte com tempo de recorrência de 100 anos.

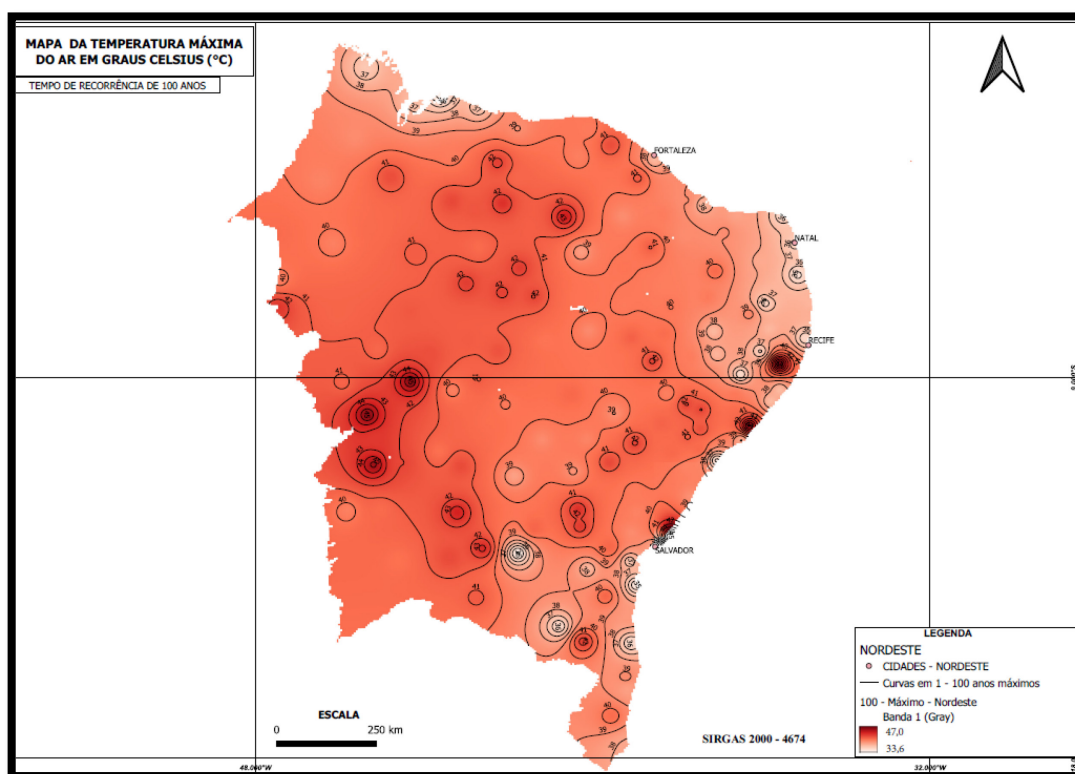


Fonte: Autoria própria (2021).

No mapa de valores mínimos, apesar da presença de curvas em toda a extensão, os valores podem estar superestimados em direção ao limite mínimo pela ausência de dados, conforme destacado acima. Não obstante, para situação a aplicação destes valores resultaria de modo conservador e, portanto, a favor da segurança. Dentro da proposta da utilização de mapas de referência, esta não é a condição desejada para a obtenção de valores mais realistas para o emprego em projetos das estruturas das pontes.

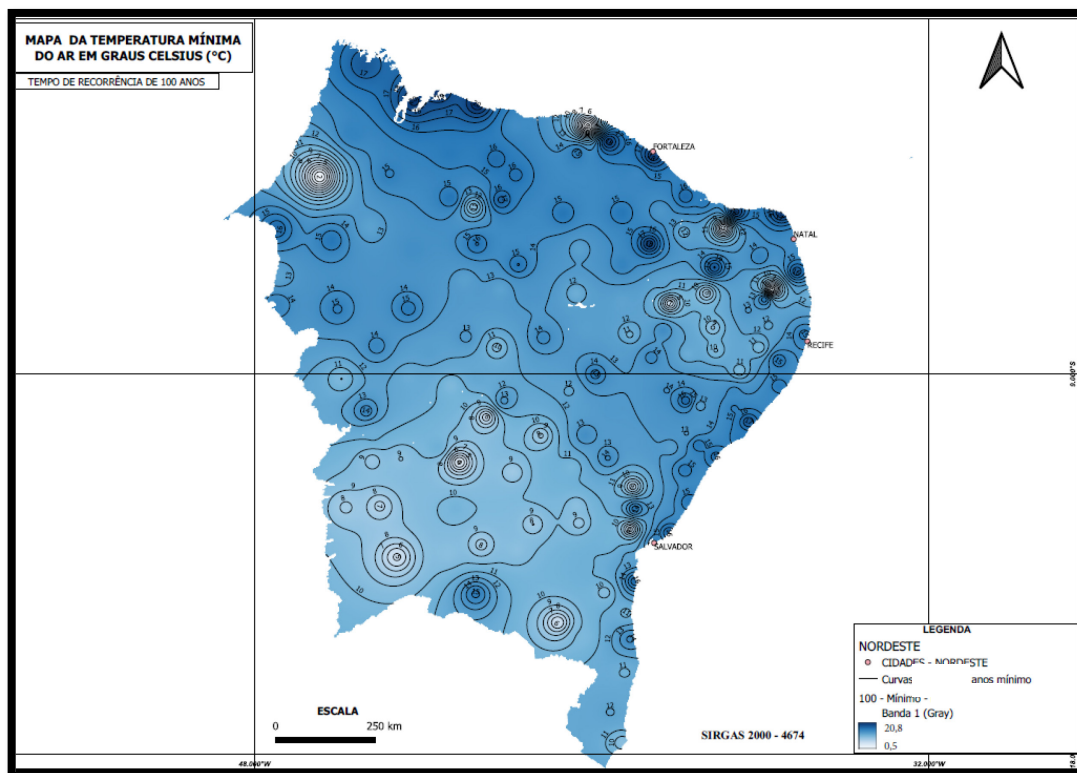
Os mapas para as temperaturas máximas e mínimas da região nordeste estão apresentados nas figuras 65 e 66. Destacam-se valores acima de 45°C na região do semiárido e em regiões de ilhas de calor de região urbanas, nas regiões de capitais como Recife e Maceió. Para as temperaturas mínimas, alguns pontos cadastrados com maior altitude apresentam valores próximos a 6°C.

Figura 65 – Mapa das temperaturas máximas do ar à sombra da região nordeste com tempo de recorrência de 100 anos.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 66 – Mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra da região nordeste com tempo de recorrência de 100 anos.



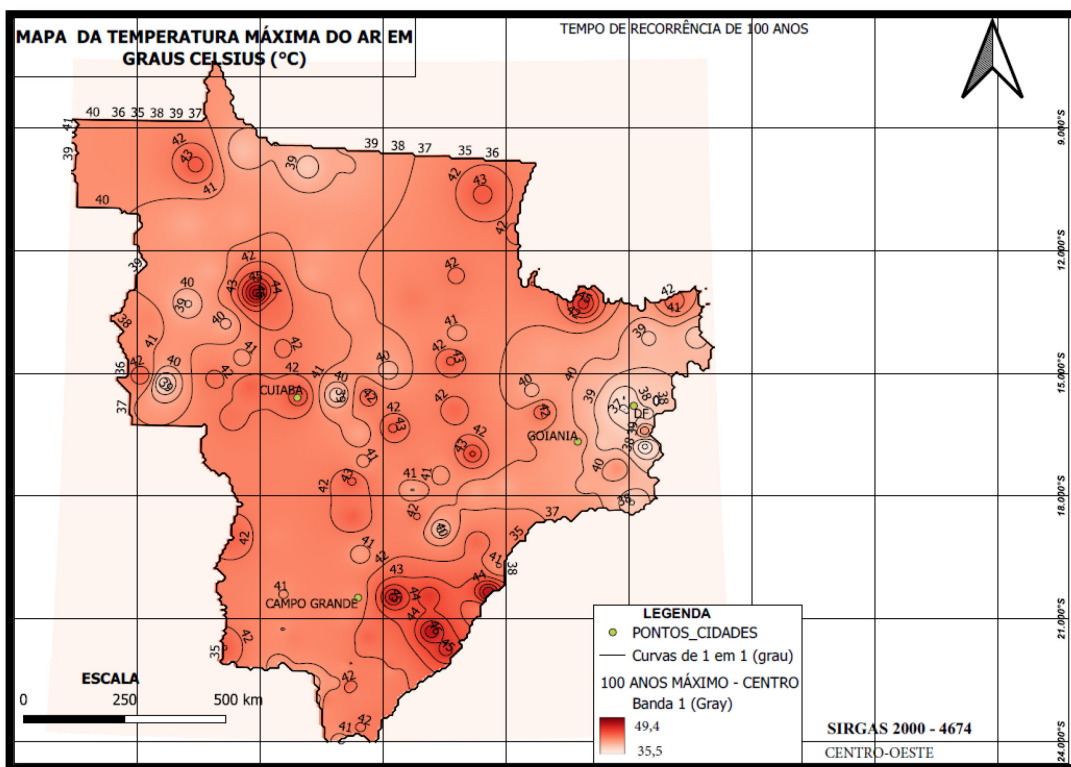
Fonte: Autoria própria (2021).

