UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Dissertação de Mestrado

Impacto da variação das condições de contorno no projeto de norma ABNT de simulação de transporte de umidade

Luiza Coutinho Bernardes

Pelotas, 2024

Luiza Coutinho Bernardes

Impacto da variação das condições de contorno no projeto de norma ABNT de simulação de transporte de umidade

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, na linha de pesquisa Conforto e Sustentabilidade do Ambiente Construído.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha
Coorientadora: Prof. Drª. Adriana Camargo de Brito

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

B518i Bernardes, Luiza Coutinho

Impacto da variação das condições de contorno no projeto de norma ABNT de simulação de transporte de umidade [recurso eletrônico] / Luiza Coutinho Bernardes ; Eduardo Grala da Cunha, orientador ; Adriana Camargo de Brito, coorientadora. — Pelotas, 2024.
180 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Desempenho higrotérmico. 2. Simulação computacional. 3. Umidade em paredes. 4. Análise de sensibilidade. I. Cunha, Eduardo Grala da, orient. II. Brito, Adriana Camargo de, coorient. III. Título.

CDD 720

Elaborada por Aline Herbstrith Batista CRB: 10/1737

Luiza Coutinho Bernardes

Impacto da variação das condições de contorno no projeto de norma ABNT de simulação de transporte de umidade

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 28 de setembro 2023

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (Orientador)
Doutor em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Profa. Drª. Adriana Camargo de Brito (Coorientador)
Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo

Profa. Drª. Vanda Alice Garcia Zanoni
Doutora em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Brasília

Profa. Drª. Angela Borges Masuero
Doutora em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Nathan Mendes
Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a minha família pelo apoio incondicional. A minha mãe Rosane por ser a minha maior incentivadora, e meu pai Eduardo por ter me mostrado o caminho para a arquitetura. Agradeço ao Lucas pelo apoio e companheirismo nesta e em outras jornadas.

Aos colegas do Laboratório de Conforto e Eficiência Energética e do Grupo de Estudos em Simulação de Eficiência Energética em Edificações, em especial Carol, Luciane, Luísa e Liliane por toda ajuda, companheirismo, todos conhecimentos compartilhados e todos os momentos bons que passamos juntos durante esta etapa.

Agradeço ao meu orientador Eduardo Grala da Cunha pela oportunidade, pela confiança e por todos os ensinamentos passados.

Aos demais colegas, amigos e professores que de alguma forma fizeram parte desta conquista, meus agradecimentos.

Muito obrigada!

“A ciência e a vida cotidiana não podem e não devem ser separadas. A ciência fornece uma explicação parcial sobre a vida. Até onde consegue chegar, é baseada em fatos, experiências e experimentos.”

Rosalind Franklin

Resumo

BERNARDES, Luiza Coutinho. **Impacto da variação das condições de contorno no projeto de norma ABNT de simulação de transporte de umidade.** Orientador: Eduardo Grala da Cunha. 2024. 180f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

A umidade é uma das principais causas de manifestações patológicas nas construções. Afeta tanto a durabilidade dos elementos construtivos quanto a salubridade dos ambientes. Diversas normas internacionais abordam questões relacionadas ao desempenho higrotérmico de edificações, contudo, no âmbito nacional ainda há muitas lacunas. O grupo de pesquisa GT Umidade da ABNT realiza discussões e pesquisas acerca do tema desempenho higrotérmico em edificações. Atualmente está em processo de desenvolvimento o projeto de norma ABNT, que visa estabelecer um padrão nacional para a simulação computacional de desempenho higrotérmico de edificações. Nesse sentido, esta pesquisa tem por objetivo analisar o projeto de norma ABNT “Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento” quanto à sensibilidade às variações das condições de contorno de produção de umidade, uso e ocupação. O método consiste em aplicar as condições propostas no projeto de norma ABNT e analisar a sensibilidade às variações das condições de contorno por meio de simulações computacionais de transporte de calor e umidade. Primeiramente foram apresentadas as condições de contorno do projeto de norma ABNT e definidas as variações para análise. Em seguida, foram executadas as simulações computacionais dos 104 modelos com diferentes variações para análise, com os programas *EnergyPlus* 9.4 e *WUFI Pro* 6.7. E por fim, foram realizadas as análises dos resultados a partir da análise de sensibilidade pelo método de variância fatorial completa ANOVA. Como resultados, considerando as condições do sistema construtivo analisado e do clima utilizado, a variável mais sensível para o critério teor de umidade total da parede foi a chuva dirigida e a ocupação interna. Para o critério de condensação superficial da superfície interna a variável mais sensível foi a ocupação interna. No critério de temperatura foram a ventilação natural e a ocupação interna. Para o critério de umidade relativa, as variáveis mais sensíveis foram ocupação interna e chuva dirigida. E no critério formação de fungos filamentosos a variável ventilação natural apresentou maior sensibilidade. A chuva dirigida se mostrou como uma variável influente em diversos critérios de análise, mostrando a importância da escolha de um arquivo climático confiável com condições realísticas de chuva dirigida, além de utilizar ferramentas de simulação que consideram a chuva dirigida nos seus modelos matemáticos. A ocupação interna também desempenhou um papel importante nos resultados, pois apresentou uma significativa produção de calor e vapor internos, podendo contribuir para formação de manifestações patológicas nas paredes. Em modo geral, foi observado que a mudança nas variáveis impacta significativamente os resultados, mostrando a importância de o projeto de norma estabelecer condições de contorno adequadas com a realidade do nosso país.

Palavras chave: Desempenho higrotérmico. Simulação computacional. Umidade em paredes. Análise de sensibilidade.

Abstract

BERNARDES, Luiza Coutinho. **Impact of boundary condition variations on the ABNT standard project for moisture transport simulation.** Advisor: Eduardo Grala da Cunha. 2024. 180f. Dissertation (Masters in Architecture and Urbanism) – Graduate Program in Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2024.

Moisture is one of the main causes of building pathologies. It affects both the durability of building components and the healthiness of indoor environments. Various international standards address issues related to the hygrothermal performance of buildings, but at the national level, there are still many gaps. The ABNT Humidity Working Group conducts discussions and research on the topic of hygrothermal performance in buildings. Currently, the development of an ABNT standard project is underway, aiming to establish a national standard for the computer simulation of hygrothermal performance in buildings. This research aims to analyze the ABNT standard project titled “Computer Simulation of the Hygrothermal Behavior of Walls – Procedure” regarding its sensitivity to variations in boundary conditions related to moisture production, usage, and occupancy. The method consists of applying the proposed conditions in the ABNT standard project and analyzing the sensitivity to variations in boundary conditions through computer simulations of heat and moisture transport. Firstly, the boundary conditions of the ABNT standard project were presented, and variations for analysis were defined. Then, computational simulations of 104 models with different variations for analysis were executed, using the EnergyPlus 9.4 and WUFI Pro 6.7 programs. Finally, the results were analyzed using sensitivity analysis through the complete factorial variance method ANOVA. As results, considering the conditions of the analyzed construction system and the climate used, the most sensitive variable for the criterion of total wall moisture content was directed rain and indoor occupancy. For the criterion of surface condensation on the internal surface, the most sensitive variable was indoor occupancy. Regarding temperature profile criteria, natural ventilation and indoor occupancy were the most sensitive variables. For relative humidity profile criteria, the most sensitive variables were indoor occupancy and directed rain. In the criterion of filamentous fungi formation, natural ventilation exhibited greater sensitivity. Directed rain proved to be an influential variable present in several analysis criteria, underscoring the importance of selecting a reliable climatic file with realistic directed rain conditions, as well as using simulation tools that consider directed rain in their mathematical models. Indoor occupancy also played an important role in the results, as the occupancy of the building results in significant internal heat and vapor production, which can contribute to the formation of wall pathologies. In general, it was observed that changes in variables significantly impact the results, highlighting the importance of the standard project establishing appropriate boundary conditions that align with the reality of our country.

Keywords: Hygrothermal performance. Computer simulation. Moisture on walls. Sensitivity analyses.

Lista de Figuras

Figura 1 – Ciclo de vida dos fungos filamentosos 33
Figura 2 – *WUFI Pro*, configurações do elemento construtivo. 41
Figura 3 – *WUFI Pro*, configurações da orientação, inclinação e chuva dirigida.....41
Figura 4 – Planta baixa com definição do ângulo do vento em relação a parede exposta.....42
Figura 5 – *WUFI Pro*, configurações do clima externo. 43
Figura 6 – *WUFI Pro*, configurações do clima interno: arquivo externo e normas EN/DIN/WTA respectivamente. 44
Figura 7 – *WUFI Pro*, configurações do clima interno: norma ISO e norma ASHRAE respectivamente. 44
Figura 8 – Programa *Excel*, tabela disponibilizada pelo *WUFI Pro 6.7* para criação do arquivo do ambiente interior. 45
Figura 9 – Fluxograma do método. 66
Figura 10 – Normais climatológicas Pelotas.....67
Figura 11 – Fluxograma da etapa 1. 68
Figura 12 – Condições de contorno da NBR 15575-4 (2021c) e do projeto de norma ABNT (ABNT, 2023). 69
Figura 13 – Variações das condições de contorno.....70
Figura 14 – Planta baixa e corte da tipologia habitacional. 74
Figura 15 – Composição da edificação habitacional. 75
Figura 16 – Fluxograma da etapa 2. 76
Figura 17 – Passos das simulações computacionais. 78
Figura 18 – Modelagem da edificação no programa SketchUp. 79
Figura 19 – Programa *jEPlus*, parametrização da orientação solar. 80
Figura 20 – Programa *jEPlus*, parametrização da chuva, ocupação, vapor interno e ventilação. 81
Figura 21 – Análise do clima exterior *WUFI Pro* 6.7 da cidade de Pelotas/RS. 90
Figura 22 – Análise do clima exterior *WUFI Pro* 6.7 da cidade de Pelotas/RS. 91
Figura 23 – Fluxograma da etapa 3. 92
Figura 24 – Análise de sensibilidade do critério teor de umidade total.....100
Figura 25 – Análise de sensibilidade do critério condensação superficial da superfície interna. 102
Figura 26 – Análise de sensibilidade do critério temperatura. 103

Figura 27 – Análise de sensibilidade do critério de umidade relativa. 105
Figura 28 – Análise de sensibilidade do critério risco de formação de fungos filamentosos. 107
Figura 29 – Gráfico teor de umidade total, modelos 01 e 69. 122
Figura 30 – Gráfico condensação superficial da superfície interna, modelo 69. 123
Figura 31 – Gráfico condensação superficial da superfície interna, modelo 33. 124
Figura 32 – Gráfico condensação superficial na superfície interna, modelo 01. 126
Figura 33 – Gráfico resumo da condensação superficial, comparação das variáveis chuva dirigida e ocupação interna. 126
Figura 34 – Gráfico de temperatura na superfície interna, modelos 33, 34 e 38. ...130
Figura 35 – Gráfico de umidade relativa na superfície interna, modelos 69, 80 e 01. 131
Figura 36 – Gráfico teor de umidade crítico e do esporo, modelo 01. 132
Figura 37 – Gráfico teor de umidade crítico e do esporo, modelo 33. 134
Figura 38 – Gráfico teor de umidade crítico e do esporo, modelo 69. 134
Figura 39 – Gráfico resumo risco de formação de fungos filamentosos, comparação das variáveis ventilação natural e ocupação interna. 136

Lista de Tabelas

Tabela 1 – *WUFI Pro*, fatores de exposição e deposição da chuva. 42
Tabela 2 – *WUFI Bio,* Critérios dos gráficos do programa *WUFI Bio*. 47
Tabela 3 – Variações das condições de contorno. 71
Tabela 4 – Variações das condições de contorno (continuação). 72
Tabela 5 – Variações das condições de contorno (continuação). 73
Tabela 6 – Características geométricas da tipologia habitacional. 75
Tabela 7 – Parede para análise. 76
Tabela 8 – Propriedades dos materiais construtivos. 82
Tabela 9 – Agendas de ocupação, iluminação e equipamentos. 83
Tabela 10 – Descrição dos parâmetros das janelas e portas quando fechadas. 86
Tabela 11 – Propriedades higrotérmicas dos materiais da parede. 87
Tabela 12 – Fatores de exposição e deposição da chuva. 88
Tabela 13 – Análise de sensibilidade, variáveis dependentes e independentes. 96
Tabela 14 – Análise de sensibilidade, descrição das variáveis dependentes e independentes. 97
Tabela 15 – Análise de sensibilidade, resultados do valor-F. 99
Tabela 16 – Análise de sensibilidade, *ranking* do critério teor de umidade total. 100
Tabela 17 – Análise de sensibilidade, *ranking* do critério condensação superficial da superfície interna. 102
Tabela 18 – Análise de sensibilidade, *ranking* do critério temperatura. 104
Tabela 19 – Análise de sensibilidade, *ranking* do critério umidade relativa. 105
Tabela 20 – Análise de sensibilidade, ranking do critério risco de formação de fungos filamentosos. 107
Tabela 21 – Análise descritiva, teor de umidade total da parede. 109
Tabela 22 – Análise descritiva, condensação superficial na superfície interna. 111
Tabela 23 – Análise descritiva, temperatura na superfície interna. 113
Tabela 24 – Análise descritiva, umidade relativa da superfície interna. 116
Tabela 25 – Análise descritiva, risco de formação de fungos filamentosos na superfície interna. 118
Tabela 26 – Resumo dos resultados críticos. 120
Tabela 27 – Tabela resumo condensação superficial, comparação das variáveis chuva dirigida e ocupação interna. 127

Tabela 28 – Temperatura e umidade relativa da superfície interior, modelos 01 ao 50. 128
Tabela 29 –Temperatura e umidade relativa da superfície interior (continuação), modelos 51 ao 104. 129
Tabela 30 – Tabela resumo risco de formação de fungos filamentosos, comparação das variáveis chuva dirigida e ocupação interna. 137
Tabela 31 – Resumo dos modelos. 155
Tabela 32 – Resumo dos resultados. 158
Tabela 33 – Resumo dos resultados da análise de sensibilidade. 161

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	*American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers*
BS	*British Standards*
DIN	*Deutsches Institut Für Normung* – Instituto Alemão de Normalização
EN	*European Standard*
EUA	Estados Unidos da América
IBT	*Fraunhofer Institute for Building Physics*
INMET	Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISO	*International Organization for Standardization*
LABEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC
LIM	*Lowest Isopleth for Mold* – Menor Isopleta para o mofo
NBR	Normas Brasileiras de Regularização
SiNAT	Sistema Nacional de Avaliações Técnicas
WUFI	*Wärme und Feuchte instationär – Transient Heat and Moisture*

Sumário

1. Introdução 17
1.1. Introdução ao tema 17
1.2. Justificativa 20
1.3. Delimitação do problema de pesquisa 21
1.4. Objetivo 21
1.4.1. Objetivos Específicos 21
1.5. Estrutura da dissertação 22
2. Revisão de literatura 23
2.1. Transporte de calor e massa em materiais construtivos 23
2.2. Desempenho termoenergético de edificações 26
2.3. Desempenho higrotérmico de edificações 28
2.4. Condensação superficial 31
2.5. Formação de fungos filamentosos 32
2.6. Análise de sensibilidade 34
2.6.1. Análise de sensibilidade local pelo Índice de Sensibilidade 36
2.6.2. Análise de sensibilidade global pela Análise de Variância Fatorial 37
2.7. Programas de simulação computacional 38
2.7.1. EnergyPlus 39
2.7.2. WUFI Pro 40
2.8. Pesquisas de desempenho higrotérmico 47
2.9. Legislações quanto ao desempenho higrotérmico 54
2.9.1. ISO 13788:2012 55
2.9.2. BS EN 15026:2007 55
2.9.3. ASHRAE 160:2016 56
2.9.4. BS EN ISO 15148:2002 57
2.9.5. BS ISO 24353:2008 58
2.9.6. ISO 12572:2016 58
2.9.7. ABNT NBR 15575:2021 59
2.9.8. ABNT NBR 15220-2:2022, 15220-3:2005 60
2.9.9. Diretriz SiNAT N°001:2017 60
2.9.10. Rascunho inicial do projeto de norma ABNT – Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento 62
3. Método 65
3.1. Primeira etapa – Definição das condições de contorno 68
3.1.1. Condições de contorno do projeto de norma ABNT 68

3.1.2. Variações para análise 69
3.1.3. Tipologia construtiva 74
3.1.4. Parede maciça de concreto moldada in loco 75
3.2. Segunda etapa – Simulações computacionais dos casos de análise 76
3.2.1. EnergyPlus 78
3.2.1.1. Parametrizações das simulações no *jEPlus* 79
3.2.1.2. Configurações iniciais 81
3.2.1.3. Propriedades térmicas dos materiais 82
3.2.1.4. Agendas de ocupação, iluminação e equipamentos 83
3.2.1.5. Temperatura do solo 85
3.2.1.6. Ventilação natural 85
3.2.1.7. Dados de saída 86
3.2.2. WUFI Pro 86
3.2.2.1. Elemento construtivo 87
3.2.2.2. Coeficientes de chuva incidente 88
3.2.2.3. Coeficientes superficiais de calor e umidade 88
3.2.2.4. Controle do período da simulação e controle numérico 90
3.2.2.5. Clima exterior e interior 90
3.2.3. WUFI Bio 91
3.3. Terceira etapa – Critérios de análise dos resultados 92
3.3.1. Teor de umidade total 93
3.3.2. Risco de condensação superficial 93
3.3.3. Temperatura e umidade relativa da superfície interna 94
3.3.4. Risco de formação de fungos filamentosos 94
4. Resultados 96
4.1. Análise de sensibilidade 96
4.1.1. Teor de umidade total 100
4.1.2. Risco de condensação superficial na superfície interna 101
4.1.3. Temperatura e umidade relativa na superfície interna 103
4.1.4. Risco de formação de fungos filamentosos na superfície interna 106
4.2. Análise descritiva 108
4.2.1. Teor de umidade total 108
4.2.2. Risco de condensação superficial na superfície interna 110
4.2.3. Temperatura e umidade relativa na superfície interna 112
4.2.4. Risco de formação de fungos filamentosos 117

4.3. Resultados críticos 119
4.3.1. Casos mais críticos do teor de umidade total 121
4.3.2. Casos mais críticos na condensação superficial 122
4.3.3. Casos mais críticos de temperatura e umidade relativa 127
4.3.4. Casos mais críticos na Formação de Fungos Filamentosos 132
4.4. Resumo dos resultados 137
5. Conclusões 141
5.1. Recomendações para trabalhos futuros 144
Referências 145
APÊNDICES 154
A. Tabela resumo dos modelos 155
B. Resumo dos resultados 158
ANEXOS 162
A. Rascunho inicial do projeto de norma ABNT 163

1. Introdução

1.1. Introdução ao tema

A função principal das edificações é proteger um ambiente fechado contra as intempéries naturais (KÜNZEL; HOLM, 2009). Nesse sentido, a envoltória desempenha um papel fundamental na edificação. As paredes externas estão constantemente expostas a ações climáticas e estão propensas a degradação a longo prazo. As condições climáticas provocam cargas térmicas e higrotérmicas na envoltória, como as trocas de calor, teor de água, e pressão parcial de vapor de água. Portanto, para a prevenção dos problemas relacionados à umidade é necessária a compreensão do desempenho higrotérmico das edificações (KÜNZEL; HOLM, 2009; LARA, 2023).

Níveis excessivos de umidade podem causar manifestações patológicas em edificações e afetar a qualidade do ar interno dos ambientes (BERGER *et al.*, 2015). Um dos problemas relacionados à umidade é o crescimento de fungos filamentosos que são prejudiciais à saúde dos ocupantes do ambiente contaminado. Esses fungos podem provocar problemas respiratórios, como crises de renite, crises de asma brônquica, aspergilose broncopulmonar alérgica, entre outros, especialmente quando esses fungos existem em grande quantidade no ambiente (BERGER *et al.*, 2015; GUERRA *et al.*, 2012; SEDLBAUER, 2001).

Os danos causados pela umidade também acometem a durabilidade da construção a partir do processo de biodeterioração causado por micro-organismos (GUERRA *et al.*, 2012). De acordo com Zanoni (2015), a umidade é uma das principais fontes de problemas nas construções, os materiais devem ser estanques, mas também permitir trocas de vapor para evitar alterações físicas, condensações, bolor, manchas e demais manifestações patológicas.

A umidade nos elementos construtivos pode causar deterioração dos materiais construtivos (HENRIQUES, 1994). Straube (2002) ressalta que a umidade é o agente que causa maior deterioração na edificação, como: a corrosão eletroquímica de

componentes metálicos em esquadrias e equipamentos de climatização; a deterioração química em revestimentos de gesso, telhas e madeira; as alterações de volume, inchaço e retração, que podem causar alterações visuais ou até mesmo falha estrutural ou rachaduras; a descoloração (manchas) nos acabamentos da edificação; a formação de micro-organismos como os fungos filamentosos; entre outros (HENRIQUES, 1994; STRAUBE, 2002).

A umidade também pode afetar o desempenho termoenergético da edificação e o consumo de energia. No transporte de umidade para o interior da edificação os materiais sofrem mudanças, e por resultado, também é modificado o consumo de energia da edificação. Mendes *et al.* (2003) afirma a importância de considerar a umidade no cálculo de carga térmica do edifício. Assim, o estudo do transporte de umidade e calor simultâneos, e do comportamento higrotérmico dos materiais da construção possibilitam estimativas de consumo de energia mais precisas, contribuindo com a economia de energia elétrica (MENDES, 1997; MENDES *et al.*, 2003).

No âmbito internacional, há diversas normas que levam em conta a umidade em edificações, como a norma ISO 13788 (ISO, 2012) que apresenta um método de análise de transporte de umidade unidirecional, a partir de cálculos simplificados. A norma BS EN 15026 (EN, 2007) aborda questões relacionadas à simulação do desempenho higrotérmico de edificações, por transferência de umidade e calor pelo método transiente, considerando o transporte unidirecional. A norma ASHRAE 160 (ASHRAE, 2016) apresenta critérios de projeto e de cargas internas para simulações computacionais. Entretanto, todas essas normas foram criadas para condições diferentes das encontradas nas edificações nacionais, seja quanto às condições climáticas ou quanto às características de uso da edificação. Enquanto parte das edificações, para as quais tais normas são aplicadas, geralmente adotam-se sistemas de climatização, uma parcela significativa das edificações brasileiras é ventilada naturalmente, principalmente quando se trata de habitações, onde ocorrem uma quantidade maior de problemas relacionados à umidade.

No Brasil, existem exigências relacionadas à umidade na norma NBR 15575 (ABNT, 2021a) quanto a ensaios de estanqueidade à água de coberturas e paredes, ensaios de absorção de água por paredes em áreas molháveis e pisos com lâmina d´água. Também há recomendações sobre cuidados a serem tomados em projetos

com o intuito de evitar infiltrações de água. Desse modo, a referida norma se limita aos aspectos quanto a água líquida e não aborda processos como o transporte e armazenamento de umidade em elementos construtivos, o que é importante para verificar questões relacionadas à durabilidade (BRITO; BELIZARIO-SILVA, 2022).

Ainda no contexto nacional, o Sistema Nacional de Avaliações Técnicas aborda fatores relacionados à umidade em documentos técnicos como a Diretriz SiNAT N°001 – Revisão n°03 – Diretriz para Avaliação Técnica, na qual é voltada para paredes estruturais de concreto moldadas *in loco* (SINAT, 2017). Este sistema construtivo, em especial, tem sido alvo de preocupação nas instituições de financiamento, nas construtoras e moradores das edificações. Como ressalta Afonso (2018), as paredes maciças de concreto armado têm causado manifestações patológicas como bolores no interior das edificações. Desse modo, foi criado um método de avaliação que considera o risco de condensação superficial de vapor d´água na superfície interna de fachadas de concreto, com o intuito de reduzir os problemas que acontecem em habitações de construídas em concreto armado moldadas ou não *in loco*. Entretanto, considerando que a ocorrência de bolor depende do substrato, da temperatura e umidade da superfície e do tempo de exposição à determinada condição ambiental, observar somente o risco de condensação superficial de vapor d'água não é suficiente para prevenir a ocorrência de manifestações patológicas. Nesse sentido, mesmo que o método seja o único disponível atualmente, em nível nacional, para se avaliar habitações por simulações, ainda precisa ser aprimorado.

A fim de colaborar com estudos sobre desempenho higrotérmico no país, o grupo de pesquisa GT Umidade da Comissão de Eficiência Energética da ABNT realiza discussões e pesquisas acerca do tema de desempenho higrotérmico em edificações. Atualmente está em processo de desenvolvimento o rascunho inicial do projeto de norma ABNT intitulado "Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento". O rascunho inicial do projeto de norma tem por objetivo estabelecer um procedimento padrão para a realização de simulações computacionais do desempenho higrotérmico de edificações a nível nacional. Foi baseado nas normas internacionais ASHRAE 160:2016 e BS EN 15026:2007, e adaptado para considerar as particularidades do país. Como critérios de avaliação, possui: o teor de umidade de cada camada da parede; umidade relativa da superfície interna e das camadas da parede; temperatura da superfície interna e das camadas

da parede; formação de fungos filamentosos na superfície interna; e temperatura e umidade relativa na superfície interna da parede.

Tratando-se de simulações higrotérmicas, no contexto atual, existem programas de simulação computacional adequados, precisos e validados que consideram regime transiente de trocas de calor e umidade (KÜNZEL, 1995). Existem também, programas pós-processadores que permitem realizar análises dos resultados das simulações computacionais no que diz respeito ao crescimento de fungos filamentosos nas superfícies (AFONSO, 2018). Os programas de simulação possuem um banco de dados de propriedades higrotérmicas de materiais da construção. No entanto, os materiais são de origem internacional, com propriedades diferentes dos materiais brasileiros. Há uma carência de propriedades higrotérmicas de materiais de construção brasileiros, dificultando a realização das simulações computacionais com a obtenção de resultados mais precisos em nível nacional. Principalmente em relação ao transporte de umidade, como as isotermas de sorção (BELIZARIO-SILVA; BRITO, 2024; ZANONI, 2015).

1.2. Justificativa

Diante da possibilidade de contribuição com o estado da arte no âmbito do desempenho higrotérmico de edificações, incluindo métodos e critérios de avaliação por simulações computacionais, características higrotérmicas de materiais, é de suma importância o desenvolvimento de pesquisas que possam completar essas lacunas.