O intervalo de 1°C para inserção das isocorvas para essa região gerou uma densidade de curvas que dificulta a leitura de registros, porém com a mudança de escala as condições de interpolação não ficaram representativas das variações locais após a interpolação.

Na análise das regiões de limites, verifica-se a limitação da interpolação face à ausência de valores das regiões norte centro-oeste e sudeste.

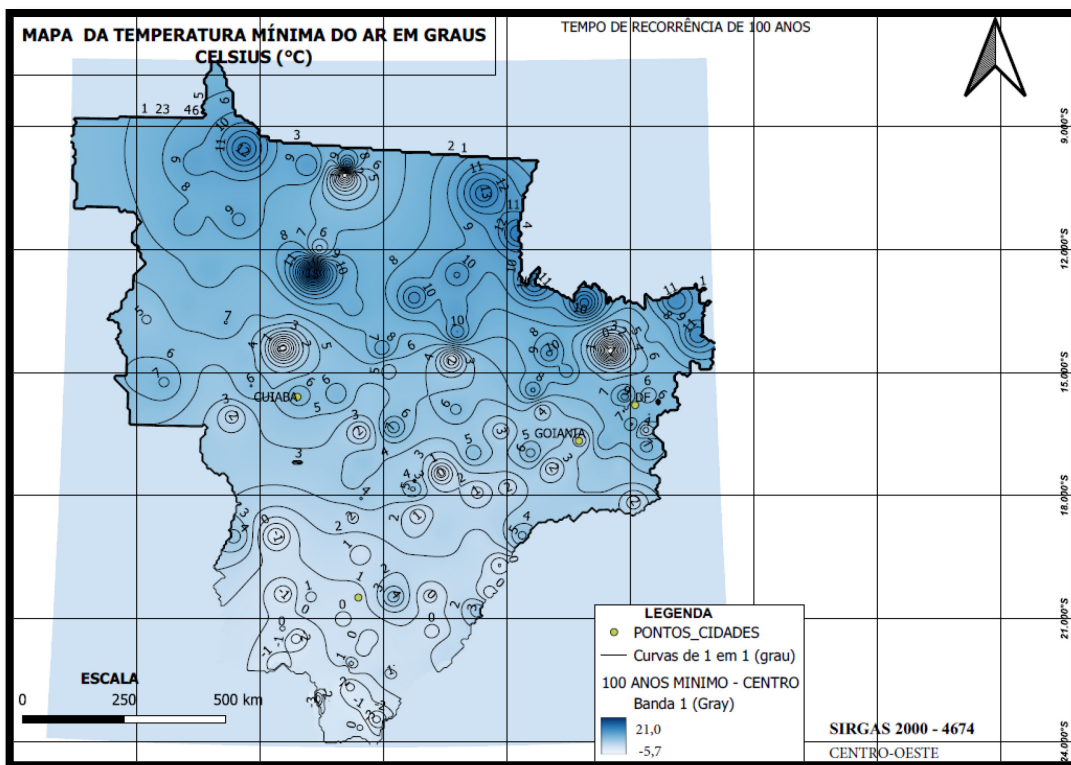
Da mesma forma, analisando-se as figuras 67 e 68, correspondentes aos mapas da região centro-oeste, nos limites de fronteiras com os outros países e entre os estados das regiões que fazem divisa, observam-se as curvas de isothermas com grande variação de valores e que nesta situação tendem a sofrer influências nos resultados.

Figura 67 – Mapa das temperaturas máximas do ar à sombra da região centro-oeste com tempo de recorrência de 100 anos.



Fonte: Autoria própria (2021).

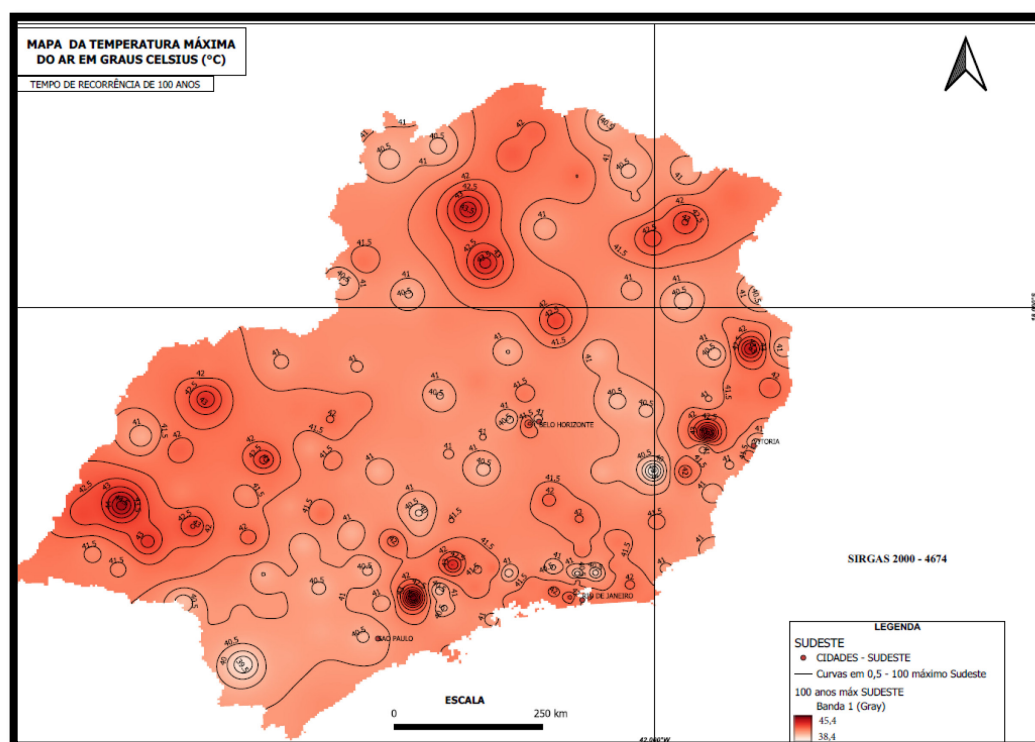
Figura 68 – Mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra da região centro-oeste com tempo de recorrência de 100 anos.



Fonte: Autoria própria (2021).

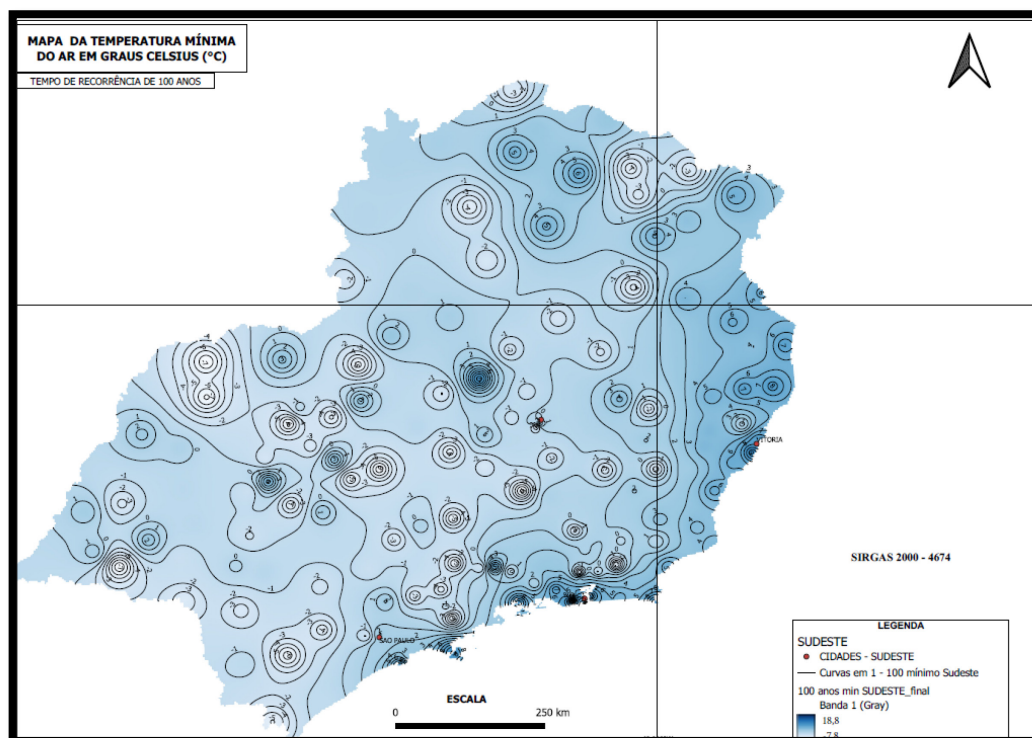
Para a região sudeste, os mapas das figuras 69 e 70, assim como as demais, resultou em uma representação de valores com restrições próximas aos limites territoriais. Para a análise de representatividade dos valores, estes mapas foram construídos com intervalos de $0,5^{\circ}\text{C}$. Destacam-se as temperaturas na região de São José dos Campos e Presidente Prudente, São Paulo, com valores atingindo os 44°C de temperatura máxima do ar à sombra, atingido valores entre -3°C de temperatura mínima, gerando uma amplitude 47°C para estas regiões.

Figura 69 – Mapa das temperaturas máximas do ar à sombra da região sudeste com tempo de recorrência de 100 anos.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 70 – Mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra da região sudeste com tempo de recorrência de 100 anos.



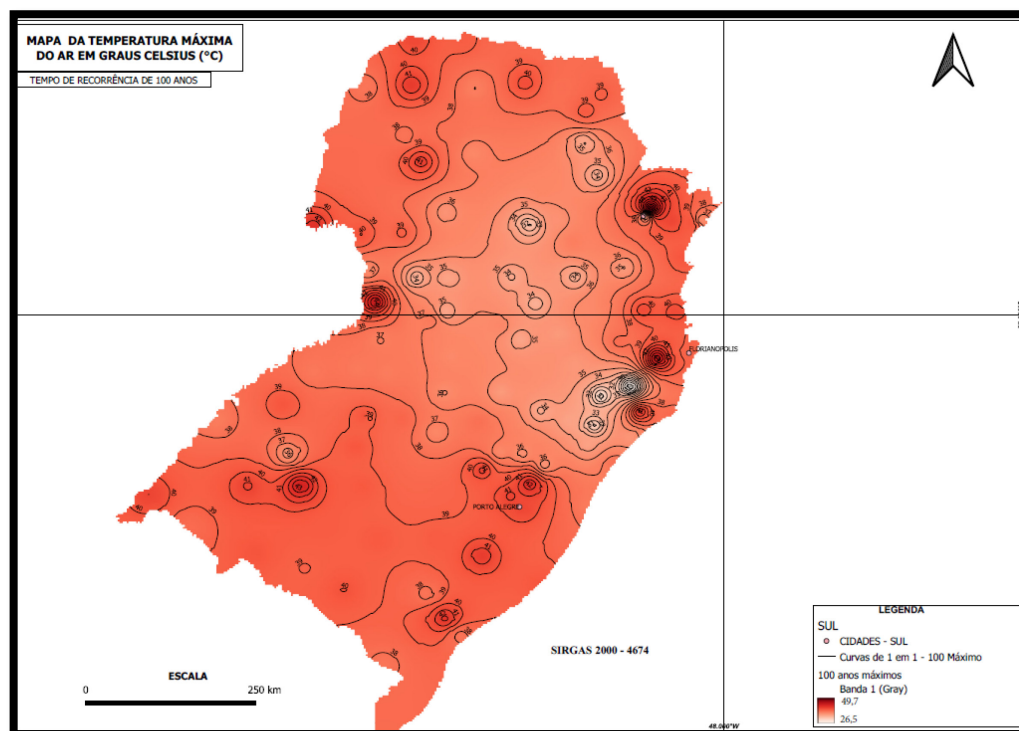
Fonte: Autoria própria (2021).

Na figura 71, está apresentado o mapa das temperaturas máximas do ar à sombra e, na figura 72, o mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra para o tempo de retorno de 100 anos para a região sul, com intervalos de 1°C entre as curvas. No mapa de temperaturas máximas dessa região, observam-se as concentrações de temperaturas elevadas na região de Porto Alegre, em regiões do pé da serra de Santa Catarina e no oeste, e, no Paraná, nas regiões do Vale da Ribeira, região oeste e noroeste, com temperaturas superiores a 40°C.

Para as temperaturas mínimas, destacam-se as regiões ao sul do Rio Grande do Sul e as regiões serranas entre Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, caracterizadas por altitudes superiores a 900 metros, onde regularmente são registradas as temperaturas mínimas dos três estados.

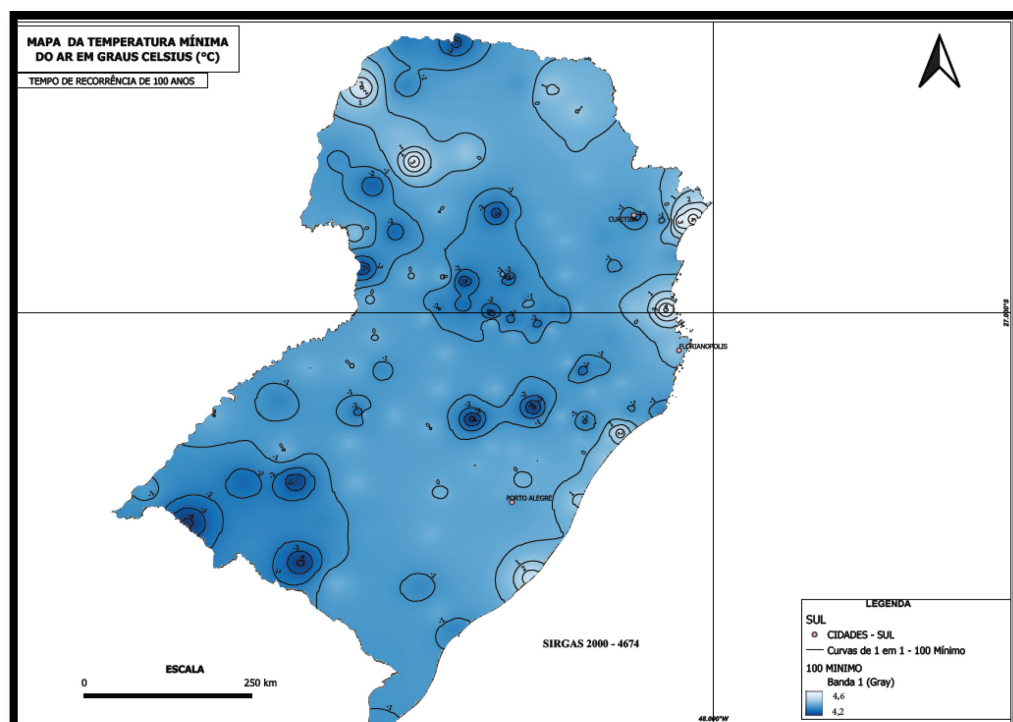
Como nas regiões de maior altitude, acima de 1.300 metros, têm-se poucos registros, recomenda-se que para estes locais se examinem outras fontes de informação para confirmação dos valores de referência de projeto a serem aplicados.

Figura 71 – Mapa das temperaturas máximas do ar à sombra da região sul com tempo de recorrência de 100 anos.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 72 – Mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra da região sul com tempo de recorrência de 100 anos.



Fonte: Autoria própria (2021).