No Brasil, universidades e centros de pesquisa realizam discussões acerca do desempenho higrotérmico dos sistemas construtivos utilizados no país. O grupo de pesquisa GT Umidade da Comissão de Eficiência Energética da ABNT realiza discussões acerca do tema e desenvolve o rascunho inicial do projeto de norma ABNT intitulado “Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento”. Esta pesquisa leva em conta as discussões do grupo de pesquisa GT Umidade, e aborda o rascunho inicial do projeto de norma que está em processo de desenvolvimento. A justificativa dessa pesquisa é contribuir com o desenvolvimento do rascunho inicial do projeto de norma, no que diz respeito às condições de contorno propostas.

1.3. Delimitação do problema de pesquisa

Considerando a importância do estudo da umidade nas edificações, as pesquisas de desempenho higrotérmico no contexto nacional se fazem necessárias, a fim de aprimorar as exigências encontradas atualmente e contribuir com as discussões nas normas e diretrizes brasileiras. O rascunho inicial do projeto de norma que está sendo desenvolvido, é sensível às mudanças das condições de contorno? As condições de contorno do rascunho inicial do projeto de norma, poderiam estar propostas de outra maneira?

1.4. Objetivo

Esta pesquisa tem por objetivo analisar e contribuir para a elaboração do rascunho inicial do projeto de norma ABNT “Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento” quanto a sensibilidade às variações das condições de contorno de produção de umidade, uso e ocupação.

1.4.1. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos dessa pesquisa são:

a) verificar o cenário atual de critérios de análise e métodos no contexto brasileiro e internacional;

b) testar o método de análise de desempenho higrotérmico do rascunho inicial do projeto de norma ABNT “Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento”;

c) contribuir para o GT Umidade da ABNT para a elaboração do projeto de norma de umidade em edificações;

d) analisar por meio de simulação computacional o sistema construtivo de concreto moldado *in loco*.

1.5. Estrutura da dissertação

A estrutura deste trabalho é dividida em cinco capítulos a fim de atender os objetivos apresentados, são eles: introdução, revisão de literatura, método, resultados e conclusão. O Capítulo 1 apresenta a introdução, com uma contextualização do tema de umidade em edificações, os problemas recorrentes da umidade e as normas atuais no contexto nacional. A justificativa, a delimitação do problema de pesquisa, o objetivo e os objetivos específicos.

No Capítulo 2 é abordada a revisão de literatura, com os fenômenos do transporte de calor e umidade em edificações. O desempenho termoenergético das edificações mostrando como a umidade impacta no consumo de energia. O desempenho higrotérmico das edificações, como as ações relacionadas à temperatura e à umidade simultâneas influenciam nos elementos construtivos. A condensação superficial e a formação de fungos filamentosos. Os tipos de análise de sensibilidade e a análise utilizada. Os programas de simulação computacional utilizados nesse trabalho. As pesquisas de desempenho higrotérmico no contexto nacional. E as legislações quanto ao desempenho higrotérmico.

O Capítulo 3 apresenta o método do trabalho, detalhando os materiais utilizados, as condições de contorno, simulações computacionais e os critérios de análise utilizados. No Capítulo 4 é apresentado a análise dos resultados e das simulações computacionais realizadas, com a análise de sensibilidade, seguida da análise descritiva, e a análise dos casos críticos. Por fim, o Capítulo 5 apresenta conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão de literatura

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica que embasou a pesquisa, mostrando a importância das condições de contorno avaliadas. Sendo elas: fenômenos de transferência de calor e massa em materiais da construção civil, o desempenho termoenergético e desempenho higrotérmico de edificações, as metodologias de análise, as pesquisas no âmbito da umidade em edificações e as legislações quanto ao desempenho higrotérmico.

2.1. Transporte de calor e massa em materiais construtivos

Existe uma complexidade nos fenômenos que causam a origem, transporte e armazenamento da umidade nas edificações. O conhecimento das formas de manifestações de umidade é de grande importância a fim de identificar suas respectivas causas (HENRIQUES, 1994; NASCIMENTO, 2016).

Para a fundamentação nos fenômenos físicos de transferência de calor e massa é necessário o conhecimento do conceito de umidade. O ar atmosférico é formado pela presença de uma mistura de gases e de vapor de água, e possui uma determinada quantidade de vapor de água (AFONSO, 2018; HENRIQUES, 1994).

A quantidade de água no ar varia conforme as condições meteorológicas do local, e é chamada de umidade absoluta. A umidade absoluta é determinada indiretamente a partir da temperatura e da umidade relativa, e são medidas através de equipamentos específicos. O limite de saturação é a quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter, este limite tem relação direta com a variação de temperatura, aumentando ou diminuindo conforme a temperatura do ar aumenta ou diminui respectivamente (HENRIQUES, 1994).

A umidade relativa (*Hr*), por sua vez, é a razão entre a quantidade de vapor que contém no ar (umidade absoluta *W*) e a quantidade máxima que pode conter com essa temperatura (limite de saturação *Wsat*), como é representado na Equação 1 (HENRIQUES, 1994).

$$Hr = \frac{W}{Wsat} . 100\ (\%)$$ (Equação 1)

Visto isso, a umidade relativa varia conforme a temperatura do ar, e enquanto a quantidade de vapor de água que o ar contém se mantém a mesma. Quando a temperatura aumenta, a umidade relativa diminui, pois o limite de saturação é maior devido a temperatura. Quando a temperatura diminui, o limite de saturação é menor, assim, a umidade relativa aumenta (HENRIQUES, 1994). O fenômeno de condensação ocorre quando o ar chega ao seu limite de saturação, em determinada temperatura, irá ocorrer condensação das quantidades de vapor de água em excesso (HENRIQUES, 1994; PINHEIRO, 2013; PIRES, 2020).

Os materiais da construção utilizados no Brasil são porosos, e possuem ar e água em diferentes fases no seu interior, sendo assim, estão constantemente submetidos a gradientes de temperatura e de conteúdo de umidade. Os materiais porosos estão presentes em toda parte da construção, como o caso dos tijolos, argamassas, telhas, concreto, madeira, entre outros (MENDES, 1997). Segundo Mendes (1997), em elementos construtivos porosos, o estudo higrotérmico é bastante complexo, devido a dificuldade de representar a estrutura dos poros desses materiais.

Diversos mecanismos de transporte são responsáveis pela transferência de umidade dentro do meio poroso. Os processos de migração dependem de como as moléculas de água se fixam, se movimentam e interagem na estrutura porosa dos materiais. Os poros são espaços vazios entre os sólidos que permitem o fluxo de fluidos. Em função do conteúdo de umidade, podem existir poros preenchidos ou não por água. A transferência de vapor nos poros não preenchidos ocorre por difusão, enquanto nos poros preenchidos, acontecem na fase líquida por meio de condensação, migração capilar e evaporação (MENDES, 1997).

Em uma estrutura porosa, o vapor de água pode se fixar e transmitir umidade tanto na fase líquida, como também na forma de vapor. O transporte da água para o interior do material ocorre por meio de mecanismos que dependem das dimensões dos poros e da umidade relativa. Na forma de vapor a água é fixada nos poros superficiais pelos processos de adsorção física, e é transferida para regiões mais internas à superfície pela evaporação e difusão de vapor. Na fase líquida a água é

transportada para o interior do material pelo processo de capilaridade, que ocorre em função do contato entre os poros e a fase líquida da água (SATO, 1998).

Em meios porosos não saturados, a absorção de água líquida por capilaridade é o mecanismo frequentemente encontrado nos materiais construtivos, devido aos ciclos de molhagem e secagem frequentes (MENDES, 2009; SATO, 1998). A absorção ocorre por três fases: a primeira compreende o preenchimento com água nos poros de maior diâmetro; seguida pela segunda fase, mais lenta, em que são preenchidos os poros mais finos; a terceira e última fase compreende a estabilização da quantidade de água absorvida (AZEVEDO, 2002; BS EN, 2002; MENDES, 2009).

A adsorção de vapor de água em um material é um fenômeno decorrente das interações físicas entre as moléculas de ar e a superfície do material. A água adsorvida forma camadas de moléculas que se aderem à superfície dos poros, esse processo prossegue até que seja alcançado o equilíbrio termodinâmico entre o meio e a camada adsorvida (SATO, 1998). O fenômeno de adsorção de umidade ocorre pelo processo em que a umidade do ar é adsorvida até que seja atingido o equilíbrio no material. Já o processo de dessorção de umidade ocorre quando a umidade do material é dessorvida para o ar até que o equilíbrio seja alcançado (BS ISO, 2008).

A permeabilidade ao vapor de água (Equação 2) de um material é a quantidade de vapor de água que passa pela superfície do material por unidade de tempo, em materiais homogêneos, é o produto entre a permeância ao vapor de água (*W*) e a espessura do corpo de prova (*d*). A permeância ao vapor de água (Equação 3) é a densidade da taxa de fluxo do vapor de água (*G*), dividida pela diferença de pressão do vapor de água (Δp) nas superfícies do material, levando em conta a área (*A*), em condição de estado estacionário. É definido como resistência à difusão de vapor de água (Equação 4) o inverso da permeância ao vapor de água (*W*) (CIB W040, 2012; HENRIQUES, 1994; ISO, 2016). O fator de resistência ao vapor de água (Equação 5) indica quanto maior é a resistência do material em comparação com uma camada com igual espessura de ar na mesma temperatura, é dado pela permeabilidade de vapor de água do ar (δ_{air}) dividido pela permeabilidade de vapor de água (δ) do material (ISO, 2016).

$$\delta = W \,.\, d \qquad \text{(Equação 2)}$$

$$W = \frac{G}{A \,.\, \Delta p} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$Z = \frac{1}{W} \quad \text{(Equação 4)}$$

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta} \quad \text{(Equação 5)}$$

Dependendo das condições em que se encontram o material construtivo, a umidade no seu interior pode ocorrer nas fases de vapor, de líquido ou sólida. Os diferentes estados físicos da umidade no material estão constantemente ocorrendo a partir de condições naturais (LARA, 2023). Os materiais construtivos são higroscópicos, ou seja, possuem poros na sua estrutura, capazes de absorver a umidade do ar, variando a umidade do ar e, o teor de umidade do material. O teor de umidade representa a quantidade de água contida nos poros de um material, em relação ao seu volume ou massa. Independente da sua fase, portanto é a soma de vapor, líquido e sólida (AFONSO, 2018; ZANONI, 2015).

Foram abordados os fenômenos físicos de armazenamento e transporte de calor e de massa, a seguir serão abordados como esses fenômenos afetam o desempenho termoenergético e higrotérmico de edificações.

2.2. Desempenho termoenergético de edificações

A eficiência energética em edificações tem se tornado cada vez mais relevante, devido ao aumento dos custos de energia elétrica e dos impactos ambientais relacionados ao consumo excessivo de energia (BULIGON *et al.*, 2022; TRINDADE; COELHO; HENRIQUES, 2021). Na análise energética das edificações é importante considerar o armazenamento e transporte de umidade nos materiais. A umidade presente nos materiais da envoltória das edificações pode ter um impacto significativo nas características internas de conforto e no consumo de energia elétrica dos ambientes (MENDES, 1997; MENDES *et al.*, 2003).

Segundo Mendes (1997), a interação entre calor e umidade afeta o balanço energético da edificação. Sendo que a condensação ou evaporação da água corresponde ao calor latente, enquanto a diferença de temperatura entre o ar e a superfície da parede está relacionada à parcela de calor sensível. Essas propriedades

influenciam a carga total e demonstram a importância de considerar a umidade em modelos de simulação (MENDES, 1997).

De acordo com Beber *et al.* (2023b) Em relação à condição de verão e ao resfriamento do ar, a parcela de energia gasta referente a mudança de estado da água, a desumidificação, é a carga térmica do calor latente. E a parcela de energia referente a diferença de temperatura entre o ar exterior e o interior, é a carga térmica do calor sensível. O processo de desumidificação pode impactar significativamente o contexto geral do consumo de energia do sistema de climatização. É importante considerar a parcela de calor latente, principalmente em relação a condição de verão para determinados climas brasileiros (BEBER *et al.*, 2023b).

Em determinadas épocas do ano, nas regiões do país que possuem clima quente e elevada umidade relativa, os sistemas de climatização artificial precisam resfriar (que corresponde à carga de calor sensível) e desumidificar (carga térmica de calor latente), para garantir o controle da umidade relativa nos ambientes. Esse processo é responsável por uma parcela considerável do gasto de energia elétrica dos sistemas de climatização artificial (AZEVEDO, 2002).

No âmbito desse tema, a *International Energy Agency* - Agência Internacional de Energia (IEA) em um documento intitulado *EBC Annex 41 – Whole building heat-air-moisture response* (Anexo 41 – Resposta de todo edifício ao calor, ar e umidade), aborda a relação entre o consumo de energia elétrica e o equilíbrio de calor, ar e umidade nas edificações. Esta pesquisa foi motivada pela constatação de que as condições de calor, ar e umidade presentes nos edifícios podem afetar tanto o conforto dos ocupantes quanto influenciar o consumo de energia e a durabilidade da envoltória da edificação. O documento ressalta a importância do conhecimento sobre a umidade em edificações, que requer uma abordagem combinada de modelagem, testes e experiência prática em campo (HENS, 2015; IEA, 2013, 2023).

A IEA em outro documento, intitulado *EBC Annex 55 – Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting. Probability Assessment of Performance & Cost* (Anexo 55 – Confiabilidade da modernização de edifícios com eficiência energética. Avaliação de probabilidade de desempenho e custo), desenvolveu métodos e ferramentas probalísticas para prever o consumo de energia, e avaliar o desempenho higrotérmico de edificações. Uma das ferramentas probalísticas avaliadas foi a análise de sensibilidade a partir de um estudo de comportamento higrotérmico. Como

conclusões, apresenta as vantagens e desvantagens de cada tipo de análise de sensibilidade avaliada. O Anexo 55 aplicou os métodos em estudos de casos reais visando melhorar a eficiência energética, assegurar o desempenho esperado e conduzir análises de custos (IEA, 2015a, 2015b, 2015c, 2015d, 2015e, 2023).

Além de afetar o consumo de energia elétrica e o desconforto térmico, a umidade também pode causar degradação e deterioração dos elementos construtivos (MENDES, 1997). A umidade é amplamente reconhecida como uma fonte significativa de problemas em edificações, prejudicando sua durabilidade, afetando a qualidade do ar interno e tendo impactos negativos na saúde dos ocupantes (HENS, 2015). Portanto, o estudo da umidade em edificações é crucial para o dimensionamento correto de equipamentos e sistemas de condicionamento de ar, visto que considera tanto as cargas sensíveis quanto as latentes. Para estimativas mais precisas de consumo de energia elétrica, para a implementação de políticas de conservação energética (MENDES, 1997; MENDES *et al.*, 2003), e para evitar os problemas e as manifestações patológicas relacionadas a umidade nas edificações.

2.3. Desempenho higrotérmico de edificações

Segundo o *International Council for Research and Innovation in Building and Construction* (CIB), no documento intitulado *Heat, air and moisture transfer terminology: Parameters and concepts* (Terminologia de transferência de calor, ar e umidade: Parâmetros e conceitos) o comportamento higrotérmico é o campo da física das construções que estuda simultaneamente o transporte de calor, ar e massa nas edificações e nos seus elementos construtivos (CIB W040, 2012; ZANONI, 2015). Mostra como as ações relacionadas a temperatura e a umidade influenciam os elementos construtivos. Também está relacionado ao desempenho dos materiais e sistemas construtivos da edificação (AFONSO, 2018; NASCIMENTO, 2016).

A origem da umidade nas edificações pode ser difícil de encontrar, pois, além de ter influência de diversos fenômenos, há uma grande quantidade de mecanismos de transportes. Os fenômenos podem ocorrer, frequentemente, em conjunto, pois uns podem ser consequência dos outros. Existem diversas formas de manifestação de umidade: a umidade de construção, a umidade ascensional vinda do solo, a umidade de precipitação, a umidade de condensação, a umidade devido a propriedades

higroscópicas dos materiais e a umidade gerada por atividades de pessoas (HENRIQUES, 1994; KARAGIOZIS; SALONVAARA, 2001). A umidade inicial da construção ocorre devido a quantidade de água contida nos materiais e também ocorre pelo clima externo, a partir da ação de chuvas e da umidade relativa do ar durante a construção. A edificação pode conter uma quantidade significativa de teor de água no final da construção. A umidade também pode estar presente devido à ação das chuvas, que em maior intensidade de ventos pode acometer as paredes, que ficam sujeitas a molhagem. O que constitui um fator de risco de umidade, acarretando na diminuição da resistência térmica dos materiais e também no aumento da condutibilidade térmica, podendo propiciar condensações (HENRIQUES, 1994).

Uma das principais fontes de umidade em edificações é a chuva dirigida (WDR) conhecida como *Wind-driving rain* ou *driving rain*. Decorrente da ação do vento sobre a precipitação, possui uma direção horizontal e cai obliquamente na fachada (BLOCKEN; CARMELIET, 2004; ZANONI; SANCHEZ; BAUER, 2018). É uma fonte que afeta diretamente o desempenho higrotérmico e a durabilidade das edificações, pois pode causar variações dimensionais nos materiais da fachada como a dilatação, contração, expansão e retração pelos processos de molhagem e secagem (SOCOLOSKI *et al.*, 2023; ZANONI; SANCHEZ; BAUER, 2018). As consequências da incidência da chuva nas fachadas podem se manifestar de diversas maneiras. O acúmulo de umidade em materiais porosos pode resultar na infiltração de água, danos causados por geada, descoloração devido à eflorescência e fissuras estruturais decorrentes de gradientes térmicos e de umidade. Como também, o escoamento e o impacto da chuva dirigida contribuem para o surgimento de padrões de sujeira na superfície das fachadas, os quais se tornaram características de muitas edificações (BLOCKEN; CARMELIET, 2004; PÉREZ-BELLA *et al.*, 2018).

A maioria dos sistemas construtivos estão propensos a absorver ou perder umidade quando submetidos a variações de umidade relativa e temperatura (NASCIMENTO, 2016). As influências do transporte de umidade para o interior da edificação ocorrem de formas diferentes em sistemas construtivos do tipo leve e do tipo pesado (KARAGIOZIS; SALONVAARA, 2001). A construção das edificações é feita de maneira similar em várias regiões do país, desconsiderando o efeito da localização no desempenho da edificação, o que aumenta o risco de manifestações patológicas relacionadas a umidade (MORISHITA *et al.*, 2016). Como o exemplo da

utilização do sistema construtivo com paredes de alvenaria de bloco cerâmico, no qual é utilizado na maioria das regiões do Brasil, independente das condições climáticas do local (MORISHITA *et al.*, 2016).

Os principais métodos construtivos utilizados no país estão propensos a riscos de umidade em todas as regiões, como é um exemplo também do concreto moldado *in loco* utilizado em diversas habitações de interesse social do país (AFONSO, 2018; MORISHITA, 2020; PINHEIRO, 2013). Com a alta demanda habitacional no país, a indústria da construção buscou métodos construtivos aliando a rapidez, produtividade e economia. Para produção em larga escala, o concreto moldado *in loco é* uma opção amplamente utilizada, que, devido sua velocidade de execução tem sido um fator decisivo para a escolha da técnica, a fim de suprir a alta demanda habitacional. Esse tipo de construção oferece vantagens como maior produtividade e redução de custos, devido à montagem rápida e à redução de resíduos no canteiro de obras. No entanto, esse sistema também tem suas desvantagens, como a umidade e o desempenho higrotérmico insatisfatório (AFONSO, 2018; COSTA, 2013; SACHT, 2008). Segundo Afonso (2018), o desempenho higrotérmico baixo deste sistema levou ao aparecimento de manifestações patológicas em diversas habitações de interesse social, principalmente a formação de fungos filamentosos nas paredes, situação, esta, que causa preocupação aos moradores e também aos órgãos de financiamento dessas edificações (AFONSO, 2018).

Nesse contexto, é necessário um desempenho higrotérmico satisfatório da envoltória, pois a função principal das edificações é a proteção contra as intempéries externas. As condições climáticas provocam cargas térmicas e higrotérmicas no envelope da construção, como as trocas de calor, teor de água e pressão parcial de vapor de água entre as superfícies da envoltória da edificação. Existem diversas variações na superfície externa da parede durante apenas um dia, e apenas uma parte delas é transmitida para o interior. E existem diversos ciclos que se sobrepõem como as estações, o dia e a noite, a radiação solar e a chuva incidente. Portanto, para uma análise precisa do desempenho higrotérmico, é necessário o conhecimento dos padrões das condições externas, que são, em geral, repetitivos e podem ser avaliados a partir de dados climáticos representativos do local que será construída a edificação (KÜNZEL; HOLM, 2009; PIRES, 2020).

O risco potencial de umidade em edifícios está presente em diversas regiões brasileiras, principalmente as que possuem condições climáticas de altos valores de pressão de vapor externo, altas taxas de chuva com ação do vento e regiões densamente povoadas (MORISHITA, 2020; PINHEIRO, 2013). A realidade do país é que os problemas relacionados a umidade nas edificações são encarados como algo inevitável, como as condensações e o crescimento de fungos filamentosos. Há predomínio da mesma técnica construtiva em diversas regiões do país, que, aliado ao alto risco de umidade, resulta em um desempenho insatisfatório das edificações (MORISHITA *et al.*, 2016). É fundamental considerar alternativas às técnicas construtivas, considerando o clima específico da região, e adotar medidas que melhorem o desempenho higrotérmico das edificações. Nas próximas seções, serão abordados os dois aspectos que serão avaliados neste estudo, a condensação superficial e a formação de fungos filamentosos nas edificações.

2.4. Condensação superficial

A condensação é a transformação do estado físico da água de gasoso para líquido, que ocorre quando o ar a uma determinada temperatura não possui capacidade para conter mais vapor de água, ocorrendo condensação do excesso de umidade absoluta. As condensações superficiais causam um aumento na condutividade térmica dos materiais, e consequentemente, a diminuição da resistência térmica dos elementos construtivos (HENRIQUES, 1994; RIBEIRO, 2013). As condensações superficiais nas paredes internas das edificações ocorrem quando a sua superfície está com a temperatura mais baixa que a temperatura do ponto de orvalho. Essa diferença de temperatura somada a alta produção de vapor de água acomete no aumento da umidade relativa da camada de ar em contato com elas, podendo provocar condensações superficiais (HENRIQUES, 1994; JORNE, 2010; PIRES, 2020). A presença de condensação superficial é maior em elementos menos isolados e nas pontes térmicas, como os elementos estruturais, os vidros e as paredes com baixa resistência térmica, pois possuem maior variação de temperatura entre a superfície e o ambiente (HENRIQUES, 1994; HOLM; KUENZEL; SEDLBAUER, 2003; JORNE, 2010; PIRES, 2020).

Segundo Henriques (1994), a ocorrência de condensações superficiais pode ser reduzida com as seguintes condições: melhora do isolamento térmico do edifício, em que a temperatura superficial da parede não terá uma diferença significativa em relação a temperatura do ar ambiente e, consequentemente, menor o risco de condensações; aumento da temperatura do ambiente, para que o limite de saturação se torne maior que a umidade absoluta do ar; e a melhora da ventilação, para que o excesso de umidade no interior da edificação passe a ser transportado para o exterior pela renovação do ar por janelas ou por dispositivos mecânicos (HENRIQUES, 1994).

Em períodos de inverno, a edificação possui maior risco de condensação superficial de vapor d´água, pois a umidade produzida no interior dos ambientes, em contato com as superfícies das paredes com temperaturas mais frias, pode ocasionar a condensação, e, consequentemente, maior retenção de umidade nos materiais construtivos, o que favorece o crescimento de fungos filamentosos (GUERRA, 2012). No entanto, para o crescimento de fungos filamentosos não é necessária a ocorrência de condensação. A condensação, nesse caso, pode ocorrer em umidade relativas mais baixas que o ponto de saturação, ou seja, que não atingiram a temperatura do ponto de orvalho (SEDLBAUER, 2001). O que torna a avaliação apenas de condensações superficiais, insuficiente para a prevenção de ocorrência de degradação nos materiais construtivos das edificações, sendo necessário mais critérios de análises (AFONSO, 2018).

2.5. Formação de fungos filamentosos

Nas edificações, a presença de fungos filamentosos pode resultar em problemas relacionados a qualidade do ar dos ambientes. Pode acarretar doenças aos seres humanos, como micoses de pele, micotoxicoses pela ingestão de alimentos contaminados ou inalação de poeira e esporos contaminados, e as alergias respiratórias como a rinite alérgica, a asma, a bronquite, entre outros. Os fungos também causam a degradação dos materiais construtivos da edificação, a penetração das suas hifas nas superfícies dos materiais pode chegar a 8 mm de profundidade. A degradação ocorre com o processo de biodeterioração pela ação de ácidos gerados no processo metabólico dos fungos (PINHEIRO, 2013; SEDLBAUER, 2001).

No reino dos fungos, os fungos filamentosos são os responsáveis pelas degradações nas superfícies dos materiais das edificações. Os fungos filamentosos são os agentes responsáveis pelo bolor e a sua presença é notada pela formação de manchas devido a presença de micélio, que é o conjunto de hifas (GUERRA, 2012). Conforme Guerra (2012), no ciclo de vida dos fungos filamentosos, apresentado na Figura 1, primeiro se tem os esporos (1), que podem estar dispersas no ar, na água, em insetos, de forma microscópica, e, ao se fixarem ao substrato, podem germinar. Com a germinação do esporo (2), se dá o crescimento de filamentos, que por sua vez, iniciam a produção das hifas (3), que são os agentes degradadores que atacam os materiais para quebrar a sua matéria orgânica. Um conjunto de hifas se caracteriza como micélio (4), que se manifesta na superfície dos materiais de forma macroscópica, e iniciam a produção de novos esporos através de estruturas reprodutivas (GUERRA, 2012; GUERRA *et al.*, 2012).

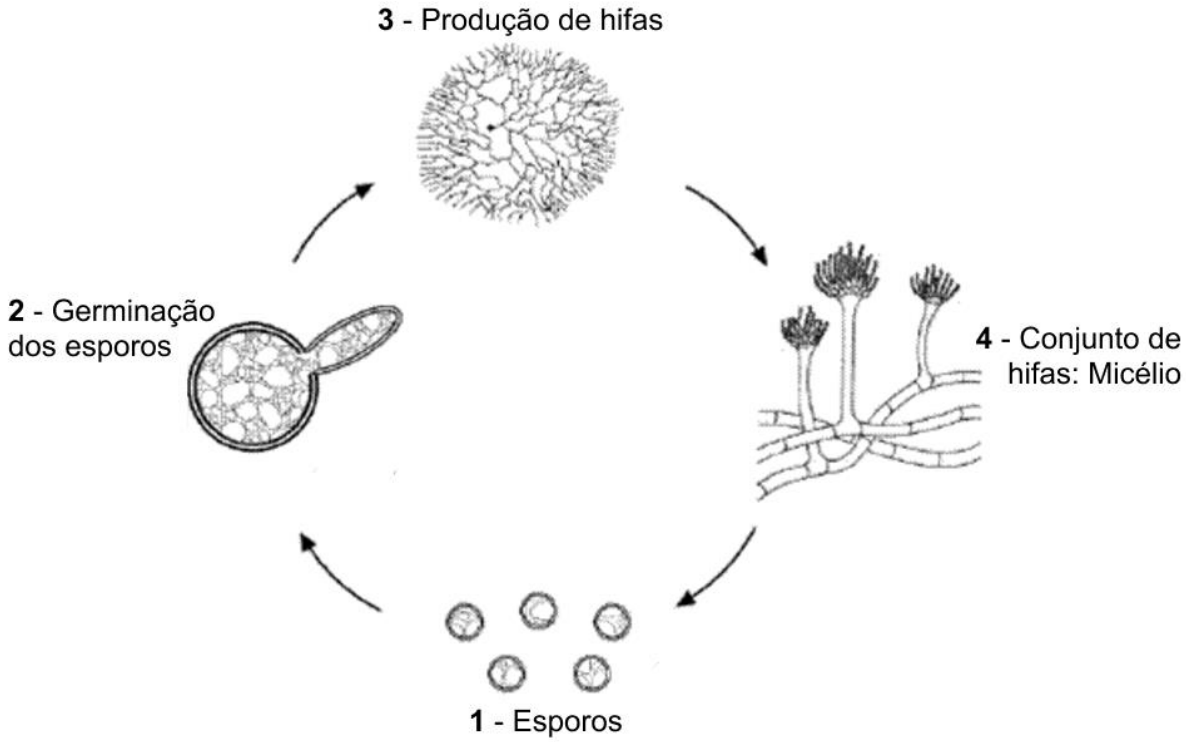


Figura 1 – Ciclo de vida dos fungos filamentosos
Fonte: Adaptado de ECOMETREX (2011 apud Guerra, 2012 p.85).

Os fatores que mais afetam no crescimento dos fungos são: a temperatura, a umidade relativa, o tipo de substrato, o pH da superfície, a quantidade de oxigênio e, por último, o tempo para que todas as condições favoráveis ocorram simultaneamente (GUERRA *et al.*, 2012; SEDLBAUER, 2001). Um critério decisivo para o crescimento de fungos é a umidade relativa, pois a formação de fungos pode ocorrer com valores

inferiores ao limite de saturação. A maioria dos fungos necessitam de 80% de umidade relativa para seu crescimento (SEDLBAUER, 2001).

Segundo Guerra (2012) na cidade de Pelotas/RS, cidade do estudo, os principais gêneros de fungos filamentosos encontrados são *Penicillium, Paecilomyces, Cladosporium, Fusarium* e *Trichoderma*. Esses ocorrem, em média, com uma temperatura mínima de 0°C para germinação do esporo e -5°C para crescimento do micélio. Com uma umidade relativa a partir de 78% já ocorre a germinação do esporo, e a partir de 75% o crescimento do micélio de um dos gêneros de fungo. A média das umidades relativas mínimas para ocorrência dos fungos analisados é de 80%, reforçando o limite de Sedlbauer (2001).

Assim sendo, como visto nesta seção, as edificações no país apresentam riscos de elevados valores de umidade, e dessa forma, estão sujeitas à ocorrência de problemas como condensações e fungos filamentosos, os quais, por sua vez, causam a degradação dos materiais construtivos e afetam a saúde dos moradores.

2.6. Análise de sensibilidade

Uma etapa importante em pesquisas sobre temas relacionados a fenômenos de transporte de calor e umidade em edificações é o método de análise. Pesquisas que envolvem diversos parâmetros necessitam de um método de análise criterioso, e que atenda a especificidade da pesquisa. A análise de sensibilidade traz métodos eficazes e fornecem informações pertinentes sobre os quesitos mais influentes dos resultados (GOFFART; RABOUILLE; MENDES, 2017; HAMBY, 1994).

Identificar os parâmetros que mais afetam os resultados é chamado de análise de sensibilidade. Os objetivos das análises de sensibilidade podem ser: identificar quais parâmetros necessitam de mais pesquisas para reduzir a incerteza dos resultados; quais podem ser removidos do modelo por não produzir impactos; quais geram maior impacto na variabilidade dos resultados; e como as mudanças nos parâmetros afetam o modelo. O objetivo de cada um dos tipos de análise de sensibilidade é responder a uma ou mais dessas perguntas (HAMBY, 1994). A análise depende do objetivo a ser estudado, pois determina a escolha do método adequado. Da mesma forma, a escolha das variáveis e dos intervalos de variação devem ser adaptados ao objetivo. Existem diversos métodos desenvolvidos de análise de

sensibilidade e a escolha depende do caso de aplicação (GOFFART; RABOUILLE; MENDES, 2017).

A análise de sensibilidade tem sido utilizada com diversas aplicações, como no auxílio na tomada de decisão do projeto de edificações, na calibração de modelos energéticos, no *retrofit* de edificações, na gestão de imóveis, na avaliação do impacto das mudanças climáticas nas edificações (IEA, 2015b; SILVA, 2016; TIAN, 2013). Na área da pesquisa também tem sido utilizada na análise de desempenho higrotérmico de edificações (GOFFART; RABOUILLE; MENDES, 2017; FERREIRA, 2013; ZANONI, 2015), para análise do desempenho térmica e energético (SILVA, 2016; SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2016; TONDO, 2017), para a análise de sensibilidade de parâmetros de eficiência energética em edificações (SILVA; GHISI, 2013). Como também, para análise de sensibilidade de propriedades higrotérmicas de materiais (BELIZARIO-SILVA; BRITO, 2024).

A maioria dos métodos de análise de sensibilidade envolvem a execução de um grande número de simulações, portanto, é importante automatizar o processo de configuração de diversas combinações de entradas das variáveis. No entanto, quanto mais aspectos de interface o programa de simulação tiver, mais difícil será a implementação da análise de sensibilidade, pois a análise necessita de automatização das variáveis, e uma rápida configuração para a geração de diversas simulações simultâneas. Algumas ferramentas computacionais auxiliam nesse processo, como o *EnergyPlus* para análise energética em que utiliza arquivos de texto de fácil edição, e o *jEPlus* no qual realiza simulações paramétricas com diversas combinações de variáveis (DOE, 2018; TIAN, 2013; ZHANG, 2020).

A análise de sensibilidade apresenta diversos termos e definições, o entendimento do método necessita da definição correta desses termos. Como os termos “variável independente” e “variável dependente”. A “variável independente” é aquela variável relacionada a entrada de um modelo, como o número de ocupantes de uma edificação, o padrão de ventilação e o tipo do sistema construtivo. O termo “variável dependente” é o termo que designa os critérios de análise, como o teor de umidade total, a temperatura e a umidade relativa (SILVA, 2016).

Na literatura diversos autores criaram suas próprias etapas, por esse motivo, existem diversos passos para realizar uma análise de sensibilidade do desempenho de edificações. As etapas típicas são: (01) determinar as variáveis dependentes e

independentes; (02) criar os modelos da edificação; (03) executar as simulações da edificação; (04) coletar os resultados das simulações; (05) e, por fim, executar a análise de sensibilidade, analisando as influências e a importância relativa entre as variáveis (SILVA, 2016; TIAN, 2013).

A literatura divide a análise de sensibilidade em dois grandes grupos quando se trata de simulação computacional de edificações, a análise de sensibilidade local e a global (TIAN, 2013). O método local se concentra no impacto individual de uma variável, mantendo todas as outras constantes, é aplicada a variáveis específicas para um estudo mais detalhado, explorando diferentes níveis de variação dessas variáveis. É o método mais simples, rápido e demanda pouco esforço da máquina, como exemplos existem o método de análise de sensibilidade básico e o índice de sensibilidade (IEA, 2015a; SILVA, 2016; TIAN, 2013).

A análise global, por outro lado, busca avaliar como as variáveis afetam todo o conjunto de dados, considerando a interação entre elas, combinando as variáveis entre si. A análise global possui diversos métodos, como o de regressão (SRC, SRRC e t-value), os baseados em triagem (Morris), os métodos baseados em variância (FAST, Sobol e ANOVA) e de abordagens de meta modelos (MARS, ACOSSO e SVM). A desvantagem da análise global é a alta demanda computacional e o alto tempo de simulação, o que torna a análise mais complexa (SILVA, 2016; TIAN, 2013).

2.6.1. Análise de sensibilidade local pelo Índice de Sensibilidade

A análise de sensibilidade local a partir do índice de sensibilidade, busca analisar qual é a variável mais influente utilizando um “caso base” e variando uma variável de cada vez, resultando em poucos modelos e uma rapidez de execução. É calculada a partir da Equação 6 abaixo, de acordo com Hamby (1994), em que $D_{máx}$ e $D_{mín}$ são os valores máximos e mínimos das variáveis. É verificada a diferença do valor máximo e mínimo da variável e é dividido pelo valor máximo da variável (HAMBY, 1994).

$$SI = \frac{D_{máx} - D_{mín}}{D_{máx}} \quad \text{(Equação 6)}$$

Em relação as etapas para a análise local, Silva (2016) criou as seguintes etapas: (01) definir os níveis de variação das variáveis independentes; (02) criar amostra de variáveis independentes, com o modelo "*one-at-a-time*" variando uma variável de cada vez; (03) realizar as simulações paramétricas; (04) criar os gráficos das variáveis independentes e variáveis dependentes; (05) calcular os índices de sensibilidade para cada variável independente; (06) e, por fim, interpretar os resultados (SILVA, 2016).

O ponto negativo dessa análise é que ao utilizar o procedimento de "*one-at-a-time*" a não simultaneidade das variações de entradas leva a não considerar a interação entre as variáveis. Em caso de simulações de construção, os fenômenos envolvidos interagem entre si, fazendo com que a análise local não seja recomendada em casos de simulações de edificações (GOFFART; RABOUILLE; MENDES, 2017).

2.6.2. Análise de sensibilidade global pela Análise de Variância Fatorial

A escolha do método depende do objetivo da análise, cada método possui uma aplicabilidade, com pontos positivos e negativos. O método de análise por variância fatorial completa, ANOVA (Análise de variância), é um método conhecido e comum conforme Yates (1963), e é usado para avaliar quais variáveis podem ser consideradas influentes em uma simulação. É eficiente quando são utilizadas poucas variáveis e poucos níveis de variação, pois consiste na combinação de todas as variáveis entre si simultaneamente, resultando em um grande número de simulações. A amostra multivariada fatorial é calculada conforme a Equação 7 abaixo, em que "a" é o número de níveis do parâmetro A, a letra "b" é o número de níveis do parâmetro B, e assim respectivamente com a multiplicação entre todas as variáveis. Outro aspecto é que as variáveis podem ter diferentes quantidades de níveis em cada uma delas (SILVA, 2016; YATES, 1963).

$$Amostra = a \,.\, b \,.\, c \,.\, d \qquad \text{(Equação 7)}$$

Como medida de sensibilidade a análise de variância utiliza o valor-F que analisa qual a variável mais influente por meio de um fator adimensional. O valor-F é a razão entre a média dos quadrados de cada termo, da variável ou da combinação das variáveis, e a média dos quadrados dos resíduos do tratamento. Quanto maior o

valor-F, maior é a influência da variável ou das variáveis combinadas (SANTOS; PORTO; SILVA, 2020; SILVA, 2016).

A análise de variância permite a análise de cada variável independente, definida como interações de primeira ordem. Como também analisa um conjunto de duas variáveis mais influentes, definida interações de segunda ordem. Um ponto positivo desse método é que permite a análise da interação de duas variáveis combinadas, em que duas variáveis possam ter mais influência do que uma variável individual, como observado por Silva (2016) em seus resultados. Esse método é bastante completo e eficaz, no entanto, a desvantagem é o tamanho da amostra, no qual se torna demasiado grande devido as combinações entre de todas as variáveis entre si (SALTELLI *et al.*, 2008; SANTOS; PORTO; SILVA, 2020; SILVA, 2016; YATES, 1963).

Os passos para esse método segundo Silva (2016), são: (01) definir os níveis de variação de cada uma das variáveis independentes, pode ser utilizados níveis diferentes para cada uma; (02) criar a amostra fatorial completa, combinando todas as variáveis entre si simultaneamente, pode ser utilizado um *script* computacional na linguagem R para a criação da amostra, como os disponibilizados por Silva (2016); (03) realizar as simulações paramétricas de todos os modelos; (04) calcular os índices de sensibilidade de primeira e segunda ordem, a partir de um *script* computacional na linguagem R, como os disponibilizados por Silva (2016); (05) criar os gráficos das variáveis independentes e variáveis dependentes; (06) e, por fim, interpretar os resultados pelo valor-F (SILVA, 2016).

Nesse estudo, a análise de sensibilidade será realizada na última etapa do método, no capítulo “4. Resultados”, a partir de uma análise global pelo método de variância fatorial completa ANOVA, conforme Yates (1963).

2.7. Programas de simulação computacional

Atualmente, os fenômenos de transporte higrotérmico são amplamente compreendidos e podem ser avaliados por programas computacionais que foram desenvolvidos em diversos países ao longo dos últimos anos (HOLM; KUENZEL; SEDLBAUER, 2003). A análise da transferência simultânea de calor e umidade no sistema construtivo é complexa para medir em experimentos em campo. Nesse

contexto, a simulação computacional surge como uma alternativa mais viável (KARAGIOZIS; SALONVAARA, 2001). Os programas de simulação computacional quantificam a transferência de umidade, vapor de água e temperatura através dos elementos construtivos. Eles são utilizados para verificar a ocorrência de condensações superficiais ou intersticiais, que são importantes para a análise do desempenho higrotérmico (PINHEIRO, 2013). Sendo assim, serão apresentados dois programas de simulação computacional, o *EnergyPlus* e o *WUFI Pro*.

2.7.1. EnergyPlus

Os primeiros programas de simulação térmica de edifícios foram desenvolvidos na década de 1970, após a crise do petróleo. Diversos países foram em busca de fontes alternativas de energia e apoiaram iniciativas que promoviam o desenvolvimento de edificações mais eficientes, com um foco especial na eficiência energética. No final dos anos 1970 e início dos anos 1980, foram criados programas com o objetivo inicial de dimensionar corretamente os sistemas de climatização, como o DOE-2 e o BLAST. Esses programas surgiram de uma necessidade identificada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). A partir da década de 1990, com a popularização do sistema operacional *Windows*, o DOE iniciou o desenvolvimento de uma nova ferramenta de simulação energética de edificações, chamada *EnergyPlus*. Essa nova ferramenta foi baseada nas capacidades e características do BLAST e do DOE-2 (RIBEIRO *et al.*, 2017).

O programa *EnergyPlus* é gratuito e de código aberto. Seu desenvolvimento é financiado pelo *United States Department of Energy Building Technologies Office* – Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE). Essa ferramenta faz análises termoenergéticas, resultando em dados de consumo de energia de aquecimento, resfriamento, dados de carga térmica, ventilação, iluminação e uso de água em edificações. Para utilizar o programa *EnergyPlus*, o usuário deve inserir dados como a geometria do edifício, informações sobre os materiais e do sistema construtivo utilizados, os sistemas mecânicos empregados, e os dados climáticos da cidade por meio do arquivo climático correspondente. A configuração do tipo de ventilação natural e do padrão de abertura das janelas e portas é um elemento fundamental a ser considerado, assim como a configuração dos sistemas de climatização, quando utilizados. A ocupação da edificação também é considerada, incluindo o calor gerado

pelas pessoas, pelos equipamentos e pela iluminação, bem como o vapor gerado pela ocupação das pessoas. (DOE, 2018; MORISHITA, 2020).

2.7.2. WUFI Pro

No contexto de simulação de desempenho higrotérmico, a ferramenta de simulação computacional *WUFI* tem sua origem no nome *Wärme Und Feuchte Instationär – Transient Heat and Moisture Transport,* foi desenvolvido pelo *Fraunhofer Institute for Building Physics - IPB*. O modelo de cálculo do programa é a partir da umidade relativa (%) e foi desenvolvido por Künzel (1995). O programa segue as diretrizes da norma BS EN 15026 - *Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation* (BS EN, 2007), que regula a aplicação de simulações higrotérmicas em regime variável. O programa calcula o transporte unidimensional de calor e umidade sob condições transitórias (FRAUNHOFER IBP, 2019a; MENDES *et al.*, 2019).

Os elementos construtivos são definidos pelo usuário em diversas camadas conforme mostra a Figura 2. É possível escolher o tipo de malha a ser utilizada de acordo com a necessidade de precisão dos cálculos numéricos da simulação, na qual a malha com a opção “Automático” é gerada automaticamente para o tratamento numérico das equações higrotérmicas. A posição de monitorização, indicada pelas câmeras na Figura 2 abaixo, indicam as faces que serão analisadas nos resultados. É necessário a escolha dos dados básicos dos materiais como: densidade aparente, porosidade, capacidade térmica, condutividade térmica e fator de resistência à difusão do vapor de água (FRAUNHOFER IBP, 2019a).

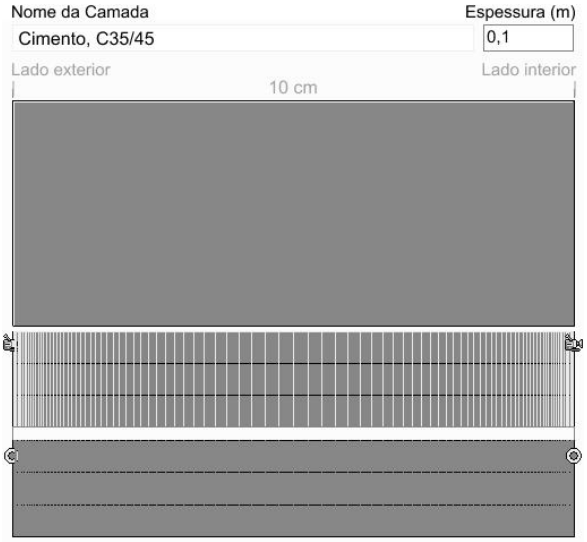


Figura 2 – *WUFI Pro*, configurações do elemento construtivo.
Fonte: Autora, adaptado do *WUFI Pro 6.7*.

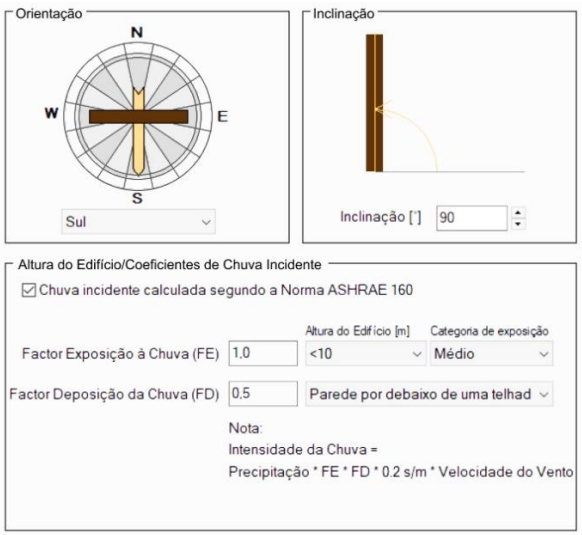


Figura 3 – *WUFI Pro*, configurações da orientação, inclinação e chuva dirigida.
Fonte: Autora, adaptado do *WUFI Pro 6.7*.

O programa disponibiliza um banco de dados com diversos materiais e as propriedades térmicas destes materiais podem ser modificadas caso necessário. Como mostra a Figura 3, o programa permite realizar configurações relativas à orientação solar do elemento construtivo, com opções de orientações de 45° em 45° graus. Também é possível configurar a inclinação do elemento, para o caso de coberturas (FRAUNHOFER IBP, 2019a).

Uma definição importante é referente a configuração da chuva dirigida do modelo. O programa disponibiliza a opção de cálculo de acordo com a ASHRAE 160 - *Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings* (ASHRAE, 2021), no qual usa a Equação 8 abaixo. Em que “rbv” é a deposição de chuva na parede vertical, “FE” é o fator de exposição à chuva, “FD” é o fator de deposição de chuva, que serão detalhados a seguir. “FL” é uma constante empírica, 0,2 kgs/(m³ mm), “U” é a velocidade média horária do vento a 10 m de altura, “θ” é o ângulo entre a direção do vento e a normal à parede, conforme mostra a Figura 4, e, por fim, “rh” é a intensidade da chuva em uma superfície horizontal.

$$rbv = FE \,.\, FD \,.\, FL \,.\, U \,.\, cos(\theta) \,.\, rh \qquad \text{(Equação 8)}$$

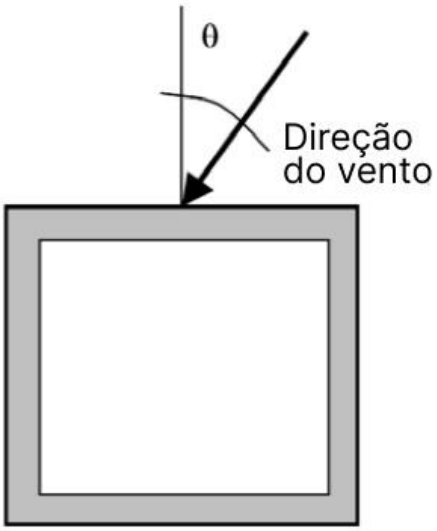


Figura 4 – Planta baixa com definição do ângulo do vento em relação a parede exposta.
Fonte: Autora, adaptado da ASHRAE 160 (2021).

Como mostra a Tabela 1, o programa permite escolher o fator de exposição à chuva (FE) que se refere às características do entorno e à altura da edificação. O FE possui as opções de exposição severa, média ou abrigada. A exposição severa considera edificações em topos de colinas, áreas costeiras e ventos canalizados. Já a exposição abrigada inclui edificações que possuem proteção por edificações próximas e outros recursos permanentes (ASHRAE, 2009).

E o fator de deposição da chuva (FD) considera as características do próprio edifício, como a presença ou não de um telhado, como mostra a Tabela 1 (ASHRAE, 2009).

Tabela 1 – *WUFI Pro*, fatores de exposição e deposição da chuva.

Fator de exposição à chuva (FE)			
Altura (m)	**Categoria de tipo de exposição:**		
	Severo	**Médio**	**Abrigado**
<10	1,4	1,0	0,7
> 10 e ≤ 20	1,4	1,2	1,0
> 20	1,5	1,5	1,5

Fator de deposição da chuva (FD)	
Paredes debaixo de um telhado com declive acentuado	0,35
Paredes debaixo de um telhado de baixa inclinação	0,5
Paredes sujeitas ao escoamento de chuva	1,0

Fonte: Autora, adaptado do manual do programa *WUFI Pro 6.7*.

Para as condições de contorno em relação ao clima exterior, conforme a Figura 5, o programa oferece a opção de inserir um arquivo externo nos formatos WET, TRY, EPW, DAT, WAC, IWC e WBC. Podem ser inseridos arquivos climáticos que contém dados meteorológicos reais, os quais expressam as condições do clima natural, tais como temperatura, umidade relativa, chuva incidente e radiação solar (FRAUNHOFER IBP, 2019a; RIBEIRO, 2013).