Entre os mapas destas regiões, pode se destacar as diferenças entre os valores das temperaturas mínimas encontradas na região sul e na região norte. Para as temperaturas máximas, apresentam mesmo grau de grandeza. Assim, conclui-se que as amplitudes nas regiões centro-oeste, sudeste e sul são superiores as amplitudes das regiões norte e nordeste, chegando a valores acima de 40°C, conforme avaliado no item 4.1, figura 41.

Da análise destes resultados, tem-se que, do ponto de vista da representação, a utilização de cores e das curvas de isovalores para as temperaturas, acessado através das coordenadas ou por proximidades das cidades de referência, possibilita ao usuário a rápida seleção dos valores representativos das temperaturas máximas e mínimas.

Do ponto de vista de precisão, nos limites entre as regiões os valores podem apresentar uma interpolação que acarreta em divergências do ponto de vista quantitativo, como citado.

Analisando, como exemplo, a interface entre o mapa da região norte e região centro-oeste, enquanto na região norte tem-se uma variação quase linear de 24°C a 36°C, na interpolação gerada no centro-oeste os valores variam de 35°C a 40°C e de modo não linear.

Assim, a conclusão é que se faz necessária a interpolação considerando as informações das regiões adjacentes e a organização de um mapa único para o país todo. Estes resultados serão apresentados no próximo item.

4.4 Mapas de temperaturas extremas para o Brasil

Neste item estão apresentados os mapas que foram obtidos através do processamento das informações das temperaturas de todas as estações consideradas neste estudo de modo simultâneo. Esse processamento, apesar de exigir um tempo maior para a obtenção dos resultados, resolve os problemas encontrados nos limites entre as regiões.

A situação ideal seria a inclusão de valores da análise das temperaturas extremas dos países limítrofes do Brasil, o que permitiria uma maior precisão nos valores representativos destes locais. Porém, em uma consulta preliminar, verificou-se que estes dados não apresentam a mesma disponibilidade, uniformidade e

extensão periódica nos países limítrofes para aplicação dentro dos métodos e critérios propostos neste trabalho.

Portanto, utilizando os dados empregados na obtenção dos mapas por região, esses foram tratados através do programa QGis considerando o país como um todo.

Na figura 73 está apresentado o mapa referente à temperatura máxima à sombra para o Brasil com tempo de recorrência de 100 anos.

Neste mapa foi possível constatar que o resultado da interpolação dos dados de todas as regiões equacionou o problema de valores diferenciais que estavam sendo encontrados nos limites entre as regiões.

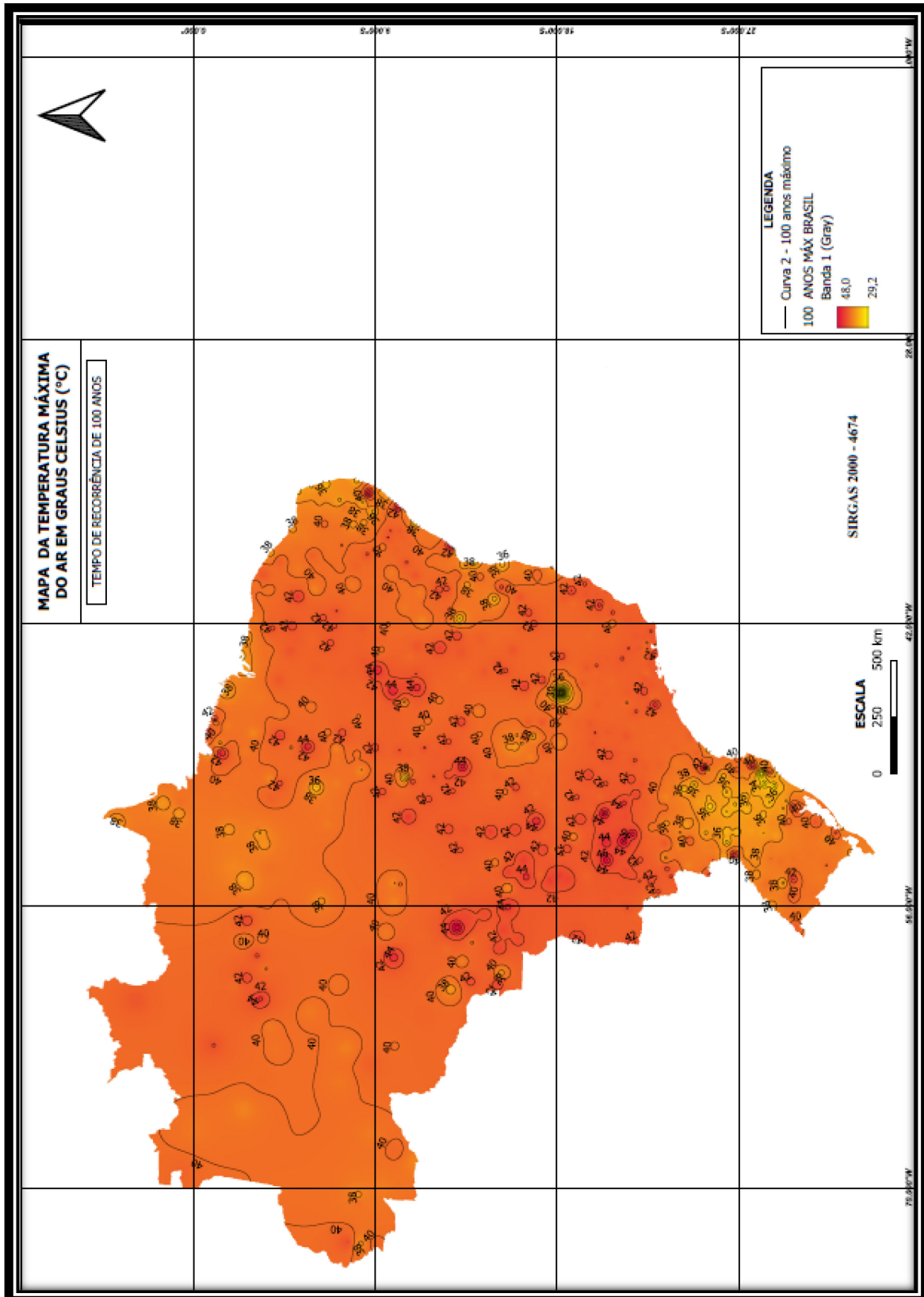
Os problemas exemplificados na interface da região norte e centro-oeste, que ocorriam nos demais limites entre as regiões, foram minimizados através da interpolação simultânea com todos os dados disponíveis. Considerando o limite das regiões citadas, o valor representativo da temperatura máxima à sombra, utilizando o mapa do país, resultou em valores entre 40°C e 42°C, enquanto, como descrito em 4.3, os valores com os mapas regionais apresentavam valores variando entre 24°C a 40°C.

Para as temperaturas máximas, têm-se como resultados indicados nas isocurvas valores entre 36°C e 46°C ao longo do país, permitindo-se avaliar por meio das cores que existem localidades onde as temperaturas máximas podem ser inferiores a esses valores, como nas áreas mais claras das serras gaúcha e catarinense.

Na análise dos resultados obtidos para o mapa de temperaturas mínimas, figura 74, os valores da região de Manaus e lado oeste do Amazonas apresentou uma distribuição de isocurvas convergente com as temperaturas históricas registradas nas estações meteorológicas da região.

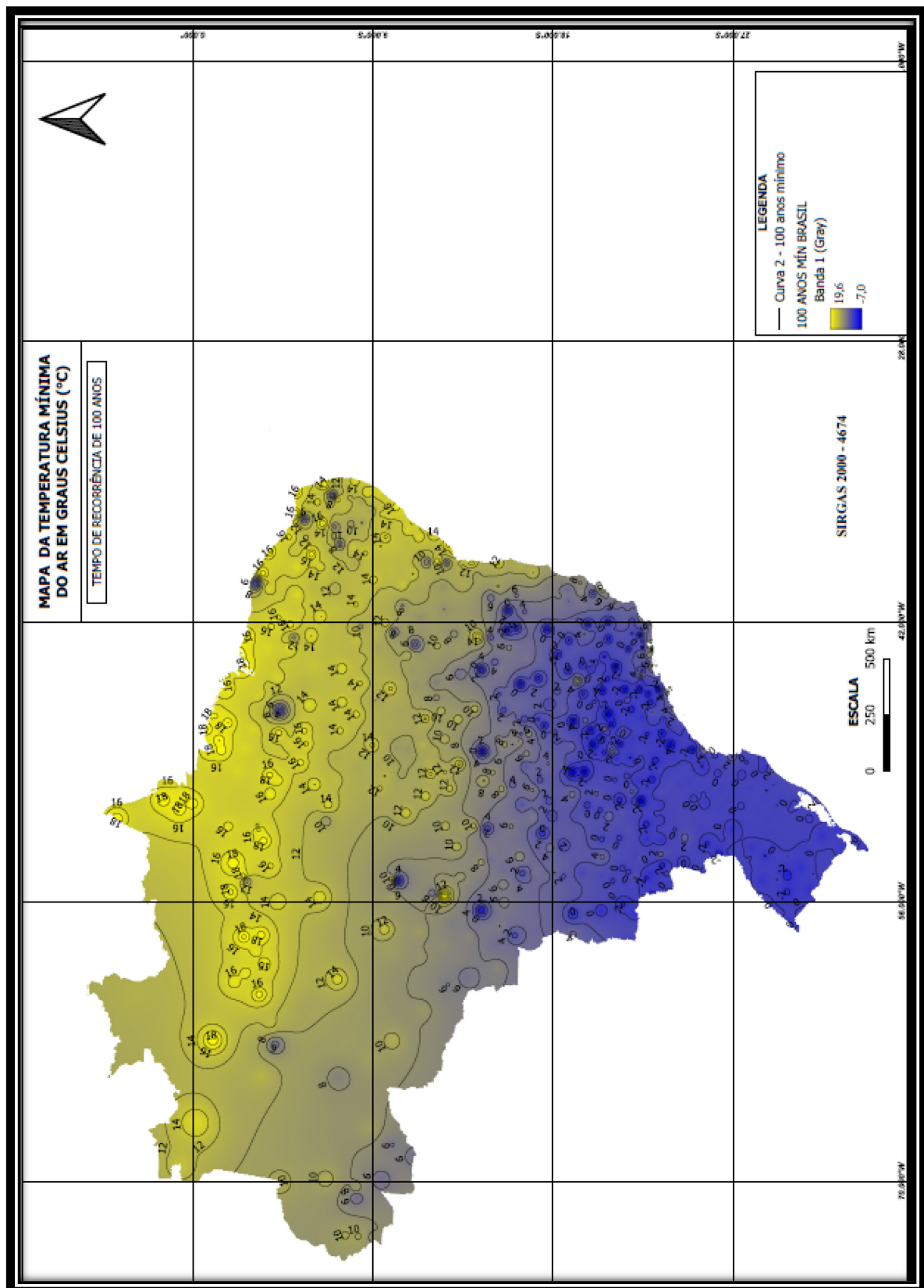
Na região sul, com a interpolação em alguns locais, a previsão da temperatura máxima do ar pode atingir valores inferiores a -4°C, enquanto na região norte a previsão para o tempo de retorno de 100 anos variou entre 12°C e 20°C na maior parte da região. A oeste da região norte foram constatados valores da ordem de 6°C, como na região de Rio Branco, no Acre, onde historicamente são observadas temperaturas baixas, porém em pequeno intervalo de dias em cada ano.

Figura 73 – Mapa das temperaturas máximas do ar à sombra do Brasil com tempo de recorrência de 100 anos.



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 74 – Mapa das temperaturas mínimas do ar à sombra do Brasil com tempo de recorrência de 100 anos.



Fonte: Autoria própria (2021).

Do ponto de vista de visualização, nestes mapas tem-se a necessidade de uma aproximação para a leitura dos valores, porém com os recursos e qualidade das imagens digitais essa questão não se apresenta como condição impeditiva. Com a representação de todas as regiões, a quantidade de valores indicados exige a utilização de fontes com tamanho reduzido em relação aos mapas regionais, porém foi possível a representação das curvas com intervalo de 1°C, evitando-se na construção dos mapas a sobreposição de informações. As cores do mapa de calor sevem de auxílio para a consulta nas regiões onde as variações podem exceder os limites dispostos nas isocurvas.

Do ponto de vista de precisão, a nova distribuição das temperaturas na região norte permitiu contornar os problemas constatados pela falta de estações no local, com valores se mantendo coerentes com os dados das estações meteorológicas mais próximas. Da mesma forma, as ocorrências para as temperaturas mínimas apresentaram correções de valores, tendo-se a elevação das variações de mínimas, mas permanecendo as influências dos dados coletados nas estações de Rio Branco e Porto Velho advindas do processo de interpolação.

Considerando a aplicação aos projetos e de modo a exemplificar o emprego dos mapas, tomou-se como referência a cidade de Curitiba, onde as temperaturas máxima e mínima do ar à sombra obtidas dos mapas correspondem a 40°C e -1°C, respectivamente, tem-se a correção dos valores efetivos com aplicação da equação 47:

$$\begin{aligned} T_{e,min} &= 7,2^{\circ}\text{C} \\ T_{e,max} &= 42^{\circ}\text{C} \end{aligned} \tag{46}$$

Supondo-se a temperatura T_0 igual à temperatura média anual do ar, ou seja, 17,4°C (INMET) e aplicando a mesma correção para a temperatura efetiva, o valor seria:

$$T_0 = 21,9^{\circ}\text{C} \tag{47}$$

Portanto, como parâmetro de projeto tem-se +20,1°C (expansão), valor 34% superior ao previsto na normalização brasileira ($\pm 15^{\circ}\text{C}$), e -14,7°C (contração), valor

2,0% menor. Considerando a amplitude, o valor é de 34,8°C, ou seja, 16% superior ao previsto no intervalo proposto pela norma.

Considerando um segundo exemplo, para a região norte, tomou-se como exemplo a cidade de Manaus, onde as temperaturas máxima e mínima do ar à sombra correspondem a 41°C e 14°C, respectivamente, tem-se a correção dos valores efetivos com aplicação da equação 47:

$$\begin{aligned} T_{e,min} &= 19,2^{\circ}\text{C} \\ T_{e,max} &= 43^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad (48)$$

Tomando-se a temperatura T_0 igual à temperatura média anual do ar, ou seja, 27°C (INMET) e a mesma correção para a temperatura efetiva, o valor seria:

$$T_0 = 29,6^{\circ}\text{C} \quad (49)$$

Portanto, como parâmetro de projeto tem-se +13,4°C (expansão), valor 11% inferior ao previsto na normalização brasileira ($\pm 15^{\circ}\text{C}$), e -16,2°C (contração), valor 8,0% superior ao previsto. Considerando a amplitude, o valor de 23,8°C seria 20,7% inferior ao previsto na normalização.

Assim, demonstra-se a relevância de se utilizar os mapas de temperatura para projetos, envolvendo requisitos de segurança e desempenho das construções.

Por outro lado, apesar de existirem temperaturas negativas em alguns locais, como nas regiões serranas, é possível notar a diferença relevante entre as situações previstas no Eurocode e na AASHTO, tendo em vista que na Europa e nos Estados Unidos da América as amplitudes são muito superiores às encontradas no Brasil, com amplitudes acima de 50°C em diversas localizações, como pode ser constatado nos mapas da Bulgária, como exemplo.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou como resultado um procedimento metodológico para a obtenção dos mapas de temperaturas máximas e mínimas do ar à sombra para a utilização nos processos de determinação das ações de temperatura uniformes a serem empregadas nos modelos de simulação do comportamento das estruturas das obras de arte especiais.

Os valores obtidos destes mapas, corrigidos para valores efetivos por meio das equações adaptadas das recomendações do Eurocode 1, permitirão a obtenção dos esforços internos solicitantes para os elementos componentes das estruturas de concreto de modo a considerar as condições do local da construção de cada obra, bem como atendendo as mudanças do clima que afetam todos os continentes.

Além destes, os demais elementos afetados pelas mudanças de volume da estrutura provocadas pelos fluxos de calor do meio ambiente, como as fundações, aparelhos de apoio e juntas, poderão ser dimensionados para absorver adequadamente os deslocamentos e rotações gerados ao longo da vida útil destas construções tendo como base as previsões estatísticas.