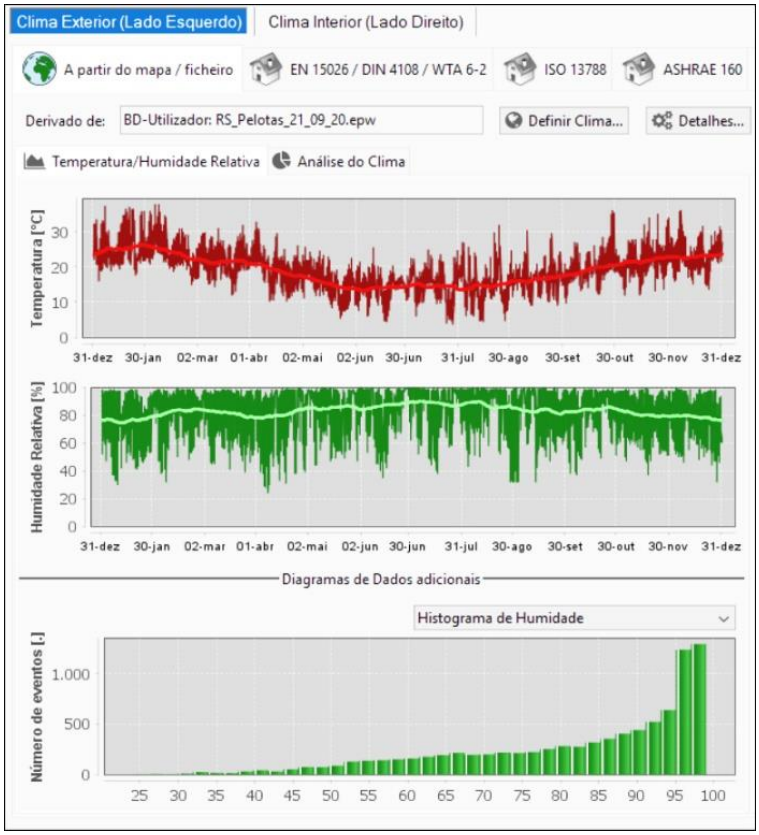


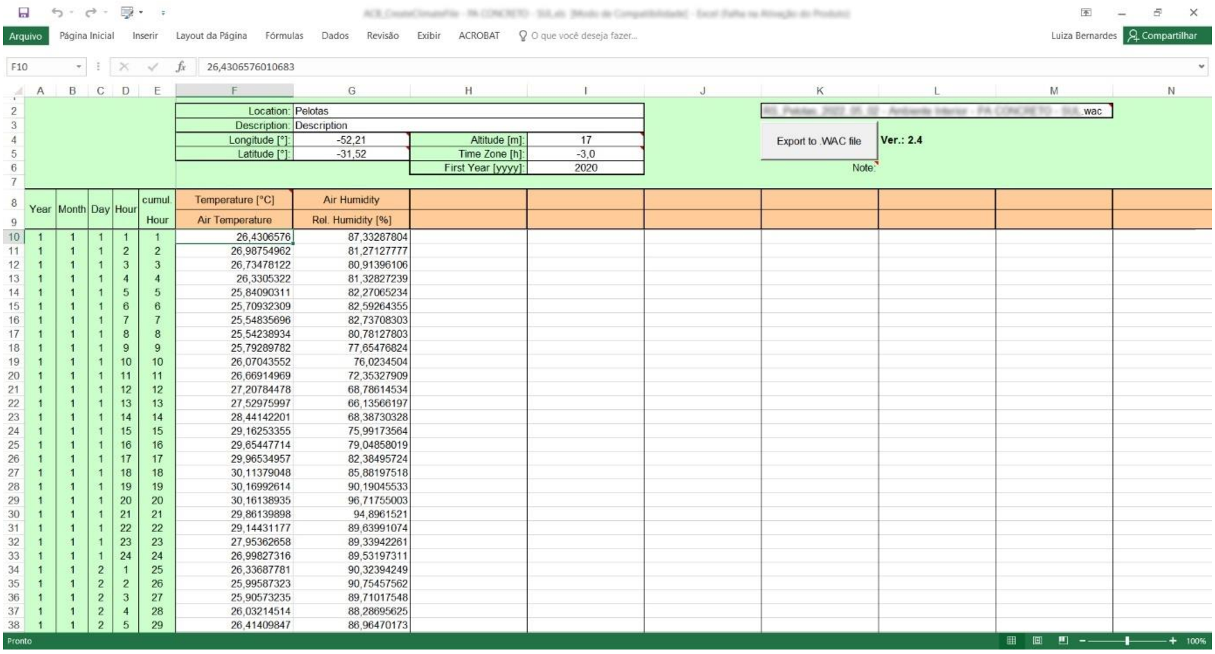
Figura 5 – *WUFI Pro*, configurações do clima externo.
Fonte: Autora, adaptado do *WUFI Pro 6.7*.

Para as condições de contorno em relação ao clima interior são oferecidas as opções de: escolher um arquivo externo; utilizar as normas EN 15026 (2007)/DIN 4108 (2022)/WTA6-2; utilizar a ISO 13788 (2012); ou utilizar a norma ASHRAE 160 (2009). Como mostra a Figuras 6 com as opções do arquivo externo e normas EN/DIN/WTA respectivamente. E a Figura 7 com as opções de utilizar a norma ISO e norma ASHRAE respectivamente.

Figura 6 – *WUFI Pro*, configurações do clima interno: arquivo externo e normas EN/DIN/WTA respectivamente.
Fonte: Autora, adaptado do *WUFI Pro 6.7*.

Figura 7 – *WUFI Pro*, configurações do clima interno: norma ISO e norma ASHRAE respectivamente.
Fonte: Autora, adaptado do *WUFI Pro 6.7*.

Ainda nas condições de contorno do clima interior, ao utilizar a opção de arquivo externo, o programa *WUFI Pro* oferece uma planilha no *Excel* para o preenchimento da temperatura e umidade relativa interna de um ambiente. Essa planilha permite exportar em formato WAC para inserir no clima interior no programa, conforme mostra a Figura 8.



Year	Month	Day	Hour	cumul. Hour	Temperature [°C] Air Temperature	Air Humidity Rel. Humidity [%]
1	1	1	1	1	26,4306576	87,33287804
1	1	1	2	2	26,98754962	81,27127777
1	1	1	3	3	26,73478122	80,91396106
1	1	1	4	4	26,3305322	81,32827239
1	1	1	5	5	25,84090311	82,27065234
1	1	1	6	6	25,70932309	82,59264355
1	1	1	7	7	25,54835696	82,73708303
1	1	1	8	8	25,54238934	80,78127803
1	1	1	9	9	25,79289782	77,65476824
1	1	1	10	10	26,07043552	76,0234504
1	1	1	11	11	26,66914969	72,35327909
1	1	1	12	12	27,20784478	68,78614534
1	1	1	13	13	27,52975997	66,13566197
1	1	1	14	14	28,44142201	68,38730328
1	1	1	15	15	29,16253355	75,99173564
1	1	1	16	16	29,65447714	79,04858019
1	1	1	17	17	29,96534957	82,38495724
1	1	1	18	18	30,11379048	85,88197518
1	1	1	19	19	30,16992614	90,19045533
1	1	1	20	20	30,16138935	96,71755003
1	1	1	21	21	29,86139898	94,8961521
1	1	1	22	22	29,14431177	89,63991074
1	1	1	23	23	27,95362658	89,33942261
1	1	1	24	24	26,99827316	89,53197311
1	1	2	1	25	26,33687781	90,32394249
1	1	2	2	26	25,99587323	90,75457562
1	1	2	3	27	25,90573235	89,71017548
1	1	2	4	28	26,03214514	88,28695625
1	1	2	5	29	26,41409847	86,96470173

Figura 8 – Programa *Excel*, tabela disponibilizada pelo *WUFI Pro 6.7* para criação do arquivo do ambiente interior.
Fonte: Autora, adaptado do *Excel*, disponibilizado pelo *WUFI Pro 6.7* (FRAUNHOFER IBP, 2019a).

Após as simulações, é possível observar os *outputs*, que são os resultados relativos a: o teor de umidade total no elemento construtivo, e em cada material separadamente; a temperatura, ponto de orvalho e umidade na superfície da parede; as curvas LIM de risco de formação de fungos filamentosos; e o *WUFI* Filme, no qual mostra o transporte de calor e massa no elemento construtivo ao longo do tempo de simulação. No entanto, esses critérios podem não ser suficientes para garantir uma análise precisa, a fim de evitar possíveis degradações nos elementos construtivos. Portanto, existem os pós-modelos, como o *WUFI Bio*, que oferecem outras formas de análises, as quais podem ser necessárias para uma melhor interpretação dos resultados (FRAUNHOFER IBP, 2019b; JORNE, 2010).

O *WUFI Bio,* que também foi desenvolvido pelo *Fraunhofer Institute for Building Physics – IBP*, é utilizado para prever os riscos de ocorrência de fungos filamentosos em condições de regime transiente*.* Considera a comparação das condições climáticas com as condições necessárias de crescimento de fungos normalmente encontrados em edifícios (AFONSO, 2018; FRAUNHOFER IBP, 2019b). O *WUFI Bio* utiliza os dados da simulação no *WUFI Pro* para as análises. Para isso, é necessário inserir alguns dados de entrada como: a classe de exposição do ocupante, a umidade inicial do esporo e a classe do substrato.

A classe de exposição do ocupante indica o grau de contato do ocupante com a face avaliada da parede. Existem três categorias: “Superfície interna ou posição em contato com o ar interno”, que corresponde a face interior da parede em ambientes com ocupação de pessoas; “Superfícies dentro da construção sem contato direto com o ar interno”, que corresponde à face interna da parede em ambientes raramente ocupados por pessoas; e “Não se espera nenhum impacto nos ocupantes”, que indica a face da parede que não possui nenhum contato com os ocupantes.

A umidade inicial do esporo refere-se à umidade relativa dentro do esporo no início do perídio da simulação. Ela tem influência apenas no estágio inicial da simulação, pois o conteúdo de água com o tempo será influenciado pelas condições ambientais. A classe do substrato é dividida três classes: classe 0 é o meio de cultura ideal; classe I são substratos biodegradáveis como o gesso; e classe II são os substratos com estrutura porosa, como materiais minerais de construção (AFONSO, 2018; FRAUNHOFER IBP, 2019b).

Os gráficos para análise dos resultados são: gráfico de teor de umidade crítico e teor de umidade no interior do esporo, em conjunto com as luzes de semáforo, e o gráfico do índice de crescimento de micélios, como mostra a Tabela 2. O gráfico de teor de umidade crítico e teor de umidade no interior do esporo mostra se os fungos estão em desenvolvimento ou se a ocorrência de mofo é esperada. Quando o teor de umidade do esporo for superior ao teor de umidade crítico há risco de ocorrência de mofo e risco de crescimento dos fungos filamentosos (AFONSO, 2018; FRAUNHOFER IBP, 2019b).

As luzes de semáforo mostram a gravidade do bolor esperado, verde representa usualmente aceitável, amarelo representa a necessidade de maiores investigações, e a luz vermelha representa não aceitável (AFONSO, 2018; FRAUNHOFER IBP, 2019b).

O gráfico do índice de crescimento de micélios, indica o crescimento em números em ordem crescente. No qual o valor 0 representa sem crescimento, e segue até o número 6 que representa uma cobertura de 100%, como mostrado na Tabela 2 abaixo (AFONSO, 2018; FRAUNHOFER IBP, 2019b).

Tabela 2 – *WUFI Bio,* Critérios dos gráficos do programa *WUFI Bio*.

Gráficos *WUFI Bio*			
Luzes de semáforo		Índice de crescimento dos micélios	
Verde	Baixo risco de ocorrência de bolor	0	Sem crescimento
Amarelo	Médio risco de ocorrência de bolor	1	Algum crescimento visível ao microscópio
Vermelho	Alto risco de ocorrência de bolor	2	Crescimento moderado visível ao microscópio, cobertura superior a 10%
		3	Algum crescimento visível ao microscópio
		4	Cobertura visível superior a 10%
		5	Cobertura superior a 50%
		6	Cobertura densa de 100%

Fonte: Autora, adaptado de Afonso (AFONSO, 2018; FRAUNHOFER IBP, 2019b).

O programa *WUFI Pro* possui limitações na análise de alguns fenômenos físicos: quanto à transferência de calor, em que não é contabilizado a convecção e radiação em espaços vazios como os furos em blocos cerâmicos, sendo necessário adotar resistências térmicas equivalentes; não é considerado o fenômeno de ascensão capilar nas simulações; como também não é considerada a convecção através das fissuras ou aberturas nos materiais. As limitações são aceitas para a utilização do programa (SANTOS, 2019).

2.8. Pesquisas de desempenho higrotérmico

No contexto brasileiro, diferentes autores realizaram estudos sobre o desempenho higrotérmico de sistemas construtivos. Juntamente com medições em campo (DANTAS *et al.*, 2020; ZANONI *et al.*, 2020), a ocorrência de condensação superficial e fungos filamentosos em edificações (AFONSO, 2018; BERNARDES *et al.*, 2022; BULIGON, 2021; BULIGON *et al.*, 2022; PESSOA; MASUERO, 2021; PIRES, 2020). Outro aspecto bastante estudado é a avaliação da influência dos agentes climáticos da degradação de fachadas (CAVALCANTE *et al.*, 2023; NASCIMENTO, 2016; SOCOLOSKI *et al.*, 2023; VON EYE *et al.*, 2017; ZANONI, 2015). Como também a investigação dos riscos de umidade em diferentes climas do Brasil (MORISHITA, 2020; MORISHITA *et al.*, 2016) e ensaios sobre as propriedades higrotérmicas dos materiais (BEBER *et al.*, 2023a; BELIZARIO-SILVA; BRITO, 2024; BRITO; BELIZARIO-SILVA, 2022; SANTOS, 2019; SOCOLOSKI *et al.*, 2023).

Em uma análise das fachadas de uma habitação autoconstruída em Brasília/DF, Zanoni *et al.* (2020) analisaram o desempenho higrotérmico de uma parede de alvenaria a partir de simulações computacionais com o programa *WUFI* e medições em campo. Os autores obtiveram resultados de variações higrotérmicas superiores aos limites de umidade relativa estabelecidos pelas normas internacionais. O que representa condições favoráveis para a presença de bolor, constatando que o sistema construtivo não teve o desempenho necessário para se manter abaixo dos limites de umidade das normas internacionais. Os resultados sugerem que as paredes permitem alto fluxo de umidade para o interior ao longo de todo o dia.

A tese realizada por Pires (2020) apresenta uma avaliação da umidade, condensação superficial e desempenho higrotérmico em diferentes tipologias de edificação, diferentes sistemas construtivos de parede e cobertura, e diferentes climas brasileiros. A avaliação foi baseada nas normas ISO 13788 (2012), EN 15026 (2007) e ASHRAE 160 (2016). Através de simulações computacionais com o programa *WUFI Plus,* foi utilizado quatro sistemas construtivos e quatro sistemas de forro, típicos do Brasil. Cinco tipologias de edificações habitacionais unifamiliares simuladas nas oito zonas bioclimáticas brasileiras a partir de cidades representativas. Nos resultados analisados, os aumentos da ventilação natural, da temperatura externa, da umidade relativa externa, e da radiação solar, geraram um aumento da umidade interna nas zonas bioclimáticas de ZB1 a ZB7. Em diversos climas haveria a necessidade da utilização de desumidificadores em razão da alta umidade relativa do ar do clima externo. A autora ressalta que a permeabilidade foi um aspecto de grande influência na condensação superficial. O bloco cerâmico foi o sistema que apresentou os resultados de maiores níveis de umidade e condensação superficial. O volume do ambiente também apresentou resultados distintos, as edificações menores apresentaram maior condensação superficial e umidade interna, mostrando a influência do volume da edificação no risco de condensações internas.

Afonso (2018), em suas análises de desempenho higrotérmico, aborda as condições necessárias para a ocorrência de bolores em edifícios residenciais de interesse social com paredes maciças de concreto. Foram realizadas vistorias nos empreendimentos a fim de identificar visualmente as condições propícias para a formação de bolores, e foram feitas simulações computacionais no programa *WUFI Plus* e *WUFI Bio* para análise das condições higrotérmicas das paredes. O autor

conclui que as paredes maciças de concreto apresentam alto potencial de ocorrência de bolor. Aliado a isso, a taxa de ocupação tem grande influência devido a quantidade de vapor d'água liberada nos ambientes. A ventilação natural é decisiva por ser responsável por retirar o excesso de umidade dos espaços internos. A posição, a orientação solar, a umidade relativa externa e o tamanho dos ambientes também são influentes para o risco de formação de bolores nos ambientes internos. Segundo o autor, devem ser tomados cuidados relacionados ao projeto, as propriedades higrotérmicas do sistema construtivo, a ventilação dos ambientes, e a operação das janelas, a fim de evitar o problema de proliferação de bolores.

Em pesquisa relacionada ao desempenho higrotérmico de sistemas construtivos leves, a autora Buligon (2021) aborda as consequências da exposição das edificações à umidade, analisando o comportamento higrotérmico da madeira como componente de sistemas de vedação vertical externos na construção civil. O estudo enfatiza que a exposição à umidade favorece o desenvolvimento de fungos filamentosos prejudicando a durabilidade dos materiais e a qualidade do ar interno. Como método de pesquisa, diferentes tipos de madeiras (pinus, eucalipto e cumaru) em 9 diferentes sistemas de vedação vertical externos foram analisados. Foram feitas simulações computacionais no programa *WUFI Pro* 6.7 e *EnergyPlus* 8.7 a fim de verificar o comportamento higrotérmico e energético dos sistemas. Estudo este, realizado em um contexto de regiões com elevados níveis de precipitação, na cidade de Santa Maria/RS, na Zona bioclimática 2. Analisou-se diferentes variáveis, como a integração dos fluxos de umidade, o teor de umidade total, o risco de condensação de vapor e o risco de crescimento de fungos filamentosos. Os resultados mostraram que, de modo geral, os sistemas em madeira para vedação vertical externa têm uma aplicabilidade satisfatória quanto às avaliações de conforto térmico e comportamento higrotérmico, ainda que em regiões com condições de umidade elevada.

Em tese de doutorado, Zanoni (2015) avalia a influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas de alvenaria de bloco cerâmico. O estudo foi feito por meio de simulação higrotérmica no programa *WUFI Pro* 5.3, na cidade de Brasília/DF, e a análise dos resultados foi feita por análise de sensibilidade pelo método ANOVA. As variações tanto de temperatura quanto de umidade aceleram a degradação da fachada em razão das variações de dimensão dos materiais. Os materiais devem ser estanques, mas também permitir trocas de

vapor para evitar alterações físicas, condensações, e demais manifestações patológicas. Foi concluído que as fachadas sofrem influência das ações climáticas com intensidades e frequências diferentes, e dependem das propriedades higrotérmicas dos materiais e das variações dos agentes climáticos que afetam o comportamento higrotérmico. O teor de umidade total, e a amplitude térmica dos elementos da fachada, são padrões eficientes de avaliação de exposição aos agentes climáticos de degradação.

Nascimento (2016), em seu estudo, aborda as questões relacionadas a degradação de fachadas com revestimentos cerâmicos. O estudo desenvolve análises a partir de simulação higrotérmica no programa *WUFI Pro* 5.3, a fim de verificar as ações dos agentes climáticos em seis edifícios distintos na cidade de Brasília/DF. Os edifícios foram analisados quanto à chuva dirigida, radiação e temperaturas nas orientações Norte, Sul, Leste e Oeste. O autor identificou dois períodos distintos ao longo do ano: seco e chuvoso. Para os resultados de radiação, os valores mais críticos ocorreram durante o período seco. Os maiores valores de temperatura superficial se deram nas orientações norte e oeste, também no período seco. Como conclusão, o autor verificou que os agentes climáticos apresentam, na cidade analisada, grande influência na degradação das fachadas, principalmente no período seco.

Outro estudo sobre degradação de fachadas, os autores Cavalcante *et al.* (CAVALCANTE *et al.*, 2023) avaliaram o comportamento higrotérmico de uma parede de concreto da Universidade de Brasília - UNB. Foram utilizados os programas *EnergyPlus* e *WUFI Pro* com diferentes tipos de paredes de concreto, pintura externa e duas orientações solares. A fachada Norte apresentou maior teor de umidade devido a maior exposição da chuva dirigida ao longo do ano. A parede com pintura, que possui menor resistência à difusão de vapor de água, apresentou maior potencial à degradação. Concluindo que a avaliação das propriedades higrotérmicas dos materiais representam um papel importante na simulação, pois nem sempre a proteção com pintura contribui para a melhora do desempenho higrotérmico da edificação.

Morishita *et al.* (2016) avaliaram o risco potencial de umidade nos edifícios a partir das condições climáticas do Brasil. A densidade populacional, os tipos de sistemas construtivos comumente utilizados e as questões culturais do país foram objetos deste estudo. A maior parte do país está localizada em climas com alto

potencial de umidade relativa do ar. A técnica construtiva mais utilizada é a parede de alvenaria e cobertura de telha de barro. As casas são construídas quase com as mesmas técnicas construtivas, apesar do Brasil possuir diversas condições climáticas. Muitas casas são construídas informalmente, com falta de mão de obra especializada, e não atendem as exigências mínimas das normas. Os autores concluíram que o país necessita de mais atenção às questões relacionadas a umidade nas construções, devido as condições climáticas, baixa qualidade das construções, e a grande quantidade de casas construídas informalmente, com dificuldades de atender as normas técnicas.

O mesmo resultado foi encontrado por meio de simulações computacionais. Morishita (2020) investiga os riscos de umidade em edifícios residenciais em diferentes climas do Brasil. A autora utiliza dois programas, o *QGIS* para mapear os resultados no mapa, e o *EnergyPlus* para as simulações de risco de umidade. Foi concluído que os principais métodos construtivos utilizados no país podem estar propensos a riscos de alta umidade do ar nas edificações, em todas as regiões, mesmo de acordo com a norma brasileira. O risco potencial de umidade está presente, principalmente nas que possuem condições climáticas de altos valores de pressão de vapor externo, altas taxas de chuva com ação do vento e regiões densamente povoadas. A autora conclui também que existe uma variação de níveis de risco de umidade em uma mesma zona bioclimática, frisando a necessidade de especificações relacionadas a umidade dos sistemas construtivos nas normas brasileiras.

Diversos autores utilizaram a análise de sensibilidade para avaliar o desempenho de edificações. Silva, Almeida e Ghisi (2016) realizaram um estudo de caso para melhoria do desempenho térmico e energético de uma edificação unifamiliar. A partir da criação de modelos para tomada de decisão multicritério, utilizaram o método global de Morris. Analisaram os grau-hora e o consumo de energia com climatização, utilizando diferentes cenários de preferência dos ocupantes. Avaliaram diversos sistemas construtivos, e o sistema com parede dupla com alvenaria de tijolo maciço apresentou o melhor desempenho para três, dos quatro climas analisados. No entanto concluíram que diferentes cenários de preferência indicam diferentes sistemas construtivos adequados (SILVA; ALMEIDA; GHISI, 2016).

Em outro estudo, Silva e Ghisi (2013) analisaram a sensibilidade de parâmetros de eficiência energética em edificações seguindo o RTQ-R, a partir dos métodos de regressão SRC e PCC. Foram avaliados 15 parâmetros em 500 simulações aleatórias, considerando graus-hora de resfriamento, consumo de energia para aquecimento e refrigeração. Os resultados mostraram que os parâmetros mais influentes variam de acordo com a variável estudada, destacando a absortância solar e a emissividade da cobertura como os mais relevantes. Pesquisas relacionadas a análise de sensibilidade em edificações podem auxiliar na otimização de projetos e na classificação de eficiência energética em certificações de edifícios (SILVA; GHISI, 2013).

Por meio de uma análise de sensibilidade, Tondo (2017) em seu estudo analisou o desempenho térmico de escolas em Joinville, Brasil, com foco na eficiência energética e conforto térmico. A análise de sensibilidade foi realizada a partir de método simples de sensibilidade local, o índice de sensibilidade. Os resultados mostraram que estratégias como ventilação noturna e cobertura com alto isolamento térmico tiveram uma alta influência no conforto térmico. Contrariando as diretrizes locais, paredes com alta massa térmica não foram tão influentes, enquanto a absorção solar da cobertura desempenhou um papel importante na redução da necessidade de resfriamento. Elementos de proteção solar tiveram pouco impacto devido aos beirais existentes. A autora concluiu que a ventilação natural, a absortância solar e o material da cobertura foram os fatores que mais afetam o desempenho térmico das edificações estudadas (TONDO, 2017).

Em um estudo sobre o desempenho térmico e energético de edificações, Silva (2016), desenvolveu um método para avaliar o desempenho de edificações considerando múltiplos critérios e diferentes fontes de incerteza. O método incluiu amostragem aleatória, análise de sensibilidade local e global, análise de incertezas e tomada de decisão multicritério. A maioria dos procedimentos foi realizado na linguagem de programação R. Foi realizada análises de sensibilidade local e global pelo método de Morris, projeto de experimento fatorial, Sobol. O estudo foi aplicado a uma edificação residencial em Florianópolis, Brasil, considerando consumo de energia e desconforto térmico. Foram analisadas diversas fontes de incerteza, incluindo algoritmos, modelagem, física e operações. Seis modelos de desempenho foram gerados e analisados, revelando variáveis de projeto influentes, como transmitância térmica, taxas de infiltração de ar e absortância solar. O método também permitiu

aprimorar o desempenho da edificação, considerando diferentes critérios, cenários de preferência e incertezas. O estudo demonstrou a eficácia do método para o entendimento do desempenho das edificações, identificação de fontes de incerteza e tomada de decisões para melhorar o desempenho global, representando uma grande contribuição para a área de simulação de edificações (SILVA, 2016).

No contexto de análise de sensibilidade do tema desempenho higrotérmico de edificações, os autores Goffart, Rabouille e Mendes (2017) apresentam uma análise estatística que investiga a incerteza e a sensibilidade de 14 variáveis de entrada, com ênfase em 10 propriedades higrotérmicas de materiais, usando quatro modelos diferentes de parede. Os autores utilizaram o método de análise de sensibilidade global de variância RBD-FAST, a fim de verificar a incerteza e sensibilidade de cinco algoritmos de condução do programa EnergyPlus (CTF, CondFD, EMPD, HAMTa e HAMTb). As variações nas entradas foram baseadas em estudos anteriores da Agência Internacional de Energia (IEA), Anexo 14, 24 e 55. O artigo aborda como a umidade afeta a demanda de energia para resfriamento e as condições internas em um ambiente de construção simples em Cingapura. Os resultados destacam as principais fontes de incerteza e a importância de considerar adequadamente a umidade nas análises. Essa abordagem pode ser útil para reduzir incertezas no projeto e aprimorar a avaliação de renovações em edifícios (GOFFART; RABOUILLE; MENDES, 2017).

A partir de uma análise de sensibilidade local, em um estudo sobre o desempenho higrotérmico de um edifício, Ferreira (2013) analisou quais parâmetros específicos de coberturas verdes têm maior influência no desempenho higrotérmico e energético de uma residência na cidade do Porto, Portugal. Diversas simulações foram realizadas para examinar como a espessura do isolamento, o coeficiente de absorção solar e a exposição solar influenciam o comportamento da habitação. Uma análise de sensibilidade pelo método local, o índice de sensibilidade, foi realizada para avaliar como parâmetros relacionados às plantas e ao solo afetam as temperaturas internas dos edifícios quando uma cobertura verde é implementada. Este estudo também destacou os benefícios econômicos e ambientais da adoção de coberturas verdes e como elas podem impactar o conforto térmico da habitação durante os meses de temperaturas extremas (FERREIRA, 2013).

Em outro estudo com o tema desempenho higrotérmico e análise de sensibilidade, Brito e Belizario-Silva (2022) realizaram um estudo da sensibilidade de uma parede a diferentes características higrotérmicas. Foi utilizada uma parede de concreto de 10 cm, e foi escolhido quatro tipos de concreto no banco de dados do programa *WUFI PRO*. As diferentes propriedades higrotérmicas dos materiais analisadas foram a isoterma de sorção, o coeficiente de transporte capilar de sucção e o coeficiente de transporte capilar de redistribuição. Foi verificado uma diferença significativa entre os concretos escolhidos nos resultados de teor de umidade da parede, umidade relativa superficial interna e também na formação de fungos filamentos na superfície da parede. Foi concluído que as diferentes funções higrotérmicas dos materiais obtiveram grande diferença nos resultados, mostrando a importância da correta escolha do material e também a necessidade de caracterizar os materiais brasileiros (BRITO; BELIZARIO-SILVA, 2022).