A mudança nos critérios de consideração dos valores de temperatura e a possibilidade de empregar valores locais obtidos nos mapas de temperatura são contribuições a definição das ações e para a revisão da norma brasileira NBR6118, que trata do projeto das estruturas de concreto armado, seguindo as premissas já empregadas nas normas internacionais, como o Eurocode 1 e a norma AASHTO, removendo a lacuna existente.

Dos estudos desenvolvidos, foi possível propor um método para obtenção dos valores representativos das temperaturas, considerando os dados disponíveis e as variáveis relacionadas à obtenção dos mapas de isovalores de temperatura, tendo-se concluído que o parâmetro temperatura do ar à sombra é o recomendado para fase de elaboração de projetos.

A aplicação do modelo de análise de valores extremos proposta se mostrou adequada para a obtenção dos valores representativos de máximos e mínimos para o tempo de recorrência necessário. A proposta de um processo de tratamento dos dados permitiu os ajustes às funções representativas de valores extremos e a organização dos resultados para posterior geração dos mapas. Destacou-se, de

acordo com as recomendações para análise de extremos, a função de Gumbel para a previsão destes valores.

Nesse processo, identificou-se a necessidade da utilização de um tempo de recorrência superior ao indicado no Eurocode, tendo em vista que o modelo utilizado no Método dos Estados Limites previsto na NBR8681 (ABNT, 2003), norma de ações e segurança das estruturas, tem uma parametrização probabilística diferente da norma tomada como referência. A análise desta relação permitiu se recomendar a utilização de um tempo de recorrência de 100 anos, como ajuste ao valor de 50 anos utilizado pelo Eurocode.

Ainda, para a adequação da aplicação dos valores foi sugerida uma adaptação da equação que correlaciona a temperatura efetiva da estrutura para a consideração da temperatura uniforme com as temperaturas mínimas e máximas do ar à sombra, tendo como base a equação da norma europeia.

Apesar das dimensões continentais do Brasil e das variações climáticas encontradas entre as diferentes regiões, verificou-se que o resultado obtido com a interpolação do conjunto de dados soluciona os problemas nas regiões limítrofes e que foram encontrados nos estudos de mapas por região, criando uma transição de valores continua conforme ocorre o deslocamento na direção norte-sul.

Do ponto de vista da aplicação do Sistema de Informações Geográficas, pode-se concluir que se trata de um processo de simples aplicação desde que observadas as condições de tratamento dos dados coletados das estações meteorológicas, tendo facilitado o desenvolvimento dos mapas com um nível de apresentação adequado.

Em relação à visualização dos resultados nos mapas, a seleção do critério de interpolação por meio da triangulação de Delaunay para geração de curvas e cores para a representação do mapa de calor, bem como o processamento dos dados no programa QGIS permitiram uma produção gráfica que segue os padrões dos mapas desenvolvidos pelos países europeus.

Por meio de exemplos de aplicação, foi possível demonstrar a diferença nos resultados obtidos através do emprego dos mapas em relação a proposta vigente na normalização atual brasileira, justificando a necessidade da atualização normativa, bem como dos mapas gerados ao longo do tempo.

O emprego deste procedimento poderá contribuir com a avaliação do desempenho das pontes, incluindo os critérios de segurança estrutural, bem como as

previsões de manutenção e da estimativa da vida útil da estrutura e de seus componentes.

Como ressalva, para regiões com altitude superiores a 1.300m, recomenda-se que se analise a situação das temperaturas históricas do local de implantação da obra para verificar a correspondência dos valores indicados nos mapas ou se mantenham os critérios da normalização atual. Ainda é possível se efetuar um estudo localizado com a coleta de dados de eventuais sistemas de monitoramento da meteorologia local que podem estar disponíveis para apoio da agricultura da região, desde que a série amostral seja suficiente.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando a amplitude do tema e o avanço das pesquisas em nível mundial, bem como as questões não discutidas dentro do contexto das normas brasileiras, apresenta-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Estudo dos efeitos da altitude nos valores representativos das temperaturas extremas do ar para projetos;
- Estudo da aplicabilidade dos mapas de temperaturas extremas de projeto a estruturas de edifícios e demais obras em estruturas de concreto ou estruturas metálicas;
- Monitoramento das temperaturas em obras reais e em modelos reduzidos para calibração dos modelos de correlação das temperaturas do ar com as temperaturas efetivas de projeto para as morfologias usuais no Brasil;
- Análise das correlações das temperaturas efetivas de projeto com as variáveis do local de instalação das estruturas, incluindo a identificação da temperatura inicial conforme os prazos construtivos;
- Calibração dos modelos previstos nos métodos dos estados limites e nos métodos probabilísticos de análise de estruturas em relação às ações de temperatura;
- Análise comparativa de procedimentos de interpolação dos valores de temperatura para obtenção das curvas de isovalores dos mapas e distribuição de cores (mapas de calor);

- Estudo sobre a superposição dos efeitos das temperaturas do ambiente com os provenientes do calor de hidratação e os processos de retração do concreto;
- Análise dos efeitos dos ciclos de temperatura na fadiga dos materiais das pontes com diferentes morfologias e condições de interação solo-estrutura.

REFERÊNCIAS

ABID, S. R.; TAYSI, N.; ÖZAKÇA, M. Temperature records in concrete box-girder segment subjected to solar radiation and air temperature changes. **IOP Conference Series Materials Science and Engineering**. Singapore, 2020.

ABDOLLAHNIA, H.; ELIZEI, M. H. A.; KASHYZADEH, K. R. Multiaxial fatigue life assessment of integral concrete bridge with a real-scale and complicated geometry due to the simultaneous effects of temperature variation and sea waves clash. **Journal of Marine Science and Engineering**. Ed. MDPI. Basel, 2021.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION - OFFICIALS. **Standard specification for highway bridges**. Washington, D. C.: AASHTO, 1973.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION - OFFICIALS. **Standard specification for highway bridges**. Washington, D. C.: AASHTO, 1989.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION - OFFICIALS. **Standard highway transportation organization**. Washington, D. C.: AASHTO, 1990.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION - OFFICIALS. **Standard specification for highway bridges**. Washington, D. C.: AASHTO, 2005.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION - OFFICIALS. **Bridge design specifications**. Washington, D. C.: AASHTO, 2010.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION - OFFICIALS. **Bridge design specifications**. Washington, D. C.: AASHTO, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7187**: projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7187**: projeto e execução de pontes de concreto armado e protendido - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7187**: projeto de pontes, viadutos e passarelas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681**: ações e segurança nas estruturas - procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12815**: concreto endurecido – determinação do coeficiente de dilatação térmica linear – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação – trabalhos acadêmicos - apresentação – elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR. 2ª Ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

BARBER, E. S. Calculation of maximum pavement temperature from weather reports. **Highway Research**. Washington, D.C., V.168, 1957.

BERWANGER, C. Transient thermal behavior of composite bridges. **Journal of Structural Engineering**. American Society of Civil Engineers (ASCE). Reston, V. 109, n. 10, oct, 1983.

BRANCO, F. A.; MENDES, P. A. Thermal actions for concrete bridge design. **Journal of Structural Engineering**. American Society of Civil Engineers (ASCE). Reston, v. 119, n. 8, aug. 1993.

BURDET, O. L. Thermal effects in the long-term monitoring of bridges. **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BRIDGE AND STRUCTURAL ENGINEERING**, 34. Venice, 2010.

CALCUTÁ, M. T. **Pensador**. Disponível em: pensador.com/frase/MTIxOQ/. Acesso em: 01 out. 2021. CALCUTÁ, M. T. 1910-1997.

CAPPS; M. W. R. **The thermal behaviour of the Beachley Viaduct/Wye Bridge**. RRL Report LR234. Road Research Laboratory. Crowthorne, 1968.

CASTILLO, E. **Extreme Value Theory in Engineering**. London: Academic Press, 1988.

COELHO. J. M. Interpolação das curvas de nível no programa Surfer 8.0 através de imagens do Google Earth. **Revista Geama Environmental Sciences**. Recife, v. 3, 2015.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **Eurocode 1**: Actions on structures – Part 1-5: General actions – Thermal actions. Brussels: CEN, 2003.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **Eurocode SS-EN 1991-1-5**. Swedish Standards Institute. Stockholm: CEN, 2009.