Em síntese, os estudos de desempenho higrotérmicos desenvolvidos no Brasil apresentam limitações. O país possui climas críticos e propícios para a ocorrência de umidade nas edificações, no entanto, há uma falta de informações sobre as propriedades higrotérmicas dos materiais nacionais e a falta de normativas brasileiras para regularizar os processos de estudo. A normativa nacional sobre simulação higrotérmica está em processo de desenvolvimento, e irá ocupar uma lacuna importante para a melhora do desempenho das edificações. Sobre a temática dos métodos de análise, os estudos realizados a partir de análise de sensibilidade, principalmente sobre o tema desempenho higrotérmico no país, auxiliam na tomada de decisões e são importantes para o desenvolvimento de estudos mais precisos na área de umidade em edificações.

2.9. Legislações quanto ao desempenho higrotérmico

No Brasil, o desempenho térmico de edificações é amplamente discutido, ganhando mais importância com a homologação das normas brasileiras acerca do tema, como nas normas NBR 15575 (ABNT, 2021a) e NBR 15220 (ABNT, 2022). Entretanto, o desempenho higrotérmico é pouco difundido no contexto das normas e diretrizes brasileiras, havendo a necessidade de buscar referências em normas internacionais. Estas, por sua vez, são normas consolidadas e amplamente utilizadas no tema de desempenho higrotérmico (AFONSO, 2018; PIRES, 2020).

A seguir, serão abordadas as normas internacionais ISO 13788 (ISO, 2012), BS EN 15026 (BS EN, 2007) e ASHRAE Standard 160 (ASHRAE, 2016) relativas ao desempenho higrotérmico de edificações. E as normas e diretrizes brasileiras no contexto de calor e umidade de edificações, as normas NBR 15575 (ABNT, 2021a), NBR 15220 (ABNT, 2022), a diretriz SiNAT (SINAT, 2017), e o rascunho inicial do projeto de norma ABNT “Simulação computacional do comportamento higrotérmico de paredes – Procedimento” (ABNT, 2023).

2.9.1. ISO 13788:2012

No âmbito internacional, a norma ISO 13788 – *Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods* (ISO, 2012) apresenta métodos de análise de transporte de umidade unidirecional, e análises da temperatura das superfícies internas para evitar a umidade nas superfícies das paredes e a condensação intersticial. Essa norma internacional aborda questões relacionadas à umidade crítica na superfície interna, ao risco de manifestações patológicas, à condensação intersticial dentro de um elemento construtivo, à estimativa do tempo para um elemento construtivo secar após o umedecimento e ao risco de condensação intersticial ocorrendo em outra parte do elemento construtivo durante o processo de secagem.

A norma ISO 13788 (2012) possui alguns pontos fracos. A norma estabelece métodos de cálculos simplificados, que consideram o transporte de umidade apenas por difusão de vapor, e a utilização de dados climáticos apenas mensais. Não é considerado outros aspectos da umidade, como por exemplo, a umidade ascendente vinda do solo, a entrada de precipitação e a convecção. Outra limitação é o fato da norma definir uma temperatura interior constante ao longo do ano (ISO, 2012; JORNE, 2010).

2.9.2. BS EN 15026:2007

A norma BS EN 15026 – *Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements – Assessment of Moisture Transfer by Numerical Simulation* (BS EN, 2007) aborda as simulações higrotérmicas de transporte de calor e umidade

unidimensional. Para as simulações, considera as condições de transporte de calor e umidade em regime transiente. A norma considera os fenômenos de armazenamento de calor e umidade, transporte de calor por condução, transporte de umidade por difusão e por transporte líquido. A norma realiza uma abordagem simplificada para determinar a temperatura e umidade do ar interior. Na qual com o valor da média diária da temperatura exterior é definida a temperatura do ar interno, e a umidade é definida com uma classe de acordo com a taxa de ocupação da edificação. As classes podem ser a ocupação normal e a ocupação alta, com valores obtidos a partir de tabelas. Como limitações, a norma BS EN 15026 (2007) não considera os efeitos bidirecionais como a umidade ascendente vinda do solo e também não deve ser usada quando houver convecção de ar por buracos ou rachaduras. A umidade relativa interior é limitada a um valor máximo, na taxa de ocupação normal esse valor é 60%, que é considerado baixo em algumas situações. Essa norma é apenas válida para habitações e escritórios (BS EN, 2007; JORNE, 2010; PINHEIRO, 2013).

Em comparação, a norma BS EN 15026 (2007) apresenta uma abordagem mais apropriada de avaliação da temperatura interior, propondo a variação da temperatura interior proporcional à variação da temperatura exterior. No entanto, a norma ISO 13788 (2012) apresenta uma forma mais correta de determinação da umidade relativa interior, na qual considera mais classes de ocupação, cinco classes ao invés de duas, como também não limita um valor máximo para a umidade relativa interior (BS EN, 2007; ISO, 2012; PINHEIRO, 2013).

2.9.3. ASHRAE 160:2016

A norma ASHRAE 160 – *Criteria for moisture-control design analysis in buildings* (ASHRAE, 2016), traz premissas de projeto e de cargas internas para simulações computacionais a fim de analisar as condições térmicas e de umidade dos elementos construtivos e das edificações. A norma possui os critérios para seleção de procedimentos analíticos, no qual a simulação deve considerar, entre outros quesitos, o regime transiente e o transporte de calor com efeitos de mudança de fase. As propriedades dos materiais podem ser afetadas pelo teor de umidade e o transporte de umidade deve incluir transporte capilar, armazenamento de umidade, difusão de vapor e penetração de água. As cavidades ventiladas devem ser consideradas (ASHRAE, 2016; PIRES, 2020).

A norma também traz critérios para projeto, a fim de avaliar o controle de umidade da edificação, como o teor de umidade inicial dos materiais, temperatura e umidade interna, ventilação, geração de umidade interna, pressão do ar, dados climáticos e carga de chuva nas paredes. Os critérios para avaliação do desempenho higrotérmico compreendem parâmetros para evitar a ocorrência de fungos filamentosos e a corrosão de metais e superfícies no interior da edificação. Para a umidade relativa na superfície interior, com temperaturas da superfície interior entre 5°C e 40°C, apresenta os limites de: 80% por trinta dias corridos, 98% por sete dias corridos ou 100% por 24h do dia, sendo considerada a pior condição. A norma estabelece o limite da umidade relativa do ar interior de 70%, para edifícios climatizados (ASHRAE, 2016; PIRES, 2020; ZANONI *et al.*, 2020).

Existem normas relativas a ensaios de propriedades higrotérmicas dos materiais construtivos no contexto internacional. Serão apresentadas a seguir três normas, a norma BS EN ISO 15148:2002 sobre a absorção de água líquida, a norma BS ISO 24353:2008 de adsorção e dessorção de vapor de água, e a norma ISO 12572:2016 relativa a permeabilidade ao vapor de água de materiais.

2.9.4. BS EN ISO 15148:2002

A norma BS EN ISO 15148:2002 – *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water absorption coefficient by partial immersion* (2002), apresenta um método de ensaio para determinar por imersão parcial o coeficiente de absorção de água líquida. No método, se avalia a taxa de absorção de água por capilaridade, pela ação de chuvas contínuas ou pelo período de construção das edificações, identificando o desempenho do material no transporte de líquidos. O método consiste em imergir parcialmente o material com a superfície inferior em contato com a água, durante um período de pelo menos 24 h, e medir a variação de massa do material (BS EN, 2002).

2.9.5. BS ISO 24353:2008

A norma BS ISO 24353:2008 – *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of moisture adsorption/desorption properties in response to humidity variation* (2008), apresenta um método de ensaio para determinação das propriedades de adsorção e dessorção de umidade de materiais construtivos em resposta à variação de umidade do ar. A partir da medição da massa de uma amostra, que é movida de um ambiente para outro, de diferentes umidades relativas e de igual temperatura do ar. Os ensaios podem ser realizados em um ciclo único ou vários ciclos (BS ISO, 2008).

2.9.6. ISO 12572:2016

A norma ISO 12572:2016 – *Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapor transmission properties – Cup method* (2016), especifica o método de ensaio com copo, para determinar a permeabilidade ao vapor de água de materiais construtivos. É possível realizar ensaios para todos os materiais da construção tanto higroscópicos como não higroscópicos, incluindo materiais de isolamento e revestimentos (ISO, 2016).

No Brasil, existem as normas NBR 15575 – Edifícios residenciais – Desempenho (ABNT, 2021a), e a norma NBR 15220 – Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2022), nas quais não constam o desempenho higrotérmico de edificações. No entanto, existe a Diretriz SiNAT N°001 – Revisão 003 – Diretriz para Avaliação Técnica de Paredes Estruturais de Concreto Moldadas no Local (SINAT, 2017), na qual menciona um método de avaliação do desempenho higrotérmico para paredes de concreto. E atualmente está sendo desenvolvido o rascunho inicial do projeto de norma ABNT “Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento” do grupo de pesquisa GT Umidade da Comissão de Eficiência Energética da ABNT. A seguir serão apresentadas as normas e diretrizes brasileiras.

2.9.7. ABNT NBR 15575:2021

A norma técnica de desempenho NBR 15575 – Edifícios residenciais – Desempenho (ABNT, 2021a) trata do desempenho dos sistemas de piso, parede, cobertura e sistemas hidrossanitários, apresenta itens relativos ao desempenho térmico, estanqueidade dos elementos construtivos e saúde, higiene e qualidade do ar da edificação. É aplicável apenas a novas construções, a partir da data da publicação da norma, e não compreende reformas ou retrofit. A norma brasileira avalia o desempenho térmico de edificações ventiladas naturalmente, a partir do método simplificado para o atendimento à critérios mínimos das propriedades térmicas dos sistemas construtivos. Também possibilita a análise da carga térmica quando condicionada artificialmente, por meio da simulação computacional, a partir da comparação do modelo real e do modelo de referência.

A norma brasileira de desempenho apresenta um item relativo a estanqueidade dos elementos construtivos, no qual os sistemas da edificação devem assegurar estanqueidade às fontes de umidades externas à edificação. Devem ser previstos nos projetos, a prevenção de infiltração de água da chuva e da umidade ascendente vinda do solo, como drenagem adequada da água da chuva e impermeabilização de paredes em contato com o solo, de fundações, pisos e coberturas. E também assegurar a estanqueidade a fontes de umidade internas à edificação, como a água utilizada na operação e manutenção do imóvel nas instalações de água, esgoto ou águas pluviais, para que as tubulações não sejam rompidas ou desencaixadas. Os sistemas devem propiciar condições de salubridade, garantindo a saúde, higiene e qualidade do ar da edificação, e deve ser considerada as condições de umidade e temperatura interior e do sistema construtivo utilizado para evitar a proliferação de microrganismos (ABNT, 2021a).

O sistema de paredes deve possuir elementos para evitar infiltrações e facilitar o escoamento de água, considerando as condições de exposição de chuva torrencial durante seu ciclo de vida (ABNT, 2021c). A norma brasileira possui referência de outras normas específicas NBR, como exemplo, os sistemas de impermeabilização devem atender a norma NBR 9575 – Seleção de projeto de Impermeabilização (ABNT, 2010), a fim de evitar a passagem de fluídos e garantir a estanqueidade dos elementos construtivos, como os pisos e coberturas. E a execução deve ser conforme NBR 9574 – Execução de impermeabilizações (ABNT, 2008). A cobertura também deve atender

a norma de dimensionamento de sistemas pluviais de edificações, NBR 10844 – Instalações prediais de águas pluviais (ABNT, 1989) a fim de evitar poças d'água ou transbordamento, de acordo com o valor máximo de precipitação da região da edificação. A edificação deve possuir um Manual de Uso, Operação e Manutenção com orientações da edificação e de seus equipamentos com o objetivo de aumentar seu ciclo de vida (MORISHITA *et al.*, 2016).

A NBR 15575-4 (ABNT, 2021c) não possui um método de avaliar o desempenho higrotérmico, critérios mínimos ou valores mínimos das propriedades higrotérmicas dos materiais, nem mesmo a simulação computacional do transporte de calor e umidade simultâneos (PIRES, 2020).

2.9.8. ABNT NBR 15220-2:2022, 15220-3:2005

A norma brasileira NBR 15220-2 – Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações (ABNT, 2022), traz propriedades térmicas dos materiais construtivos, estabelece procedimentos para o cálculo de propriedades térmicas de materiais e elementos construtivos. Já a NBR 15220-3 – Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (ABNT, 2005), estabelece um zoneamento bioclimático brasileiro, dividido em oito zonas, a partir da adaptação da Carta Bioclimática de Givoni, "*Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines*" (GIVONI, 1992). Cada uma dessas zonas apresenta um conjunto de recomendações de diretrizes construtivas e estratégias de condicionamento passivo de acordo com a zona bioclimática, a fim de melhorar o desempenho térmico através da adequação climática das edificações. A norma não trata dos métodos para avaliação do desempenho térmico de edificações.

2.9.9. Diretriz SiNAT N°001:2017

No que diz respeito a análise de desempenho higrotérmico, no contexto brasileiro existe a Diretriz SiNAT N°001 – Revisão 003 – Diretriz para Avaliação Técnica de Paredes Estruturais de Concreto Moldadas no Local (SINAT, 2017), na qual especifica diretrizes para simulação de desempenho higrotérmico para analisar a ocorrência de condensações superficiais internas, apenas para o sistema

construtivo proposto pela diretriz. A diretriz SiNAT parte da exigência que os critérios estabelecidos nas normas NBR 15575 (ABNT, 2021a), NBR 15220-2 (ABNT, 2022) e NBR 15220-3 (ABNT, 2005) sejam atendidos, quanto às características de desempenho térmico e as diferentes zonas bioclimáticas. As simulações devem ser realizadas com cidades representativas das zonas bioclimáticas, e utilizando um programa que realize o balanço simultâneo de calor e umidade em regime transiente (SINAT, 2017).

Devem ser realizadas duas simulações, uma com a parede maciça de concreto, na qual é objetivo da diretriz, e outra com uma parede de referência de bloco cerâmico de 14 cm revestida com 2 cm de reboco em ambas as faces. As duas habitações devem possuir as janelas dos ambientes na orientação solar sul. Verifica-se o número de horas em que a temperatura superficial das paredes internas é menor ou igual à temperatura do ponto de orvalho. O critério de avaliação é atendido se na habitação com paredes de concreto o número de horas em que há risco de ocorrência de condensação nas superfícies de paredes internas da sala e dormitórios for, no máximo, 20% maior que aquele de uma parede de alvenaria de blocos cerâmicos (SINAT, 2017).

As premissas do método de análise por simulação computacional da diretriz são: 1) Realizar duas simulações com o mesmo projeto, um com a parede de concreto maciça e outra com parede de bloco cerâmico; 2) Utilizar um projeto padrão para as simulações que deve possuir cobertura em telhas cerâmicas e laje de concreto tradicional com espessura de 6 cm. Janelas dos dormitórios, sala e cozinha de correr com caixilhos metálicos, e vidro incolor de 3 mm de espessura. Janela do banheiro basculante, com caixilhos metálicos, e vidro incolor de 3 mm de espessura. Portas em madeira de abrir. E pé direito da edificação de 2,50 m; 3) Utilizar as características térmicas dos blocos cerâmicos descritas na diretriz; 4) Não considerar efeito de sombreamento de edificações vizinhas; 5) Considerar apenas os ambientes de permanência prolongada: sala e dormitórios; 6) Realizar a simulação voltada para a direção Sul, e, no caso de edifícios, considerar o apartamento da cobertura; 7) Duas situações de ocupação: uma com o apartamento desocupado e com ventilação somente por meio das frestas, e outra com ocupação interna, com ventilação a partir da metade da área total das janelas, por oito horas; 8) Manter as portas internas abertas; 9) Utilizar dados climáticos das cidades representativas das zonas

bioclimáticas; 10) Condições de relevo e pressão do vento “standard” do programa Energy Plus; 11) Considerar as fontes de umidade e ocupação da edificação, conforme tabelas disponibilizadas na diretriz. No final deve ser realizado o cálculo da taxa de condensação para os sistemas de paredes (SINAT, 2017).

Segundo Afonso (2018), conceitualmente, o critério proposto pela diretriz SiNAT N°001 (2017) torna-se inadequado, visto que bolores podem se desenvolver sem que ocorram condensações superficiais. Além de que, a diretriz é recomendada apenas para o sistema construtivo de paredes maciças de concreto, excluindo diversos outros sistemas que são utilizados no país.

O sistema construtivo de paredes maciças de concreto possui um método de avaliação de condensações, no entanto, os demais sistemas construtivos no Brasil não possuem nenhum critério referente a umidade. O sistema construtivo de paredes de alvenaria de bloco cerâmico é comumente utilizado no Brasil, e a atual norma técnica referente aos blocos cerâmicos NBR 15.270 - Componentes Cerâmicos (ABNT, 2017), especifica os requisitos físicos, mecânicos e dimensionais dos blocos cerâmicos. Em relação a outro sistema construtivo, a diretriz que regulamenta os sistemas leves de *Light Steel Frame* é a Diretriz SiNAT nº 003 – Revisão 003 – Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço zincado conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “*Light Steel Framing*”) (SINAT, 2016), na qual especifica critérios quanto ao desempenho dos sistemas de vedação vertical externa e interna, entrepisos, escadas, guarda-corpos e coberturas. No entanto, a norma brasileira dos blocos cerâmicos e a diretriz SiNAT dos sistemas leves, não fazem menção ao desempenho higrotérmico dos elementos construtivos, apresentando assim, uma limitação e uma brecha para problemas relacionados a umidade nas edificações (ABNT, 2017; SINAT, 2016).

2.9.10. Rascunho inicial do projeto de norma ABNT – Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento

Atualmente está sendo desenvolvido o rascunho inicial do projeto de norma ABNT intitulado “Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento” no grupo de pesquisa GT Umidade da Comissão de Eficiência Energética da ABNT. O projeto de norma aborda o transporte de calor e

umidade nos elementos construtivos, considerando as condições de contorno externas e internas das edificações, através de simulações computacionais, a fim de obter condições adequadas de habitabilidade e durabilidade das edificações. O objetivo do projeto de norma é estabelecer um padrão para o procedimento de simulação computacional do desempenho higrotérmico, a fim de possibilitar a comparação dos resultados de simulações realizadas nacionalmente (ABNT, 2023).

O projeto de norma não estabelece parâmetros mínimos de desempenho higrotérmico vinculados aos resultados das simulações computacionais devido à necessidade de uma grande quantidade de resultados de simulações higrotérmicas em diferentes condições climáticas e de uso e operação de edifícios. Atualmente, esses aspectos ainda não foram desenvolvidos no Brasil. O projeto de norma foi baseado nas normas ASHRAE *Standard* 160:2016 – *Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings,* (ASHRAE, 2016) e BS EN 15026:2007 – *Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation* (BS EN, 2007), e foi adaptado para considerar as particularidades do contexto brasileiro (ABNT, 2023).

A simulação computacional deve ser realizada com dados climáticos do ano higrotérmico de referência (HRY) ou dados climáticos do ano meteorológico típico (TMY). Deve ser considerada a chuva dirigida em caso de paredes expostas à chuva. É recomendado realizar a simulação com um período mínimo de 3 anos. A simulação computacional das condições de contorno internas deve ser realizada conforme o procedimento de simulação computacional indicado na NBR 15575-4 (ABNT, 2021c), conforme as condições de contorno de uso, ocupação e ventilação dos ambientes. Além das configurações base conforme a NBR 15575-4 (ABNT, 2021c), é necessário adicionar fontes internas de calor e umidade, como as fontes de calor latente da geração de vapor d’água de panelas e chuveiros, e a adição dos ambientes da cozinha e do banheiro. Os valores e horários de uso estão presentes no projeto de norma. Foram adicionadas maiores fontes internas de calor com o intuito de gerar condições mais rigorosas em relação a umidade do que consta na NBR 15575-4 (ABNT, 2021c).

Como critérios de avaliação, o projeto de norma apresenta um modelo de relatório das informações sobre a simulação computacional. Deve ser realizado no mínimo as análises: a) Teor de umidade de cada camada da parede ao longo do tempo; b) Umidade relativa da superfície interna da parede ao longo do tempo; c)

Umidade relativa nas superfícies de interface entre camadas ao longo do tempo; d) Temperatura da superfície interna da parede ao longo do tempo; e) Temperatura de cada camada ao longo do tempo; f) Formação de fungos filamentosos na superfície interna da parede; g) Temperatura e umidade relativa máximas e mínimas na superfície interna da parede. O projeto de norma especifica que podem ser utilizadas ferramentas de pós-processamento para análises de resultados específicos, como para a avaliação do risco da formação de fungos filamentosos em superfícies internas das paredes (ABNT, 2023).

O rascunho inicial do projeto de norma ABNT “Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento”, está apresentado na íntegra no Anexo A “Rascunho inicial do projeto de norma ABNT”.

3. Método

O método consiste em aplicar as condições propostas no rascunho inicial do projeto de norma ABNT e analisar a sensibilidade às variações das condições de contorno por meio de simulações computacionais de transporte de calor e umidade.

O método foi desenvolvido a partir de três etapas. Na primeira etapa são apresentadas e definidas as condições de contorno do projeto de norma ABNT e das variações para análise.

A segunda etapa consiste nas simulações computacionais no programa *EnergyPlus* 9 e programa *WUFI Pro 6.7*, da proposta de norma ABNT e das propostas de variações para análise.

A terceira etapa apresenta os critérios de avaliação dos resultados. As etapas são apresentadas na Figura 9.

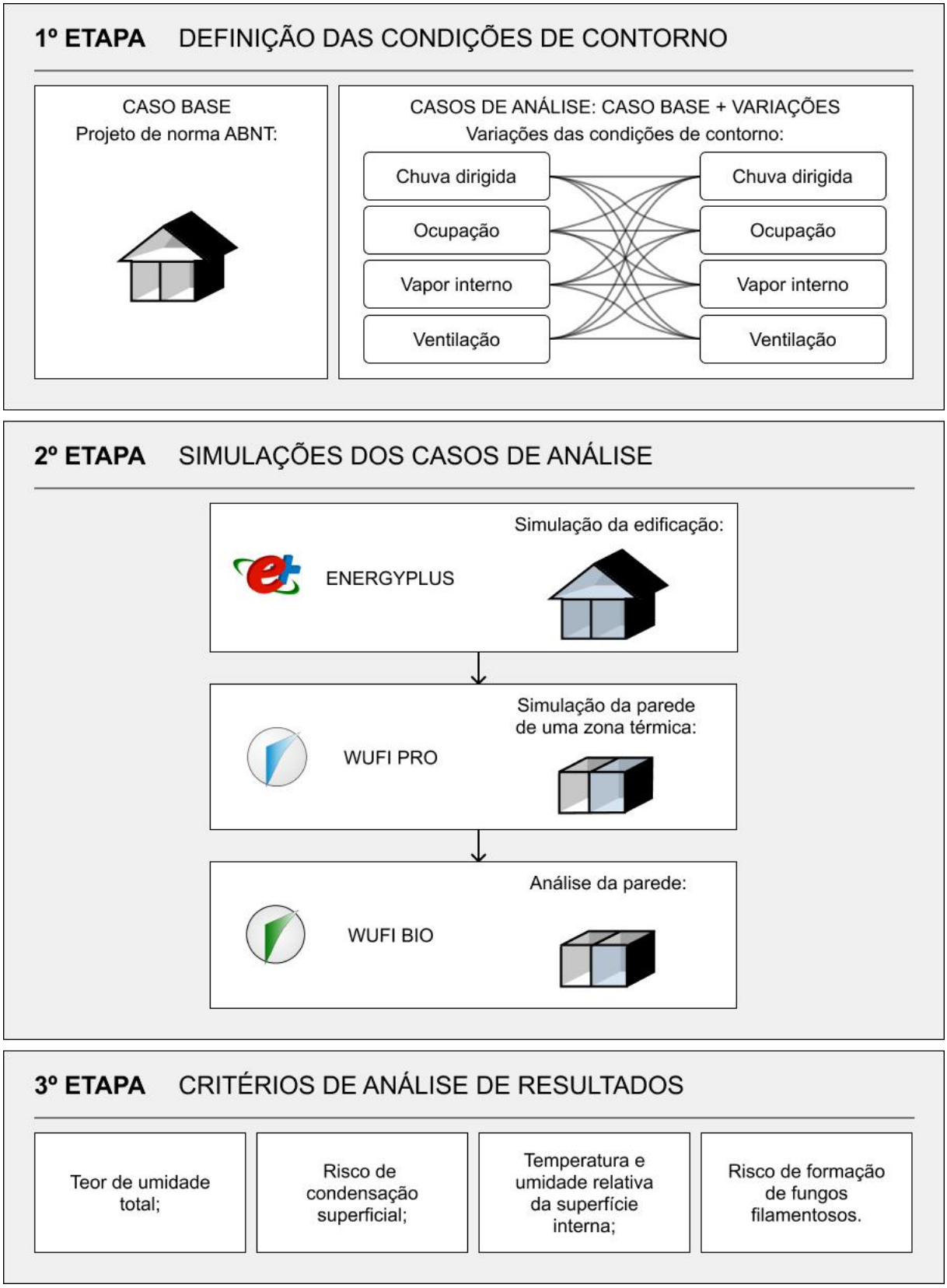
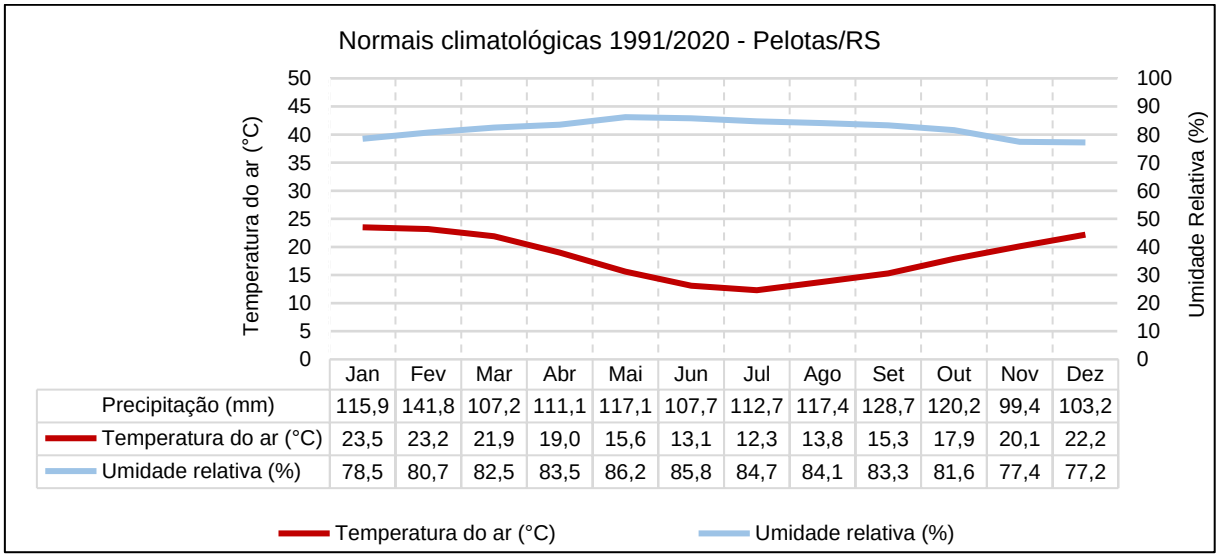


Figura 9 – Fluxograma do método.
Fonte: Autora.

Foram consideradas as condições climáticas da cidade de Pelotas no Rio Grande do Sul, representante da zona bioclimática 2 conforme a norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Pelotas está localizada em latitude de 31°46’19” S e longitude de 52°20’33” O, e possui altitude de 17 m em relação ao nível do mar. Conforme classificação de Köppen e Thornthwaite, Pelotas está no tipo climático *Cfa* sendo considerado como subtropical úmido. O clima é úmido, com o verão quente, ocorrência de precipitação em todos os meses do ano e com pouca ou nenhuma deficiência hídrica (KUINTCHER; BURIOL, 2001).

A Figura 10 mostra as normais climatológicas conforme dados de 1991 até 2020 do INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, apresentando média de umidade relativa de 82,13% e média de temperatura do ar de 18,15°C (INMET, 2022). Para o estudo foi utilizado o arquivo climático desenvolvido por Leitzke *et al.* (2018) pelo método de TRY (ano meteorológico típico) com dados horários de um ano real. Este arquivo contém dados horários da temperatura de bulbo seco (ºC), temperatura do ponto de orvalho (ºC), umidade relativa (%), pressão atmosférica (Pa), radiação extraterrestre horizontal (Wh/m²), radiação global horizontal (Wh/m²), radiação direta normal (Wh/m²), radiação horizontal difusa (Wh/m²), direção do vento (graus), velocidade do vento (m/s) e precipitação (mm).



	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Precipitação (mm)	115,9	141,8	107,2	111,1	117,1	107,7	112,7	117,4	128,7	120,2	99,4	103,2
Temperatura do ar (°C)	23,5	23,2	21,9	19,0	15,6	13,1	12,3	13,8	15,3	17,9	20,1	22,2
Umidade relativa (%)	78,5	80,7	82,5	83,5	86,2	85,8	84,7	84,1	83,3	81,6	77,4	77,2

Figura 10 – Normais climatológicas Pelotas.
Fonte: Autora, adaptado de INMET (INMET, 2022).

3.1. Primeira etapa – Definição das condições de contorno

A primeira etapa consiste na apresentação e definição dos critérios das condições de contorno do rascunho inicial do projeto de norma ABNT “Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento” (ABNT, 2023), e das variações para análise das condições de contorno, conforme mostra a Figura 11.

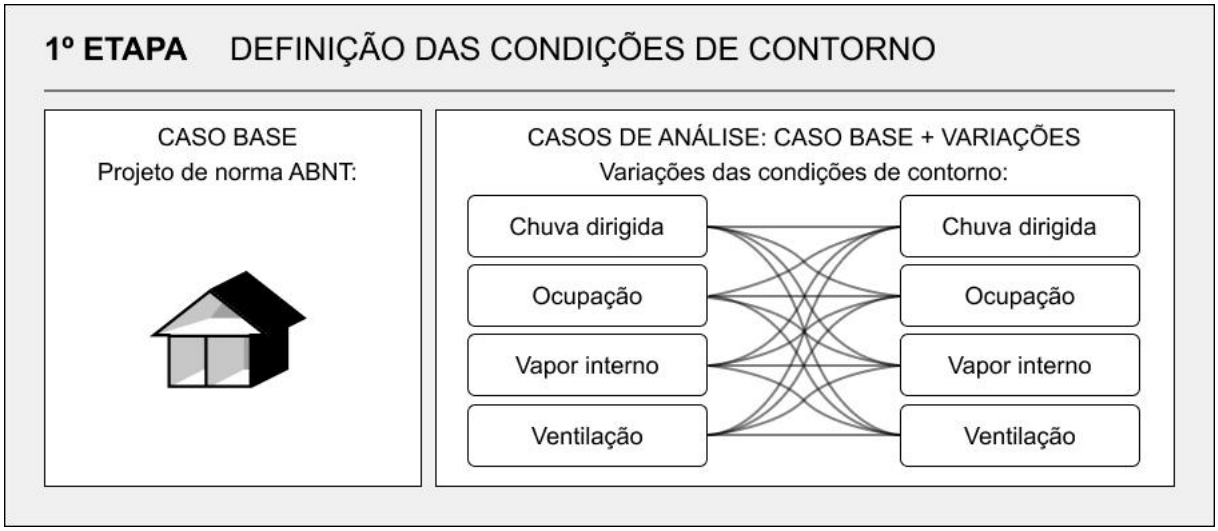


Figura 11 – Fluxograma da etapa 1.
Fonte: Autora.

3.1.1. Condições de contorno do projeto de norma ABNT

O rascunho inicial do projeto de norma ABNT “Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento” (ABNT, 2023), apresenta as condições de contorno baseadas na norma NBR 15575-4 (ABNT, 2021c). Além dessas configurações, é necessário adicionar fontes internas de calor e umidade, conforme mostra a Figura 12. A primeira adição é a consideração dos ambientes da cozinha e banheiro. A ocupação máxima da sala é de quatro pessoas, duas pessoas por dormitório, duas na cozinha e uma no banheiro. O período de ocupação do ambiente da sala foi aumentado, e foi adicionado os períodos de ocupação da cozinha e do banheiro. O horário do acionamento da iluminação permanece o mesmo da NBR 15575-4 (ABNT, 2021c), com a adição da iluminação da cozinha e do banheiro. Os horários e a condição de ventilação são baseados na NBR 15575-4 (ABNT, 2021c), com *setpoint* de abertura das janelas a 19°C, por períodos determinados. E foi adicionado a precipitação de chuva nas simulações, na qual a NBR 15575-4 (ABNT, 2021c) não considera.

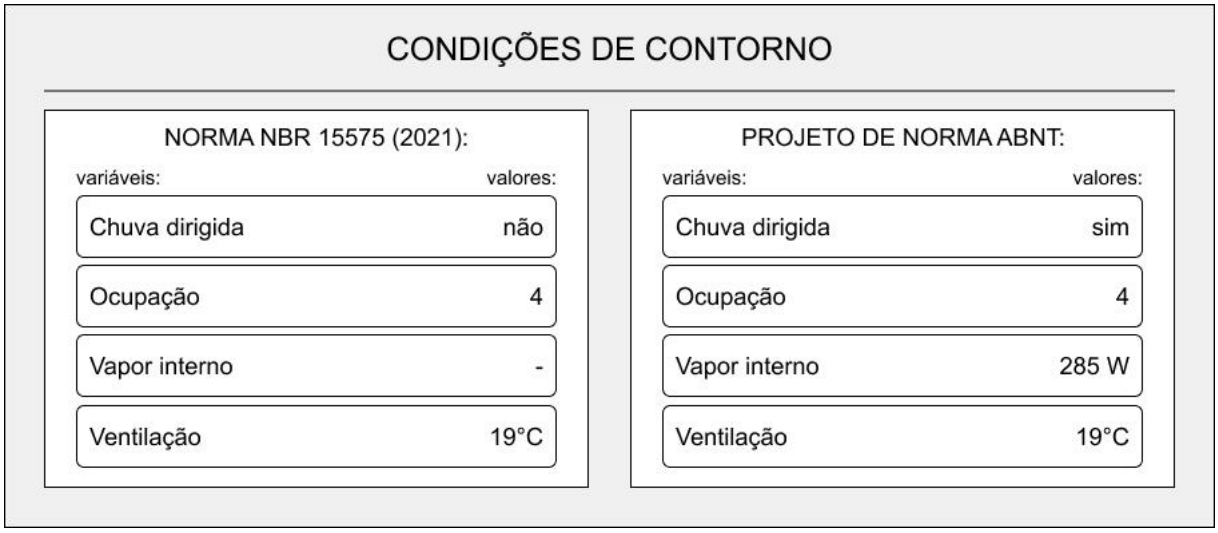


Figura 12 – Condições de contorno da NBR 15575-4 (2021c) e do projeto de norma ABNT (ABNT, 2023).
Fonte: Autora.

3.1.2. Variações para análise

As variações das condições de contorno foram realizadas com objetivo de analisar suas influências em relação ao desempenho higrotérmico da edificação. As variações foram: o tipo de ventilação, a partir da variação do padrão de abertura das janelas; a variação do número de pessoas na edificação; a variação da quantidade de panelas e chuveiro, de acordo com o número de pessoas; e as simulações considerando ou não a chuva dirigida nas fachadas. Como mostra a Figura 13.

As variações de ventilação correspondem a simulações com diferentes *setpoint* de abertura das janelas para ventilação. A variação desses *setpoint* de abertura de janela foram: temperatura interna de 25°C conforme Martins *et al.* (2009); temperatura interna de 23°C; abertura com temperatura interna de 19°C, conforme a NBR 15575-4 (ABNT, 2021c), em que corresponde a condição base do rascunho inicial do projeto de norma ABNT; e por fim, a condição sem ventilação natural com as janelas fechadas durante todo o período da simulação, apenas com ventilação pelas frestas das esquadrias, para verificar a interação do sistema construtivo com o clima.

As variações de ocupação e vapor interno da edificação foram: a condição de ocupação “muito alta” apresenta a ocupação de oito (8) pessoas na edificação, com panelas e chuveiro referentes ao número de pessoas (570 W); a condição “alta” apresenta seis (6) pessoas e as panelas e chuveiro para o mesmo número (427,5 W); a condição “média” compreende a ocupação de quatro (4) pessoas e a produção de

vapor referentes a ocupação (285 W); e a ocupação “leve” apresenta duas (2) pessoas com panelas e chuveiro para duas pessoas (142,5 W).

É proposto ainda a consideração da chuva dirigida nas simulações, como preconiza o rascunho inicial do projeto de norma ABNT. E a condição sem a consideração da chuva dirigida, como consta na NBR 15575-4 (ABNT, 2021c). Todas as variações das condições de contorno para análise são apresentadas na Figura 13.

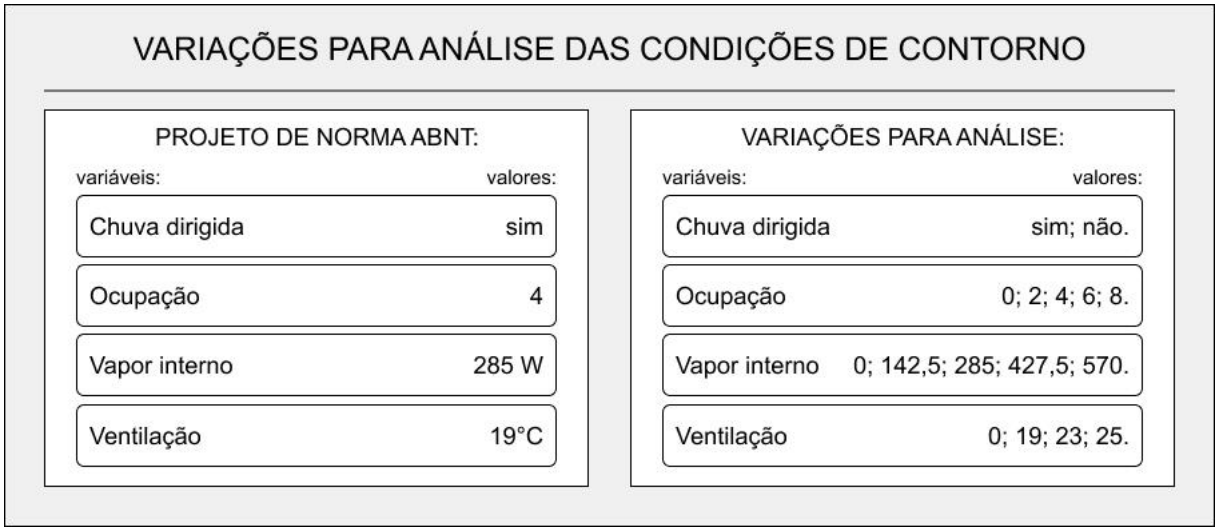


Figura 13 – Variações das condições de contorno.
Fonte: Autora.

Nas Tabelas 3, 4 e 5 abaixo, são especificadas todas as simulações realizadas, cruzando todas as variáveis descritas. A cor azul apresenta todas as variações com a consideração da chuva dirigida atingindo a parede, com 52 simulações. A cor amarela apresenta as variações das condições de contorno sem considerar a chuva dirigida, com 52 simulações. O número total de simulações foram 104.

As condições sem ventilação e sem ganhos internos, mesmo quando há ocupação não é realista, no entanto, foi incluída no estudo para análise mais abrangente do comportamento das variáveis. Como exemplo, é realizada a simulação com ocupação de oito pessoas sem considerar o vapor interno, a fim de analisar isoladamente a geração de vapor pela ocupação. Como também, a geração de vapor interno sem a ocupação para verificar isoladamente a geração de vapor por panelas e chuveiro. A geração de vapor interno é apenas simulada com o número de pessoas relativo ao vapor interno gerado, pois a condição de geração de vapor por panelas e chuveiro para oito pessoas, por exemplo, não é realista cruzando com a ocupação de quatro pessoas.

Tabela 3 – Variações das condições de contorno.

Chuva dirigida	Ocupação	Vapor interno	Ventilação natural
Com chuva dirigida	8 pessoas	8 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		Sem vapor interno	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
	6 pessoas	6 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		Sem vapor interno	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
	4 pessoas	4 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		Sem vapor interno	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
	2 pessoas	2 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		Sem vapor interno	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
	Sem ocupação	Sem vapor interno	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação

Fonte: Autora.

Tabela 4 – Variações das condições de contorno (continuação).

Chuva dirigida	Ocupação	Vapor interno	Ventilação natural
Sem chuva dirigida	8 pessoas	8 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		Sem vapor interno	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
	6 pessoas	6 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		Sem vapor interno	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
	4 pessoas	4 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		Sem vapor interno	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
	2 pessoas	2 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		Sem vapor interno	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
	Sem ocupação	Sem vapor interno	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação

Fonte: Autora.

Tabela 5 – Variações das condições de contorno (continuação).

Chuva dirigida	Ocupação	Vapor interno	Ventilação natural
Com chuva dirigida	Sem ocupação	8 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		6 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		4 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		2 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
Sem chuva dirigida	Sem ocupação	8 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		6 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		4 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
		2 pessoas	25°C
			23°C
			19°C
			Sem ventilação
Número total de simulações			**104**

Fonte: Autora.

A seguir serão apresentadas a tipologia habitacional escolhida para as análises, uma edificação unifamiliar conforme CDHU (CDHU, 1997), e a definição da parede a ser analisada, a parede maciça de concreto moldada *in loco* da Diretriz SiNAT N°001 (2017).

3.1.3. Tipologia construtiva

A tipologia para as análises corresponde a uma edificação unifamiliar, projeto padrão de casa térrea isolada da Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano de São Paulo (CDHU, 1997). A edificação foi escolhida por representar o projeto de referência para as simulações computacionais da Diretriz SiNAT N°001 (2017). A edificação é constituída por sala e cozinha integradas com 14,2 m², 2 dormitórios com 9 m² cada, e banheiro de 3,2 m², como mostra a Figura 14. Possui uma área útil construída de 36,15 m², com dimensões gerais de 6,0 m x 5,9 m de acordo com a Tabela 6.

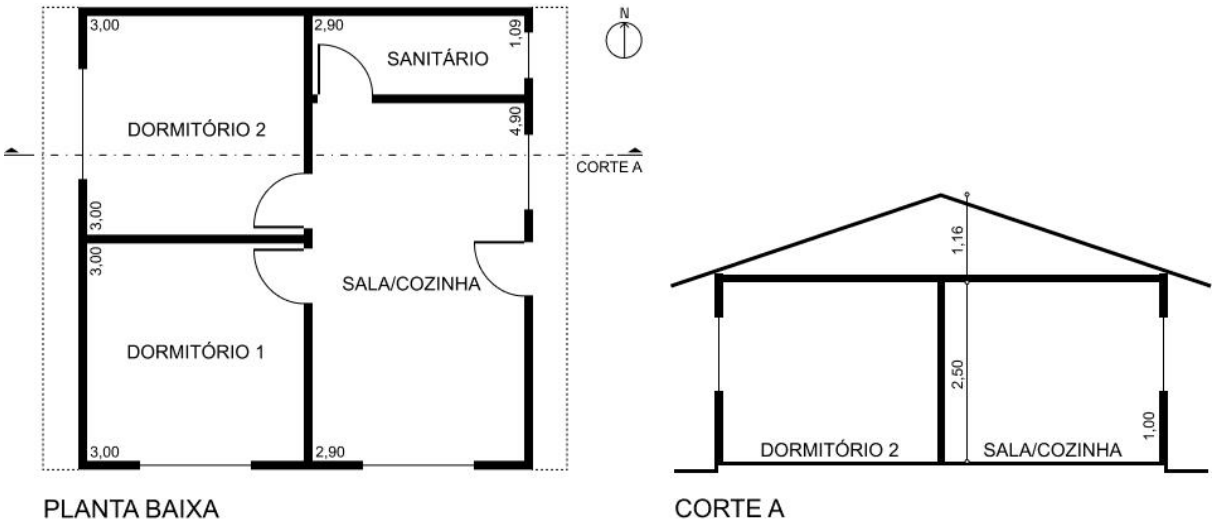


Figura 14 – Planta baixa e corte da tipologia habitacional.
Fonte: Adaptado de CDHU (1997).

Tabela 6 – Características geométricas da tipologia habitacional.

Características geométricas				
Área útil (m²)			**Dimensões gerais (m) (largura x profundidade x altura)**	
36,15			6,00 x 5,90 x 3,66	
Ambiente	**Área (m²)**	**Área envidraçada da fachada (m²)**	**Dimensões das janelas (m) (largura x altura)**	**Área envidraçada da fachada/área de piso (%)**
Banheiro	3,2	0,4	0,6 x 0,6	11,4%
Sala/Cozinha	14,2	1,5 0,9	1,50 x 1,00 1,00 x 0,9	17,0%
Dormitório 1	9	1,5	1,50 x 1,00	17,0%
Dormitório 2	9	1,5	1,50 x 1,00	17,0%

Fonte: Autora, adaptado de CDHU (1997).

A edificação é composta por laje de piso, cobertura de concreto armado, telhado de duas águas com telha de fibrocimento, janelas com vidro simples e portas em madeira, como mostra a Figura 15. O sistema construtivo utilizado é o concreto maciço moldado *in loco* e será abordado a seguir.

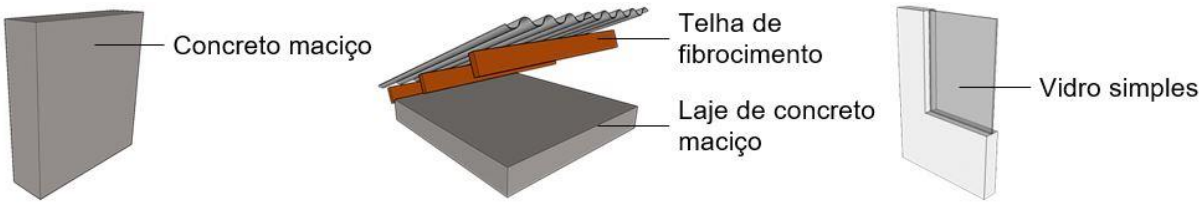
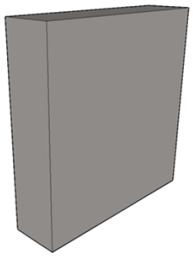


Figura 15 – Composição da edificação habitacional.
Fonte: Autora, imagem adaptada de LabEEE (2022).

3.1.4. Parede maciça de concreto moldada in loco

Foi definido um sistema construtivo para a análise, a parede maciça de concreto moldada *in loco* baseada na Diretriz SiNAT N°001 (SINAT, 2017), como mostra a Tabela 7. A parede maciça de concreto é caracterizada como uma parede estrutural, moldada *in loco,* com formas removíveis, utilizando concreto armado e armadura de aço galvanizado. Esse sistema construtivo pode ser utilizado em casa térreas unifamiliares, sobrados unifamiliares, casas sobrepostas e edifícios multifamiliares (SINAT, 2017). A parede maciça de concreto possui uma espessura de 10 cm e não possui reboco.

Tabela 7 – Parede para análise.

Parede para análise	Propriedades térmicas
 Parede de concreto Diretriz SiNAT N°001	Transmitância térmica 4.40 W/m².K Capacidade térmica 240 kJ/m².K

Fonte: Autora, imagem adaptada de LabEEE (2022).

A partir das condições de contorno presentes no projeto de norma ABNT, das propostas de variações das condições de contorno para análise, como também da tipologia habitacional e da parede para análise, na próxima etapa serão apresentadas as simulações computacionais.

3.2. Segunda etapa – Simulações computacionais dos casos de análise

Na segunda etapa, foram realizadas simulações computacionais analisando o comportamento da parede quanto ao transporte de umidade, conforme mostra o fluxograma na Figura 16.

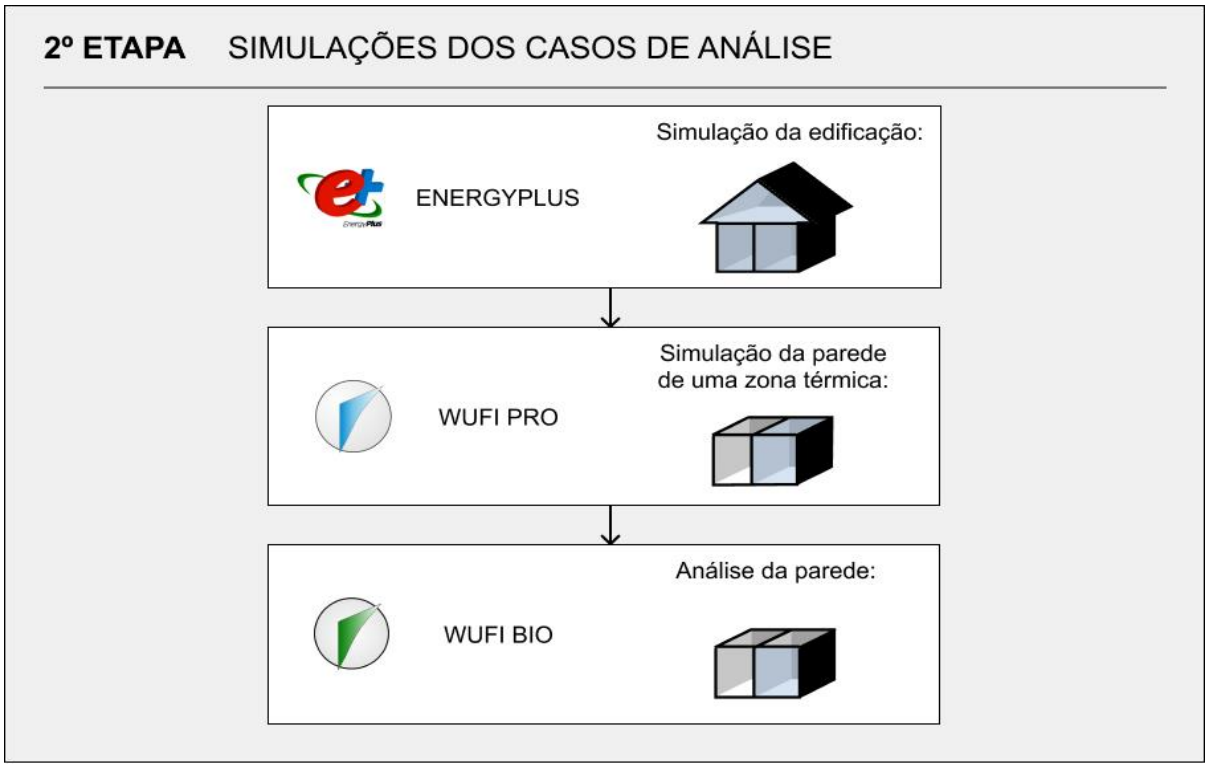


Figura 16 – Fluxograma da etapa 2.
Fonte: Autora.

As simulações computacionais da edificação utilizam os programas *EnergyPlus* 9 e *WUFI Pro* 6.7, considerando a edificação como ventilada naturalmente. A simulação com o programa *EnergyPlus* 9 foi feita para obter os dados da temperatura horária e umidade relativa interna dos ambientes, para então, ser utilizado na simulação higrotérmica, com os dados de ambiente interior no programa *WUFI Pro* 6.7. O programa *WUFI Pro* 6.7 foi escolhido para as simulações higrotérmicas pela sua grande validação experimental. O programa é amplamente utilizado em simulações de transporte de calor e umidade e possui ferramentas de pós-processamento (SANTOS, 2019). E o *plugin WUFI Bio* 4 foi escolhido para a análise dos resultados de risco de ocorrência de fungos filamentosos.

A Figura 17 abaixo apresenta os passos das simulações computacionais. O primeiro passo foi a utilização do programa *EnergyPlus* 9, em que foi configurada a edificação base conforme o rascunho inicial do projeto de norma ABNT (ABNT, 2023). Com a configuração da edificação base pronta, foi realizada uma parametrização de diferentes orientações solares, a fim de definir a orientação solar que será utilizada em todas as simulações posteriores. No próximo passo, foi feita a parametrização de todas as variações para análise, totalizando 104 modelos, com todas as variações cruzando entre si. São elas: a consideração da precipitação de chuva, o número de ocupantes da edificação, o vapor interno do chuveiro e panelas e o padrão de ventilação natural. Posteriormente, foram coletados os resultados referentes à temperatura interna e umidade relativa internas, e foi criado um arquivo do ambiente interior para ser utilizado no próximo passo no programa *WUFI Pro* 6.7.