CORTE, A. P. D.; SILVA, C. A.; SANQUETTA, C. R.; REX, F. E.; PFUTZ, I. F. P.; MACEDO, R. C. **Explorando o QGIS 3.X** [livro eletrônico]. Ed. Dos Autores. Curitiba, 2020. Disponível em: <https://www.ufpr.br/portalfpr/noticias/pesquisadores-lancam-livro-gratuito-sobre-software-de-sistema-de-informacao-geografica/>. Acesso em: 12 out. 2021.

CROCE, P. Elaboration of maps for climatic actions in Italy. *In: JRC Science for Policy Report*. Luxembourg, 2016.

CROCE, P. The snow load in Europe and the climate change. **Journal Climate Risk Management**. Ed. MDPI. Basel, n. 20, 2018.

CHEN Q. **Effects of Thermal Loads on Texas Steel Bridges**. Thesis. The University of Texas at Austin. Austin, 2008.

DIN1072 - Strassen- und Wegbrücken – Lastannahmen (Road and foot bridges; design loads). Published By: **Deutsches Institut für Normung E.V.** (DIN). Deutschland, 1985.

ELBADRY M.; GHALI, A. Thermal stress and cracking of concrete bridges. **ACI Journal**, n. 83-90. Detroit, 1986.

EMERSON, M. The calculation of the distribution of temperature in bridges. **TRRL Rep. No. LR 561**. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory, 1973.

EMERSON, M. Bridge temperatures in the Arabian Gulf: theoretical predictions. **TRRL Rep. No. LR 495**. Crowthorne: Transport and Road Research Laboratory, 1979.

EMERSON, M. The movements in concrete bridges – Field measurements and methods of prediction. **ACI Publication SP-170**, Detroit, v. 1, 1981.

EMERSON, M. Bridge temperatures and movements in the British Isles. **RRL Report LR228**. Crowthorne: Road Research Laboratory, 1968.

FABER, M. H. Interpretation of uncertainties and probabilities in Civil Engineering Decision Analysis. **Joint Committee of structural Safety**. Swiss, 2008.

FONTANA, R. D. B; SANTOS, I. A. Os enunciados da segunda lei da termodinâmica: Uma possível abordagem. **Revista Brasileira de Ensino de Física** [online]. 2016, v. 38, n. 1. Epub. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-11173812110>. Acesso em: 18 set. 2021.

FORMICHI, P. General Principles of Elaboration of maps for climatic and seismic actions. *In: JRC Science for Policy Report*. Luxembourg, 2016.

FREITAS, L. R. D.; PEREIRA, L. F. C. Variação da entropia total para um corpo em contato com reservatórios térmicos: o caminho da reversibilidade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 41, n. 4. Epub. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0331>. Acesso em: 18 set. 2021.

FU, C.; NG, S. F.; CHEUNG, M. S. Thermal Behavior of Composite Bridges. **Journal of Structural Engineering**. American Society of Civil Engineers (ASCE). Reston, 1990.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. Atlas. São Paulo, 2002.

GÓMEZ, L. Y.; GARCÍA, G.; ACEVEDO, J. L. Estudo da hidratação das pastas de cimento Portland com substituições de escória granulada de alto forno, cinza volante e metacaulim: efeito da utilização de dois superplastificantes. **Revista Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação da Construção. Revista ALCONPAT**, Mérida Yucatán, v. 5, n. 3, 2015.

GOTTSÄTER, E.; IVANOV, O. L. Spatial temperature differences in portal frame bridges. **Structural Engineering International**. London: Informa UK Limited., 2019.

GU, B.; ZHOU, F. Y.; GAO, W., XIE, F. Z.; LEI, L. H. Temperature gradient and its effect on long-span prestressed concrete box girder bridge. **Advances in Civil Engineering**. London, 2020.

HAGEDORN, R.; MARTÍ-VARGAS, J. R.; DANG, C. N.; HALE, W. M.; FLOYD, R. W. Temperature Gradients in Bridge Concrete I-Girders under heat wave. **Journal of Bridge Engineering**, Reston: American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 248, 2019.

HAAN, L.; FERREIRA, A. **Extreme Value Theory: An Introduction**. New York: Springer, 2006.

HE, J.; XIN, H.; WANG, Y.; CORREIA, J. A. F. O. Effect of temperature loading on the performance of a prestressed concrete bridge in Oklahoma: probabilistic modelling. **Structures**, Institution of Structural Engineers. London: Published by Elsevier, v. 34, 2021.

HUANG, H.; YI, T.; ASCE, AF.M; LI, H.; ASCE, A.M.; LIU, H. New representative temperature for performance alarming of bridge expansion joints trough temperature-displacement relationship. **Journal of Bridge Engineering**. Reston: American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 237, 2018.

HUNT, B. W.; COOKE, N. Thermal Calculations for Bridge Design. **Journal of the Structural Division**. Reston: American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 101, 1975.

IMBSEN, R. A.; VANDERSHAF, D. E.; SCHAMBER, R. A.; NUTT, A. V. **Thermal Effects in Concrete Bridge Superstructures**. Washington, D.C.: NCHRP, 1985.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Normas de apresentação tabular**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1993. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv23907.pdf>. Acesso em: 17 fev. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Nota Técnica No 001/2011**. Brasília, DF, INMET, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Gráficos Climatológicos**. Serviço de Processamento Numérico do Instituto Nacional de Meteorologia. Brasília, DF, INMET, 2021. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos>. Acesso em: 21 nov. 2021.

INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the **Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [MASSON-DELMOTTE, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1>. Acesso em: 25 ago. 2021.

JOINT COMMITTEE OF STRUCTURAL SAFETY. **Probabilistic Model Code**. Part 2: Load Models – Thermal Actions. Swiss: JCSS, 2015.

JRC. **Elaboration of maps for climatic and seismic actions for structural design with Eurocodes**. Luxembourg, 2016.

KONIG, G; SUKHOV D. Representative values of thermal effects for concrete bridges in EC1, part 2.5. **IABSE reports 74**. Zurich, 1996.

KOZANIS, S.; CHRISTOFIDES, A.; EFSTRATIADIS, A. Scientific documentation of the Hydrognomon Software (version 4), development of database and software applications in a web platform for the "National Databank for Hydrological and Meteorological Information". **Department of Water Resources and Environmental Engineering – National Technical University of Athens**. Athens, 2010.

KROMANIS, R.; KRIPAKARAN, P. Predicting thermal response of bridges using regression models derived from measurement histories. **Computer & Structures**, United Kingdom, v. 136, 2014.

KUPPA, S. M.; ROEDER, C. W. Thermal Movements in Bridges. **Final Report to NSF**, Virginia, jan., 1991.

LARSSON, C.; SVENSSON, G. **Realistic Modeling of thermal effects in concrete bridges**. Lund: Lund University, 2013.

LAWSON, L.; RYAN, K. L.; BUCKLE, I. G. Bridge temperature profiles revisited: thermal analyses based on recent meteorological data from Nevada. **Journal of**

Bridge Engineering. Reston: American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 25, 2020.

LEE, J. Investigation of extreme environmental conditions and design thermal gradients during construction for prestressed concrete bridge girders. **Journal of Bridge Engineering**. Reston: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2012.

LIN, J.; XUE, J.; HUANG, F.; CHEN, B. Research on the Internal Thermal Boundary Conditions of Concrete Closed Girder Cross-Sections under Historically Extreme Temperature Conditions. **Applied Sciences**. Ed. MDPI. Basel, 2021. Disponível em: <http://www.mdpi.com/journal/applsci>. Acesso em: 11 ago. 2021.

LIU, L.; ZHANG, Z.; HUANGFU, Z.; HUANG, D. Numerical analysis of concrete temperature stress at different loading ages. **Journal of Physics**, Bristol, v. 1732, 2021 (Conference Series).

LU, Y.; LI, D.; WANG, K.; JIA, S. Study on solar radiation and extreme thermal effect on concrete box girder bridges. **Applied Sciences**. Basel: MDPI, 2021.

MARKOVA, J.; HOLICKY, M. Models of thermal actions for bridges. *In: Reliability, Risks and Safety, Theory and Applications*. Leiden: Czech Republic, Prague, 2009.