O passo seguinte refere-se à simulação higrotérmica no programa *WUFI Pro* 6.7, no qual realiza simulações de paredes. Foram realizadas 104 simulações, cada uma com um arquivo do ambiente interno, obtido na simulação anterior no programa *EnergyPlus* 9, representando as condições de contorno internas da edificação. Foram coletados os resultados de teor de umidade total, condensação superficial interna e temperatura e umidade relativa nas superfícies internas. Como último passo, foi utilizado o *plugin WUFI Bio* 4 em que foram coletados os resultados de formação de fungos filamentosos.

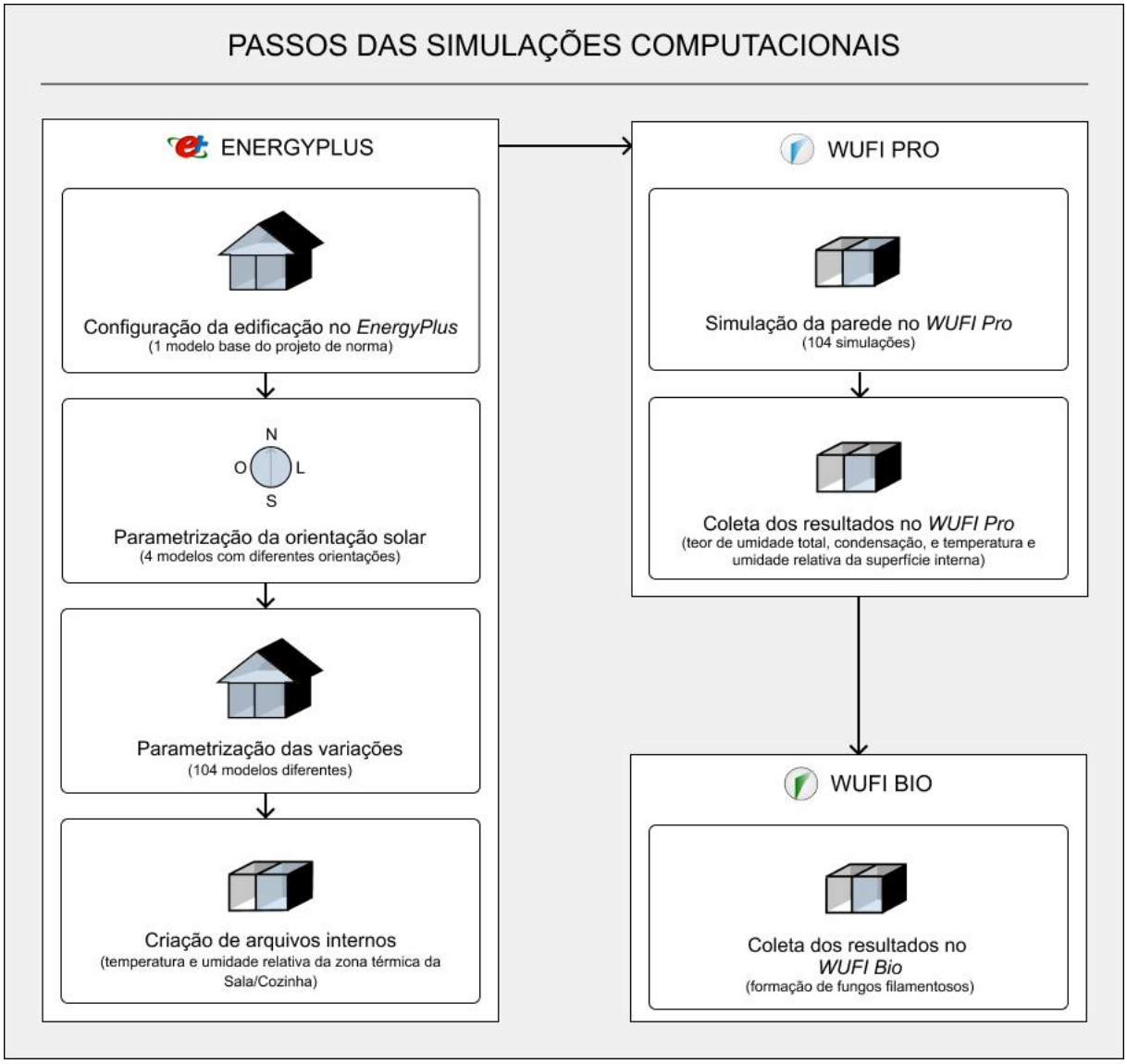


Figura 17 – Passos das simulações computacionais.
Fonte: Autora.

3.2.1. EnergyPlus

Para a utilização do programa *EnergyPlus* 9 foi feita a modelagem da edificação, realizada no programa *SketchUp Make* 2017 utilizando o *plugin Euclid* 9.3, conforme Figura 18. Foram consideradas 5 zonas térmicas (sala de estar conjugada com cozinha, dormitório 1 e 2, banheiro e telhado). O arquivo climático utilizado foi referente a cidade de Pelotas no Rio Grande do Sul, integrante da zona bioclimática 2, é do tipo TRY e foi desenvolvido por Leitzke *et al.* (2018).

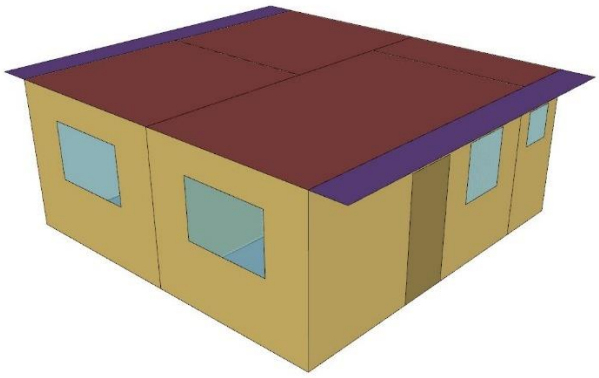


Figura 18 – Modelagem da edificação no programa SketchUp.
Fonte: Autora.

Foi utilizado nas simulações o algoritmo de transferência de calor por convecção CTF - *Conduction Transfer Function*. O algoritmo utiliza o processo de condução térmica, com uma resposta transiente do elemento construtivo, e com determinadas condições previamente calculadas (BATISTA; LAMBERTS; GÜTHS, 2011; DOE, 2018). Não foi utilizado o algoritmo HAMT - *Combined Heat and Moisture Transfer*, em que realiza os cálculos de transferência de calor e umidade simultâneos, devido ao alto tempo computacional pelo grande número de simulações simultâneas realizadas.

Uma primeira simulação computacional foi realizada com a configuração base do projeto de norma ABNT (ABNT, 2023). Posteriormente, foi efetuada uma parametrização apenas da orientação solar. Após a escolha da orientação solar, foi efetuada outra parametrização, em que todas as variações para análise foram simuladas. As parametrizações foram realizadas no programa *jEPlus* 2.1, no qual efetua um número grande de simulações computacionais do *EnergyPlus* simultâneas (ZHANG, 2020). As parametrizações das simulações são descritas a seguir, e posteriormente são apresentadas todas as configurações do programa *EnergyPlus* 9.

3.2.1.1. Parametrizações das simulações no *jEPlus*

A primeira parametrização realizada foi no programa *jEPlus* 2.1, com a variação apenas da orientação solar do modelo, a fim de verificar a orientação solar mais crítica de acordo com a temperatura e a umidade relativa, conforme mostra a Figura 19. Foi utilizado o modelo base configurado de acordo com o projeto de norma ABNT (ABNT,

2023), variando os ângulos da orientação solar de sul, norte, leste e oeste. Como resultado final da parametrização foi verificada a orientação solar sul como a mais crítica.

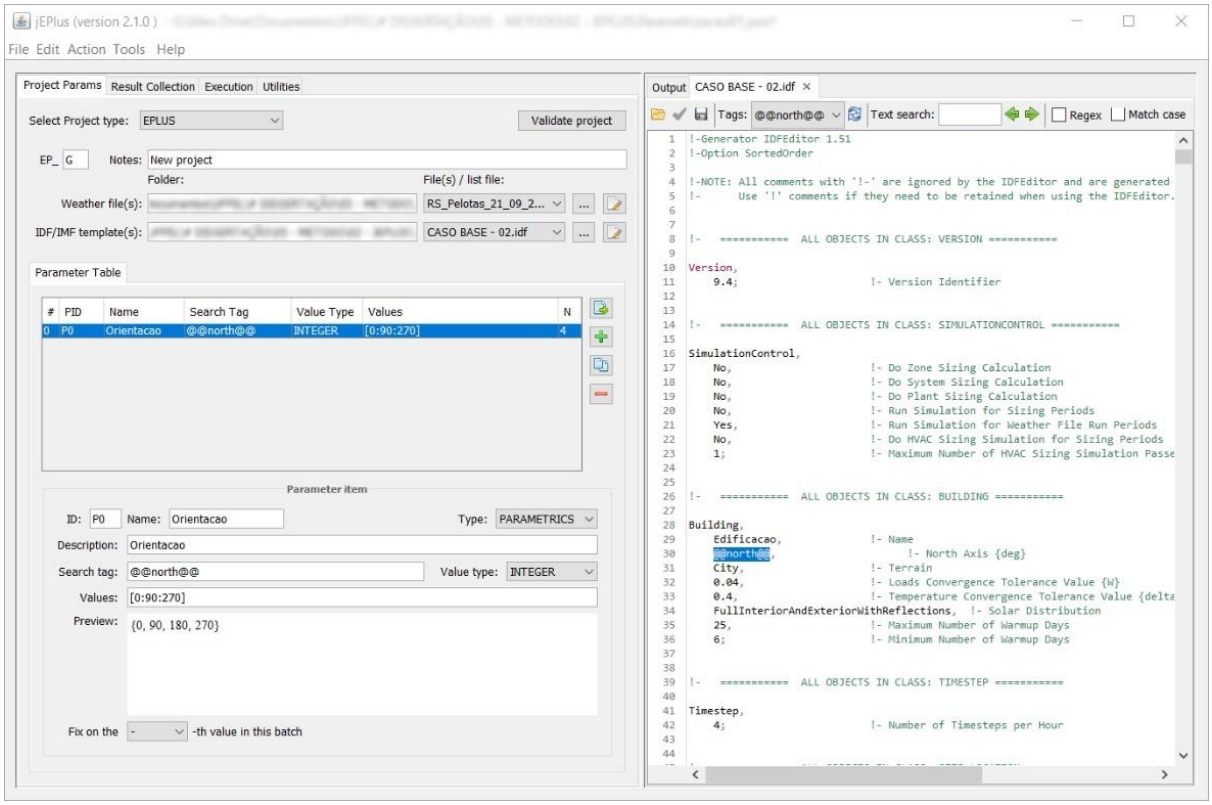


Figura 19 – Programa *jEPlus*, parametrização da orientação solar.
Fonte: Autora, adaptado do programa *jEPlus* (ZHANG, 2020).

A partir da escolha da orientação solar, foi iniciada a parametrização de todas as variações para análise. No programa *jEPlus* 2.1 foi utilizado o modelo base de acordo com o projeto de norma ABNT (ABNT, 2023) e foi parametrizada a precipitação de chuva, ocupação, geração de vapor interno e a ventilação, conforme mostra a Figura 20. Os modelos totalizaram 104 simulações, todas as variações para análise foram mostradas anteriormente na seção “3.1.2. Variações para análise”.

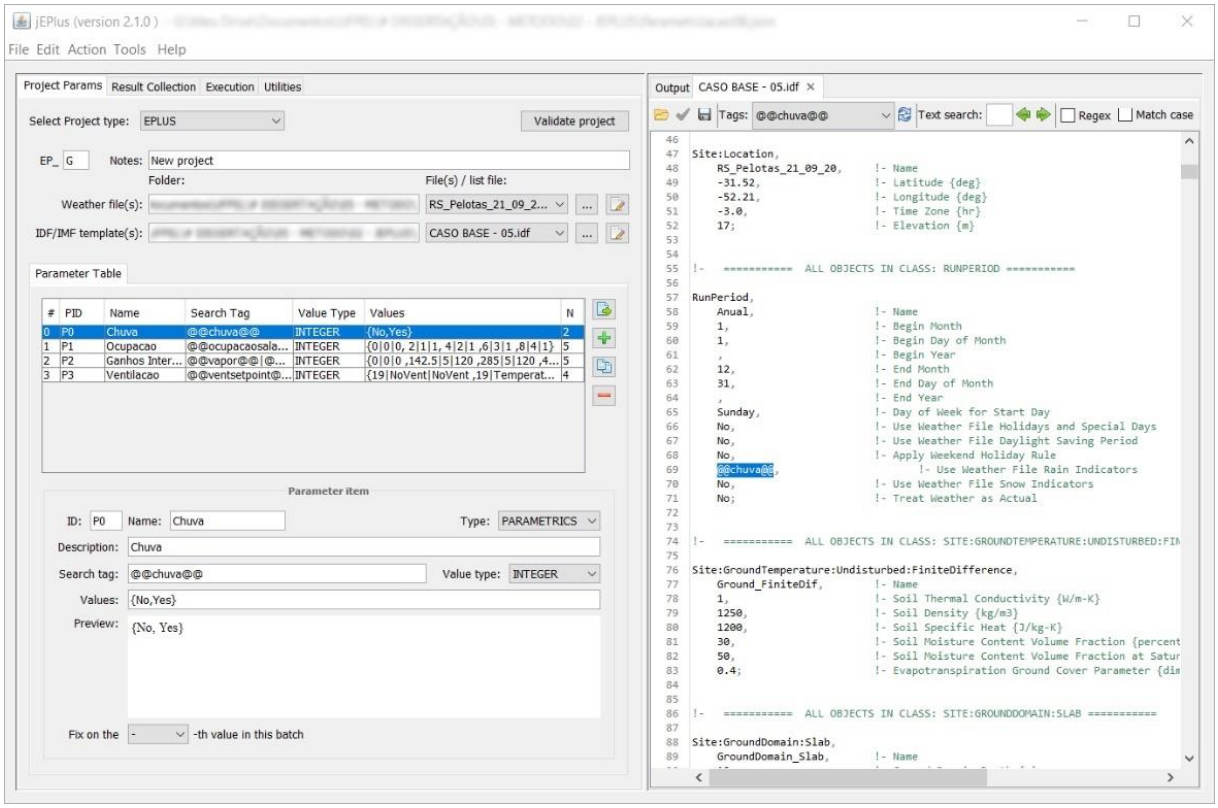


Figura 20 – Programa *jEPlus*, parametrização da chuva, ocupação, vapor interno e ventilação.
Fonte: Autora, adaptado do programa *jEPlus* (ZHANG, 2020).

As configurações no *EnergyPlus* das simulações computacionais de todos os casos, e as configurações específicas das variações das condições de contorno para análise são descritas a seguir.

3.2.1.2. Configurações iniciais

Os arquivos do *EnergyPlus* foram configurados conforme o rascunho inicial do projeto de norma ABNT (ABNT, 2023). A versão do *EnergyPlus* utilizada foi 9.4. O terreno foi especificado como "*City*", considerando em meio urbano, como preconiza a NBR 15575-4 (ABNT, 2021c). Foi especificado um "*Timestep"* de 4 devido ao alto número de simulações.

Quanto a precipitação de chuva, nos modelos que consideram a chuva foi configurado como "Yes" o item "*Use Weather File Rain Indicators*", que considera que a precipitação de chuva altera o coeficiente de convecção das superfícies das paredes e forma um filme que consideram as superfícies "molhadas" (DOE, 2018).

3.2.1.3. Propriedades térmicas dos materiais

As propriedades térmicas dos materiais da edificação são mostradas na Tabela 8. As propriedades térmicas da parede de concreto são conforme a base de dados do programa *WUFI Pro* 6.7, e o material foi escolhido conforme o estudo de Brito, Belizario-Silva (2022). Os valores de concreto armado da cobertura e do piso são de acordo com a base de dados do programa *WUFI Pro* 6.7, igualmente ao da parede de concreto. Os materiais da cobertura e da porta de madeira são conforme a NBR 15220-2 (ABNT, 2022). Os mesmos valores das propriedades térmicas dos materiais são utilizados em ambos os programas de simulação, e as propriedades higrotérmicas são apresentadas posteriormente na seção “3.2.2. *WUFI Pro*”.

Tabela 8 – Propriedades dos materiais construtivos.

Propriedades dos materiais construtivos						
Material	**Espessura (m)**	**Condutividade térmica (W/m.K)**	**Densidade (kg/m³)**	**Calor específico (J/kg.K)**	**Emissividade**	**Absortância**
Parede de concreto						
Concreto armado	0,10	1,6	2200	850	0,9	0,5
Cobertura						
Telha de fibrocimento	0,006	0,65	1700	840	0,9	0,5
Concreto armado	0,10	1,6	2200	850	0,9	0,65
Piso						
Concreto armado	0,10	1,6	2200	850	0,9	0,65
Esquadrias						
Perfis das esquadrias	0,050	56	-	-	0,9	0,58
Madeira das portas	0,03	0,15	550	2300	0,9	0,7

Fonte: Autora, adaptado de NBR 15220-2 (ABNT, 2022) e banco de dados *WUFI Pro* 6.7.

3.2.1.4. Agendas de ocupação, iluminação e equipamentos

Para a configuração do modelo, considerou-se os ambientes como ventilados naturalmente, em que foram utilizados os critérios do projeto de norma ABNT (ABNT, 2023) para as condições de ocupação, como também uso dos sistemas de iluminação e equipamentos, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Agendas de ocupação, iluminação e equipamentos.

Agendas de ocupação, iluminação e equipamentos

Agendas de ocupação

Sala/Cozinha		Dormitórios		WC	
Hora	Ocupação(%)	Hora	Ocupação(%)	Hora	Ocupação(%)
13:00 - 22:00	100	22:00 - 08:00	100	18:00 - 19:00	100

Iluminação (DPI)

Sala/Cozinha		Dormitórios		WC	
Hora	W/m²	Hora	W/m²	Hora	W/m²
13:00 - 14:00	5	06:00 - 08:00	5	18:00 - 19:00	5
16:00 - 22:00	5	22:00 - 24:00			

Equipamento televisão - Potência (W/m²)

Sala/Cozinha	
Hora	W
13:00 - 22:00	120

Taxa metabólica – Calor produzido (W)

Sala/Cozinha		Dormitórios		WC	
Hora	W	Hora	W	Hora	W
13:00 - 22:00	130	22:00 - 08:00	81	18:00 - 19:00	130

Equipamentos de aquecimento de água

Sala/Cozinha		WC	
Hora	W	Hora	W
13:00 - 14:00	285	18:00 - 19:00	285
19:00 - 20:00	285		

Fonte: Autora, adaptado do projeto de norma ABNT (2023).

Nas simulações das variações para análise foram modificados os itens relativos as agendas de ocupação, vapor interno com panelas e o chuveiro, conforme apresentado anteriormente na seção “3.1.2. Variações para análise”.

No projeto de norma ABNT (ABNT, 2023), a ocupação padrão dos ambientes representa duas pessoas por dormitório e o ambiente da sala integrada com cozinha com quatro pessoas. Os horários de ocupação diferem para cada ambiente e são relativos a todos os dias do ano. Os valores de ocupação são apresentados por porcentagem de pessoas no ambiente, sendo 100 o valor total de pessoas no ambiente, como mostra a Tabela 9. Para as simulações com ocupação leve, foi considerado duas pessoas na sala/cozinha e uma em cada dormitório. Para a ocupação média, quatro pessoas na sala/cozinha e duas em cada dormitório. Na ocupação alta, seis pessoas na sala/cozinha e três em cada dormitório. Por fim, na ocupação muito alta, oito pessoas na sala/cozinha e quatro em cada dormitório.

A configuração de uso da iluminação e equipamentos é considerada quando o ambiente é ocupado, e em determinados horários. A densidade de potência instalada das lâmpadas e a potência dos equipamentos utilizadas em cada ambiente são dados na Tabela 9. Para iluminação, foi considerado fração radiante de 0,32 e fração visível de 0,23, e para equipamentos, fração radiante de 0,3, conforme NBR 15575-4 (ABNT, 2021c). Esses valores foram considerados iguais em todas as variações de análise.

A taxa metabólica foi adotada de acordo com o tipo de atividade realizada em cada ambiente, considerando as taxas metabólicas típicas para um adulto de 1,80 m, equivalente a uma pessoa média. Para a sala, foi considerada a taxa metabólica individual de uma pessoa sentada, e para os dormitórios a taxa metabólica de uma pessoa dormindo, ambos com uma fração radiante de 0,5, conforme ASHRAE (ASHRAE, 2017), como mostra a Tabela 9.

Foram consideradas as fontes de umidade no interior da edificação, que representam o vapor de água produzido por equipamentos de aquecimento de água. Para a cozinha, panelas gerando vapor de água, e para o banheiro, um chuveiro com água aquecida gerando vapor de água, de acordo com o projeto de norma ABNT (ABNT, 2023), como mostra a Tabela 9. Esse parâmetro de análise varia conforme a ocupação de pessoas. Para a ocupação muito alta, foi configurado equipamentos para oito pessoas (570 W), para ocupação alta, configurado para seis pessoas (427,5 W),

para a ocupação média, para quatro pessoas (285 W), e para a ocupação leve, para duas pessoas (142,5 W).

3.2.1.5. Temperatura do solo

A temperatura do solo foi configurada a partir do item "*Ground Domain"*, no *EnergyPlus* 9, conforme Eli *et al.* (2019), no qual utiliza um modelo de transferência de calor de diferenças finitas para calcular as temperaturas do solo. Foi utilizado o item "*Site: Ground Domain: Slab*" para as configurações da modelagem do contato do piso com o solo. E foi utilizado o modelo de diferenças finitas no item "*Site: Ground: Temperature: Undisturbed: Finite Difference*", em que utiliza o modelo de diferenças finitas para análise da transferência de calor, utilizando as informações fornecidas pelo arquivo climático para calcular as condições de contorno da superfície (DOE, 2018; ELI *et al.*, 2019).

3.2.1.6. Ventilação natural

A ventilação natural foi configurada no item "*Air Flow Network"*, o parâmetro propicia simular fluxos de ar multizona, e leva em conta os coeficientes de pressão do vento, a geometria da edificação e das esquadrias e o controle de abertura de portas e janelas. O controle automático de abertura de janelas ocorre apenas quando o ambiente estiver ocupado, e foi configurado através da temperatura, ao qual se habilita a abertura da janela quando a temperatura do ar do ambiente ($T_{interna}$) for igual ou superior à temperatura do termostato ($T_{termostato}$), ($T_{interna} \geq T_{termostato}$). E quando a temperatura do ar do ambiente for superior à temperatura externa ($T_{interna} \geq T_{externa}$).

Todas as janelas foram consideradas com abertura de 45% do vão. Todas as portas foram consideradas abertas, com exceção da porta do banheiro e a porta de acesso a habitação, que foram consideradas fechadas. Foi considerado para as janelas abertura apenas durante os períodos de ocupação, exceto a janela do banheiro, que se mantém sempre aberta mesmo durante os períodos desocupados. As janelas e portas quando fechadas possuem características de infiltração por frestas, conforme Tabela 10, conforme NBR 15575-4 (ABNT, 2021c).

Tabela 10 – Descrição dos parâmetros das janelas e portas quando fechadas.

Parâmetros	Portas	Janelas
Coeficiente de fluxo de ar por frestas, quando a abertura está fechada kg/(s.m)	0,0024	0,00063
Expoente de fluxo de ar por frestas quando a abertura está fechada	0,59	0,63

Fonte: Autora, adaptado de NBR 15575-4 (ABNT, 2021c).

Para as variações para análise, foi considerado o termostato para acionamento da abertura das janelas configurado em 19ºC conforme NBR 15575-4 (ABNT, 2021c), 23ºC, 25ºC conforme Martins *et. al* (2009), e sem considerar a abertura das esquadrias para ventilação.

3.2.1.7. Dados de saída

Como dados de saída no programa *EnergyPlus* 9 no item "*Output: Variable*", foram escolhidas as opções de "*Zone Mean Air Temperature*" e "*Zone Air Relative Humidity*" da zona térmica da Sala/Cozinha, para posteriormente ser analisada a parede com orientação solar Sul. Os dados de saída de temperatura horária interna e umidade relativa do ar, foram utilizados para a criação de um arquivo para inserção nas condições de contorno do ambiente interior no programa *WUFI Pro* 6.7. O programa *WUFI Pro* 6.7 disponibiliza uma tabela no *Excel*, na qual foi preenchido os resultados de temperatura e umidade relativa, e criado o arquivo ".WAC" para ser inserido no ambiente interior do programa *WUFI Pro* 6.7, para cada uma das 104 simulações.

3.2.2. WUFI Pro

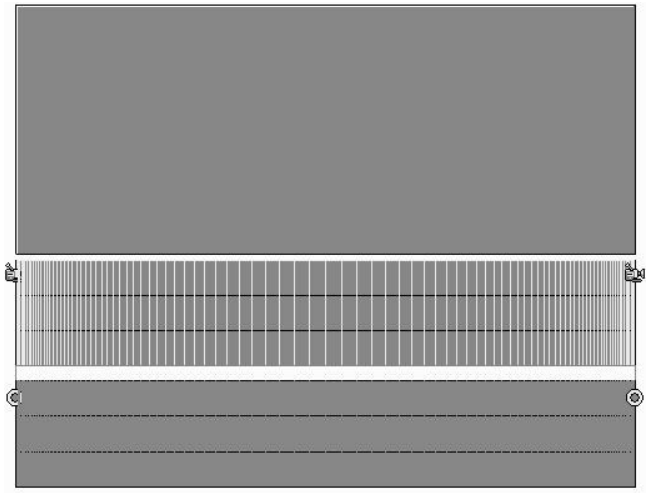
O programa *WUFI Pro* 6.7 foi utilizado para obtenção dos dados do comportamento higrotérmico das paredes. As simulações no programa *WUFI Pro* 6.7 foram rodadas para o período de três anos, e os resultados analisados nesse estudo, foram considerados do último ano de análise.