MALAKATAS, N. EN 1991 – Climatic actions and elaboration of maps for climatic actions in Greece. *In: JRC Science for Policy Report*. Luxembourg, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Fundamentals of Statistical Hydrology**. Switzerland: Springer International Publishing, 2017.

NARS, A; BJÖRNSSON; HONFI, D; IVANOV, O. L.; JOHANNSSON, J.; KJELLSTRÖM. A review of the potential impacts of climate change on safety and performance of bridges. **Sustainable and Resilient Infrastructure**. 2021.

NERY, A. R. L.; BASSI, A. B. M. S. **A primeira lei da termodinâmica dos processos homogêneos**. Química Nova. 2009, v. 32, n. 2, pp. 522-529. Epub 23 Abr. São Paulo, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000200042>. Acesso em: 18 set. 2021.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2a ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NIKOLOV, D.; GOCHEVA, A. Experience from region in elaboration of maps for climatic actions: Bulgaria. *In: JRC Science for Policy Report*. Luxembourg, 2016.

OBAIDAT, M. S.; KACPRZYK, J.; ÖREN, T. Simulation and modeling methodologies, technologies and applications. **International Conference Simultech**. Ed. Springer, Colmar, 2015.

OBRIEN, E. J.; HEITNER, B.; ZNIDARIC, A.; SCHOEFS, F.; CAUSSE, G. YALAMAS, T. Validation of bridge health monitoring system using temperature as a proxy for damage. Chichester: Struct Control Health Monitoring, 2020.

PALU, S.; MAHMOUD, H. Impact of climate change on the integrity of the superstructure of deteriorated U.S. bridges. 2019. **PLoS ONE**, v. 14, n. 10, e0223307. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223307>. Acesso em: 02 out. 2021.

PINHO, M. F.; ARAÚJO, E. R.; REGIS, P. A. Efeitos de temperatura nos tabuleiros de pontes. **CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO**, 52, 2010. Anais. Fortaleza, 2010.

POKORSKI, P.; RADZISZEWSKI, P; SARNOWSKI, M. Study of high-temperature properties of asphalt mixtures used for bridge pavement with concrete deck. **Materials**, Basel, v. 14, 2021.

PRIESTLEY, M. J. N. Temperature gradients in bridges – some design consideration. **New Zealand Engineering**, Wellington, v. 27, 1972.

RADAVANOC, Z.; GREBOVIC, R. S. Definition of Thermal Actions on the Building un Accordance with the Standard EN 1991-1-5. **Procedia Engineering**, v. 117. Amsterdam: Elsevier, 2015.

REYNOLDS, J. C. **Thermal Stresses and Movements in Bridges**. Master Thesis. Missouri University of Science and Technology. Missouri, 1972.

RIMAL, J.; SINDLER D. Comparison of temperature loadings of bridge girders. **Acta Polytechnica**, Czech, v. 48, n. 5, 2008.

ROCHA, J. H. A., PÓVOAS, Y. V. A termografia infravermelha como um ensaio não destrutivo para a inspeção de pontes de concreto armado: revisão do estado da arte. **Revista Alconpat Intenacional**, Mérida, v. 7, n. 3 sep/dec, 2017.

ROCHA, J. **Termodinâmica da fratura: uma nova abordagem do problema da fratura nos sólidos**. Salvador: EDUFBA, 2010. 192. Disponível em SciELO Books <<http://books.scielo.org>>.

RODRIGUEZ, L. E.; BARR, P. J.; HALLING, M. W. Temperature Effects on a Box-Girder Integral-Abutment Bridge. **Journal of Performance of Constructed Facilities**. Reston: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2014.

ROEDER, C. W.; MOORTY, S. **Thermal Movements in Bridges**. **Transportation Research**. Washington, D. C.: Record, 1992. n. 1290.

ROEDER, C. W. **Thermal movement design procedure for steel and concrete bridges**. Washington, D. C.: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 2002.

SILVEIRA, A. P.; BRANCO, F. A.; CASTANHEDA, M. Statistical analysis of thermal actions for concrete bridge design. *Structural Engineering International*. **IABSE Publications Committee**. Switzerland, 2000.

SONG, M.; BEHMANESH, I.; MOAVENI, B.; PAPADIMITRIOU, C. Accounting for modeling errors and inherent structural variability through a hierarchical Bayesian model updating approach: an overview. **Sensors**. Ed. MDPI. Basel, v. 20, n. 387, 2020.

SOUKHOV, D. Representative values of thermal actions for concrete bridges. **Prog. Struct. Engng Mater (2)**. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.

SOUSA, M. L.; DIMOVA, S.; PINTO, A. State of Harmonized use of the eurocodes nationally determined parameters relevant to the definition of climatic and seismic actions. *In: JRC Science for Policy Report*. Luxembourg, 2016.

TAKEDA, O. T.; MAZER, W. Potencial de análise termográfica para avaliar manifestações patológicas em sistemas de revestimentos de fachadas. **Revista Alconpat Intenacional**, Mérida, v. 8, n. 1, ene/abr, 2018.

VECHIO, F. J.; SATO J. A. Thermal Gradient Effects in Reinforced Concrete Frame Structures. **ACI Structural Journal**. Detroit, n. 87-S27, 1990.

VERMA, M.; MISHRA, S. S. Temperature-driven fatigue life of reinforced concrete integral bridge pile considering nonlinear soil-structure interaction. **Structural Concrete**. Fib International Federation for structural Concrete. Lausanne, 2020.

VIANNA, L. F. N.; PERIN, E. B.; RICCE, W. S.; MASSIGNAN, A. M.; PANDOLFO, C. Bancos de Dados Meteorológicos: Análise dos Metadados das Estações Meteorológicas no Estado de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 32, n. 1, 2017.

VIL, M.; VOSPERNIG M.; REITERER M.; EICHINGER-VILL, E. M.; KARI H. Untersuchungen zur tatsächlichen Temperaturbeanspruchung von Massivbrücken. **Beton- und Stahlbetonbau 116**. Berlin: Ernest&Sohn, 2021.

WANG, Y.; ZHAO, R. Experimental study on time dependent behavior of concrete filled steel tubes in ambient environment. **KSCE Journal of Civil Engineering**, Seoul, v. 23. N.1, 2018.

WHITE, L.; RYAN, K. L.; BUCKLE, I. G. Thermal gradients in Southwestern United States and effect on bridge bearing loads. **NDOT Report N° 224-14-803**. Carson City: Nevada Department of Transportation, 2017.

XIANG, S.; WANG, D.; YANG, L.; TAN, B. Study on the life cycle simulation method of the temperature field and temperature effect of a steel-concrete composite bridge deck system. **Measurement and Control**, Los Angeles, v. 54, 2021.

XU, Q.; BURGOYNE, C. Thermal-creep analysis of concrete bridges. Proceedings of the institution of civil engineers. **Bridge Engineering**, Scotland, n. 158, 2005.

XUE, J.; LIN, J.; BRISEGHELLA, B.; TABATABAI, H.; CHEN, B. Solar radiation parameters for assessing temperature distributions on bridge cross-sections. **Applied Sciences**. Basel, v. 8, n. 627, 2018.

ZHANG, H.; WANG, P.; HE, S.; LI, Y.; CHEN, K.; SUN, N. Research of thermal effect of cable-stayed bridge with a separated side-box steel-concrete composite girder under solar radiation. **Advances in Civil Engineering**. London, 2021.

ZHOU, L.; WEI, T.; ZHANG, G.; ZHANG, Y.; GILDAS, M. A. D.; ZHAO, L.; GUO, W. Experimental Study of the Influence of Extremely Repeated Thermal Loading on a Ballastless Slab Track-Bridge Structure. **Applied Sciences**, Basel, v. 10, n. 2, 2020.

ZHOU, G.; YI, T. Thermal load in large-scale bridges: a state-of-art review. **International Journal of Distributed Sensor Networks**. London: Hindawi Publishing Corporation, 2013.

ZICHNER, T. Thermal effects on concrete bridges. **Comité Euro-International du Béton (CEB)**. Pavia, 1981.

ZUK, W. Thermal behavior of composite bridges – Insulated and uninsulated. **Committee on Bridges**. Virginia: University of Virginia, 1965.