3.2.2.1. Elemento construtivo

As configurações do elemento construtivo foram feitas de acordo com as propriedades térmicas citadas anteriormente na seção “3.2.1. *EnergyPlus*”. Para as propriedades higrotérmicas foi utilizado o “Concreto A” da pesquisa de Brito, Belizario-Silva (2022), em que realizaram uma análise das propriedades higrotérmicas de concretos disponíveis na base de dados do programa *WUFI Pro* 6.7. O nome do concreto na base de dados é “Cimento C35/45”. As propriedades da parede de concreto são mostradas na Tabela 11.

Tabela 11 – Propriedades higrotérmicas dos materiais da parede.

Parede de concreto



Nome do material	Esp. (m)	Condutividade térmica (W/m.K)	Densidade (kg/m³)	Calor específico (J/kg.K)	Porosidade (m³/m³)	Fator de resist. à difusão de vapor de água
"Cimento C35/45”	0,10	1,6	2200	850	0,18	248

Fonte: Autora, adaptado do banco de dados do programa *WUFI Pro* 6.7.

Foi considerada a malha fina para uma análise mais precisa, e com a opção “Automático II”, em que o programa gera automaticamente a malha necessária para o tratamento numérico das equações de transporte de umidade e calor. Conforme foi observado por Santos (SANTOS, 2019), a variação das malhas disponíveis não apresenta uma diferença significativa nos resultados. Foi escolhida a posição de monitorização nas faces externa e interna da parede para a análise higrotérmica das superfícies das paredes (SCHMIDT, 2019).

3.2.2.2. Coeficientes de chuva incidente

Nas simulações foram consideradas as variações com e sem a chuva dirigida. A chuva dirigida foi considerada com o cálculo segundo a norma ASHRAE Standard 160 (ASHRAE, 2009), que de acordo com Zanoni *et al.* (2018), é o modelo mais rigoroso e que apresenta maior volume de água projetada na parede. O item Fator de exposição à chuva (FE) é um fator que depende das características do terreno e do seu entorno. Nele foi considerado o valor de 1, considerando um edifício com altura <10m e com categoria de exposição média. O Fator de deposição da chuva (FD) considera as influências do próprio edifício, sendo considerado o valor de 0,5, que representa uma parede por debaixo de um telhado de baixa inclinação (ASHRAE, 2009; SCHMIDT, 2019).

Tabela 12 – Fatores de exposição e deposição da chuva.

Fator de exposição à chuva (FE)	
Altura (m)	**Categoria de tipo de exposição: Média**
<10	1,0
Fator de deposição da chuva (FD)	
Paredes debaixo de um telhado de baixa inclinação	0,5

Fonte: Autora, adaptado do manual do programa *WUFI Pro* 6.7.

Para os modelos que não consideram a chuva dirigida, o item “Fator de redução da chuva incidente” foi configurado com o valor 0. Segundo Schmidt (2019), no manual do programa, deve ser considerado o valor zero quando o objetivo é desligar a chuva, com isso o programa suprime qualquer absorção de água da chuva.

3.2.2.3. Coeficientes superficiais de calor e umidade

Os coeficientes de transferência à superfície indicam até que ponto as condições de contorno afetam o desempenho do componente construtivo (SCHMIDT, 2019). Foi adotado para superfície exterior e interior valores fixos de resistência térmica (m².K/W), escolhendo a opção padrão do programa “Parede exterior”. Respectivamente, para superfície exterior o valor padrão de 0,0588 m².K/W, e para superfície interior o valor de 0,125 m².K/W.

Para a superfície exterior foi incluído parte da radiação de onda longa, com o valor de 6,5 W/(m².K), no qual é preenchido automaticamente a partir da escolha do padrão “Parede exterior” de resistência térmica. Não foi considerado o vento para que não ocorra influências da direção do vento nos cálculos.

O valor “*sd”* é considerado um revestimento externo, como tinta, papel de parede ou outros, e descreve a resistência à difusão da camada, em metros. Esse item permite levar em conta um revestimento sem a necessidade de incluir a sua camada na montagem da parede, no qual seria uma camada muito fina (SCHMIDT, 2019). Não foi considerado o valor *sd*, portanto sem revestimento de tintas nas paredes, a fim de considerar a situação mais crítica de absorção de umidade nas paredes.

Para as paredes externas foi definida a absortância de radiação de onda curta com valor de 0,5, que determina a fração da radiação solar incidente absorvida pela parede, e representa uma superfície escura. A emissividade de radiação de onda longa, apresenta a perda de calor por radiação térmica emitida pela superfície da parede, e, com o valor de 0,9, representa uma superfície com alta emissividade, uma superfície não metálica. Foi considerado para a refletividade do solo de onda curta o valor padrão de 0,2, que considera a fração da radiação global de ondas curtas que é refletida pelo solo (SCHMIDT, 2019).

O fator de redução de chuva, considera a parte da água da chuva que atinge a superfície da parede, e o valor considerado foi 0,7, que considera dependente da inclinação do elemento construtivo. Esse valor é indicado para paredes verticais comuns (SCHMIDT, 2019). Como foi citado anteriormente, para os modelos que não consideram a chuva dirigida, o item foi configurado com o valor 0, que representa sem absorção de chuva.

No item condições iniciais são definidas as distribuições iniciais de umidade e temperatura na parede no início dos cálculos da simulação. Para a umidade, foi considerado uma umidade inicial no elemento construtivo em cada camada, em que o valor da umidade inicial do material é preenchido automaticamente conforme o banco de dados. Conforme Schmidt (2019) essa opção é indicada para materiais que contém uma umidade inicial de fabricação ou que não tenham sido protegidos da chuva durante a construção, como é o caso de paredes de alvenaria, concreto, rebocos, entre outros. E para a temperatura, foi considerada a temperatura inicial

como constante através do elemento construtivo. Conforme Schmidt (2019) essa opção é indicada para a maioria dos casos, visto que a distribuição de temperatura se adapta às condições de contorno do ambiente em poucas horas (SCHMIDT, 2019).

3.2.2.4. Controle do período da simulação e controle numérico

As simulações foram feitas para o período de 3 anos, e analisadas apenas no último ano de simulação. O intervalo de tempo adotado foi de 1 hora, mesmo intervalo de tempo do arquivo climático. Para as condições de controle numérico, foi considerado o modo de cálculo padrão, que considera o transporte de umidade e calor simultâneos. Para os parâmetros numéricos, foram consideradas as opções de aumentar a precisão de cálculo e adaptar convergência (SCHMIDT, 2019).

3.2.2.5. Clima exterior e interior

Para os dados da condição de contorno do clima exterior, foi escolhida a opção que permite utilizar um arquivo climático externo nos formatos WET, TRY, EPW e outros. Foi utilizado o arquivo climático da cidade de Pelotas/RS da zona bioclimática 2, referente ao arquivo no formato TRY, desenvolvido por Leitzke *et al.* (2018). Conforme a Figura 21, disponibilizada pelo programa, em que mostra gráficos da temperatura e umidade relativa do ar, e a Figura 22 em que mostra o somatório da radiação solar e da chuva incidente.

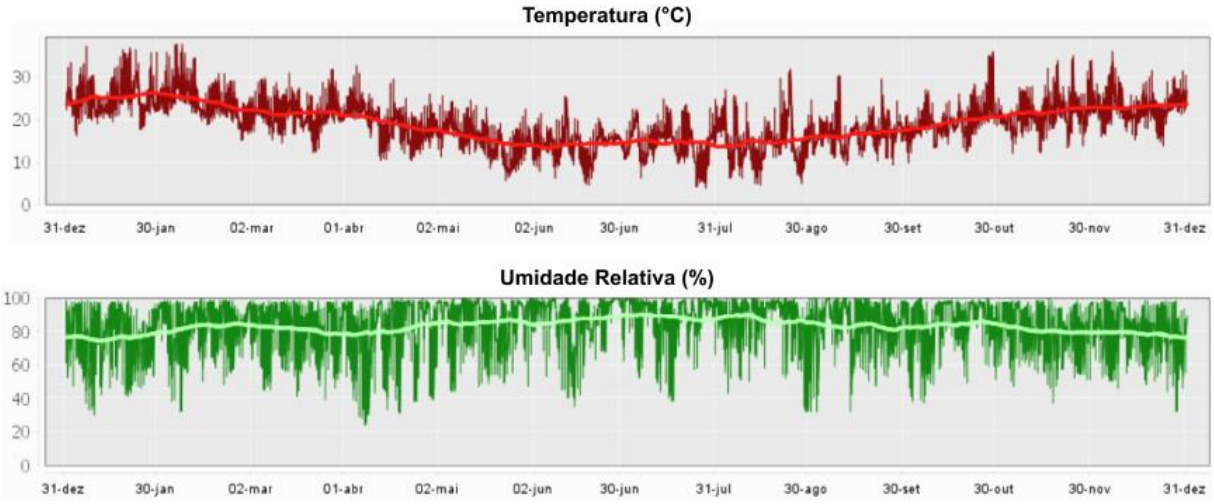


Figura 21 – Análise do clima exterior *WUFI Pro* 6.7 da cidade de Pelotas/RS.
Fonte: Adaptado do programa *WUFI Pro* 6.7 (FRAUNHOFER IBP, 2019a).

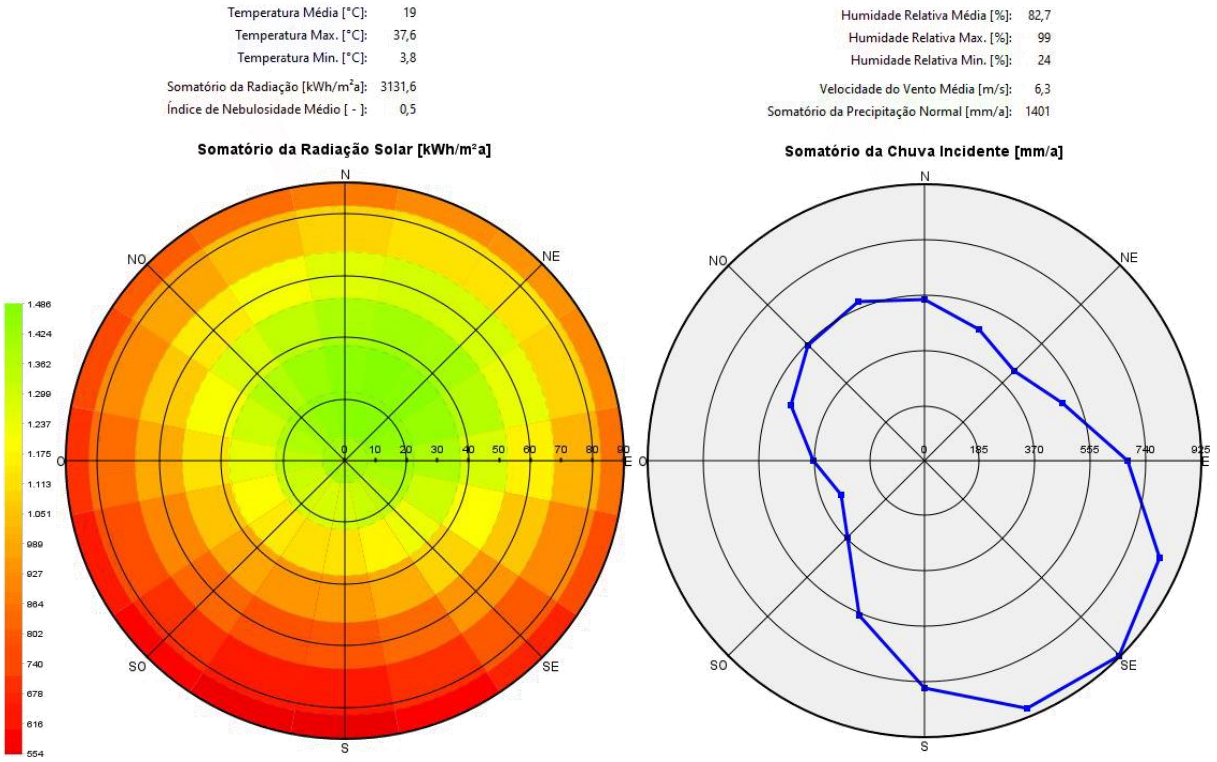


Figura 22 – Análise do clima exterior *WUFI Pro* 6.7 da cidade de Pelotas/RS.
Fonte: Adaptado do programa *WUFI Pro* 6.7 (FRAUNHOFER IBP, 2019a).

Para os dados da condição de contorno do clima interior, foi escolhida a opção que permite utilizar um arquivo com as condições climáticas internas da edificação criadas em outro programa. O arquivo de clima interior foi criado a partir dos dados de saída referentes as simulações com o programa *EnergyPlus* 9, no qual foram utilizados os dados da temperatura horária do ar e a umidade relativa do ambiente interno. O arquivo foi utilizado para a inserção na condição de contorno do clima interior no *WUFI Pro* 6.7 de cada um dos modelos.

3.2.3. WUFI Bio

O *WUFI Bio* foi utilizado para realizar a análise de formação de fungos filamentosos. Foi inserido os dados de entrada da classe de exposição do ocupante, da umidade inicial do esporo e da classe do substrato. A classe de exposição do ocupante foi especificada como “superfície interna ou posição em contato com o ar interno”, a fim de avaliar a face interna da parede que está em contato com o ar interno da edificação e com ocupação de pessoas. A umidade inicial do esporo foi definida em 0,5, valor recomendado do programa. E a classe do substrato foi definida como

classe II, que representa os materiais porosos presentes na construção civil (FRAUNHOFER IBP, 2019b).

3.3. Terceira etapa – Critérios de análise dos resultados

A última etapa consiste na descrição dos critérios que serão avaliados. Os critérios de avaliação definidos para a análise dos resultados foram: o teor de umidade total, risco de condensação superficial de vapor d´água, temperatura e umidade relativa da superfície interna, e o risco de formação de fungos filamentosos.

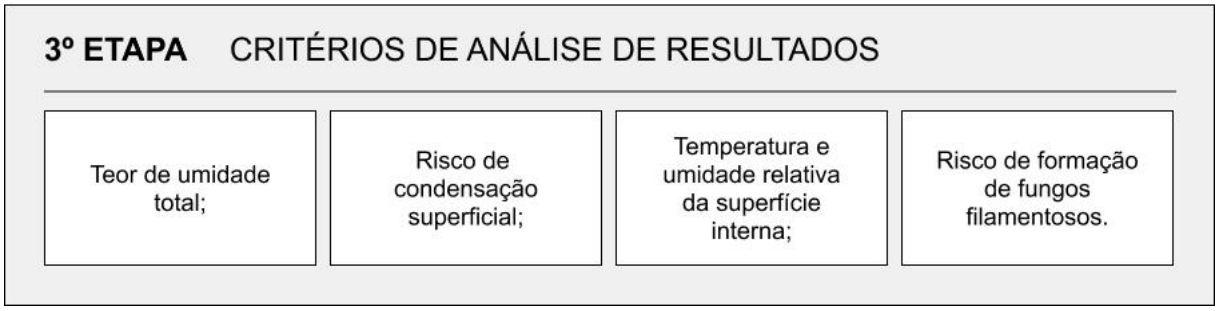


Figura 23 – Fluxograma da etapa 3.
Fonte: Autora.

No próximo capítulo, os resultados serão apresentados em três partes. Primeiro será apresentada a análise de sensibilidade pelo método de variância fatorial completa ANOVA. Após a análise de sensibilidade, será apresentada uma tabela resumo de todos os resultados de cada critério de análise, realizando uma análise descritiva com a interpretação dos fenômenos. E por último, serão apresentados os casos mais críticos dos resultados, com uma análise detalhada de cada um.

Para a análise de sensibilidade foi utilizado o programa *RStudio*, no qual é uma interface que utiliza a linguagem R de programação. A linguagem R permite realizar análises computacionais estatísticas, analisar dados e criar gráficos. O R é um programa de código aberto e é altamente extensível. Permite aos usuários adicionarem funcionalidades por meio de pacotes (R-PROJECT, 2023). Para a realização da análise de sensibilidade, foram utilizados os *scripts* desenvolvidos por Silva (2016), foi utilizado o *script "anova.analyse"*. O pacote *"sensitivity"* disponível no diretório CRAN da comunidade R, as funções *"fac.design"* do pacote *"DoE.base"*, e *"aov"* do pacote *"stats"*. O *script "anova.analyse"* realiza a análise de variância pelo método fatorial completo ANOVA. O método tem como propósito a criação da medida

de sensibilidade valor-F, na qual permite comparações entre variáveis. Quanto maior o valor-F maior é a influência da variável de saída analisada (SILVA, 2016).

Abaixo serão descritos os quatro critérios de análise utilizados nos resultados, e como foram feitas as três partes da análise dos resultados: a análise de sensibilidade, a análise descritiva e a análise dos casos críticos.

3.3.1. Teor de umidade total

O teor de umidade será apresentado a partir do balanço em kg/m² anual da parede, retirado do gráfico de teor de umidade total do programa *WUFI Pro* 6.7. Consiste na soma do teor de água das camadas das paredes multiplicadas pelas espessuras das camadas. Conforme (SCHMIDT, 2019), é a quantidade de água de todo o componente construtivo. Alguns danos podem ser causados quando a quantidade de água é excessiva, e, como regra geral, o acúmulo excessivo de umidade deve ser evitado. O aumento a longo prazo mostra um acúmulo de umidade e uma molhagem maior do que a secagem.

Na análise de sensibilidade, para o critério de teor de umidade, será mostrada a variável mais influente. Foi utilizado o valor máximo e médias de teor de umidade total de cada modelo para o cálculo da variável mais influente. Na tabela resumo foi apresentada a análise descritiva com o valor máximo, mínimo, maior e menor média de cada variável. E os resultados mais críticos serão apresentados por um gráfico anual dos modelos mais críticos.

3.3.2. Risco de condensação superficial

O risco de condensação superficial de vapor foi utilizado para identificar as camadas dos sistemas de vedação com períodos extensos de umidade relativa elevada. Foi avaliado, a partir do número de horas, quando a temperatura de orvalho da superfície interna está igual ou acima à temperatura da superfície interna em uma análise anual para cada modelo.

Em materiais higroscópicos, como o concreto, a condensação do vapor pode ocorrer com umidade relativa menor que 100% (JORNE, 2010; SCHMIDT, 2019). Segundo Schmidt (2019), para materiais higroscópicos com resultados de umidade

relativa acima de 80%, o material pode apresentar risco de ocorrência de danos por degradação, e também o crescimento de fungos filamentosos pela presença de água na forma líquida. Sendo assim, também será avaliado o risco de formação de fungos filamentosos nas paredes, para uma verificação mais criteriosa, no último critério de análise (JORNE, 2010; SCHMIDT, 2019).

Os resultados de condensação superficial serão apresentados na análise de sensibilidade pela variável mais influente, foi calculado pelo número de horas com risco de condensação de cada modelo. Na análise descritiva da tabela resumo, será apresentado com as maiores médias e dos valores mínimos de cada variável. E para os resultados mais críticos será apresentado por gráficos anuais da umidade relativa, temperatura e temperatura ponto de orvalho das superfícies dos modelos mais críticos.

3.3.3. Temperatura e umidade relativa da superfície interna

A temperatura e umidade relativa da superfície interna foram utilizadas para avaliar os valores máximos, mínimos e médias das superfícies das paredes, relativos a superfície interna da parede externa.

Os resultados serão apresentados na análise de sensibilidade pela variável mais influente, que foi calculada pelo valor máximo e médias de temperatura e umidade relativa de cada modelo. Na tabela resumo da análise descritiva pela temperatura e umidade relativa máxima, mínima, maior e menor média das superfícies internas das paredes. E para os resultados mais críticos será apresentada uma tabela dos valores máximos, mínimos, maior e menor média de temperatura superficial e umidade relativa superficial das paredes.

3.3.4. Risco de formação de fungos filamentosos

Para a análise do risco de formação de fungos filamentosos foi utilizada a norma DIN 4108-8 (2022), em que avalia a quantidade de vezes em que a umidade relativa da superfície é maior que 80% por 12h seguidas em cinco dias consecutivos. E o *WUFI Bio* 4, que permite avaliar o risco de crescimento de fungos nas superfícies

das paredes, foram utilizados os valores de teor de umidade crítico e teor de umidade do esporo (FRAUNHOFER IBP, 2019b; SEDLBAUER, 2001).

A norma ASHRAE 160 (2021), que considera limites para a umidade relativa na superfície interior para risco de formação de fungos filamentosos, apresenta os limites de 80% por trinta dias corridos, 98% por sete dias corridos ou 100% por 24h do dia, sendo considerada a pior condição (ASHRAE, 2021; ZANONI *et al.*, 2020). E a norma alemã DIN 4108-8 (2022) apresenta limite de umidade relativa próximo à superfície de 80% durante um tempo de exposição de 12h por dia, por pelo menos cinco dias consecutivos (DIN, 2022). Esta pesquisa adotou o limite de 80% de umidade relativa devido ao estudo de Guerra (2012), no qual identificou diferentes espécies de fungos filamentosos para a cidade de Pelotas/RS e indicou os limites em que desenvolvem-se.

Os resultados do risco de formação de fungos filamentosos serão apresentados na tabela da análise de sensibilidade pelos valores mais influentes, calculados pelo número de vezes em que a umidade relativa ultrapassou 80% por 12h seguidas em cinco dias consecutivos. Na tabela resumo da análise descritiva, pelos valores máximos das vezes em que a umidade relativa ultrapassou 80% por 12h seguidas em cinco dias consecutivos. E para os resultados mais críticos será apresentado por gráficos anuais de teor de umidade crítico e teor de umidade no interior do esporo.

4. Resultados

Os resultados serão apresentados em três etapas. Inicialmente por uma análise de sensibilidade de cada critério analisado. Em seguida, será apresentada uma análise descritiva de todas as variáveis e a discussão dos resultados. E por fim, serão apresentados os casos críticos de cada variável, escolhidos para uma análise mais aprofundada.

4.1. Análise de sensibilidade

Nessa seção é apresentada a análise de sensibilidade a partir do método da análise por variância fatorial completa, ANOVA. A análise de variância, descrita na seção “2.6. Análise de sensibilidade”, consiste na combinação de todas as variáveis entre si, a fim de verificar qual variável é mais sensível em relação a cada critério de análise.

As variáveis foram descritas na Tabela 13. As variáveis dependentes compreendem os parâmetros de entrada do modelo, são os critérios de análise dos resultados. E as variáveis independentes são as variáveis de entrada das simulações, nas quais variam entre si nas simulações computacionais e possuem diversos níveis de variação.

Tabela 13 – Análise de sensibilidade, variáveis dependentes e independentes.

Variáveis Dependentes	Variáveis independentes
- Teor de umidade total da parede; - Condensação superficial da superfície interna; - Temperatura e umidade relativa da superfície interna; - Risco de formação de fungos filamentosos na superfície interna.	- Chuva dirigida; - Ocupação; - Vapor interno; - Ventilação natural.

Fonte: Autora.

A Tabela 14 apresenta a descrição das variáveis dependentes e independentes, dividida em duas partes. Na primeira, a tabela mostra as variáveis dependentes, com as colunas referentes a variável dependente, a unidade de cada uma e a descrição dos critérios de análise. A segunda parte é referente as variáveis independentes, a tabela apresenta o nome da variável, a quantidade de níveis de variação daquela variável, e os valores que foram utilizados nas simulações computacionais da respectiva variável de entrada. As variáveis independentes variam entre si, totalizando 104 simulações, o “Apêndice A. Tabela resumo dos modelos” apresenta a tabela resumo com todas as simulações computacionais e o “Apêndice B. Resumo dos resultados” apresenta os resultados de todas as simulações.

Tabela 14 – Análise de sensibilidade, descrição das variáveis dependentes e independentes.

Variáveis dependentes		
Variável	**Unidade**	**Descrição**
Teor de umidade total	Quantidade de água (kg/m²)	Quantidade de água total da parede, valores máximos e médios. Retirado do gráfico do teor de umidade total do programa *WUFI Pro*.
Condensação superficial	Soma das horas (h)	Número de horas em que a temperatura do ponto de orvalho da superfície foi igual ou superior a temperatura da superfície. Retirado do gráfico de umidade relativa, temperatura e ponto de orvalho da superfície interna do programa *WUFI Pro*.
Temperatura e umidade relativa da superfície interna	Temperatura (°C) e Umidade Relativa (%)	Valores máximos e médias de temperatura e os valores máximos e médias de umidade relativa, das superfícies internas da parede. Retirado do gráfico de umidade relativa e temperatura da superfície interna do programa *WUFI Pro*.
Formação de fungos filamentosos	Sem unidade	Quantas vezes a umidade relativa da superfície é superior a 80% por 12 h em cinco dias consecutivos, da norma DIN 4108-8 (2022). Retirado do gráfico de umidade relativa e temperatura da superfície interna do programa *WUFI Pro*.
Variáveis independentes		
Variável	**Níveis**	**Valores**
Chuva dirigida (CH)	2	0, 1
Ocupação (OC)	5	0, 2, 4, 6, 8
Vapor interno (VP)	5	0, 142.5, 285, 427.5, 570
Ventilação natural (VN)	4	0, 19, 23, 25

Fonte: Autora.

Foram coletados os resultados de todas as simulações, de cada critério de análise, e foi utilizada a linguagem de programação R. Foram utilizados os *scripts* disponibilizados por Silva (2016) em sua tese de doutorado, a partir do *script "anova.analyses"*, o pacote *"sensitivity"*, e as funções *"fac.design"* do pacote *"DoE.base"* e *"aov"* do pacote *"stats"*. Os *scripts* de Silva (2016) foram desenvolvidos para se adequar as simulações computacionais com o programa *EnergyPlus*, de acordo com seus arquivos de entrada e saída.

A análise de sensibilidade com a linguagem R a partir do *script* ANOVA, gerou o arquivo com os resultados do valor-F, quanto maior o valor-F, maior é a influência da variável ou das variáveis combinadas. Esse método permite que variáveis combinadas também sejam avaliadas, como será mostrado na Tabela 15 com os resultados. Como também gerou um arquivo com o *ranking* das variáveis mais influentes de cada critério de análise. Abaixo serão avaliados os resultados do valor-F, e, por fim, os resultados do *ranking*.

Foram realizadas duas análises de sensibilidade para os critérios de análise do teor de umidade total, e temperatura e umidade relativa da superfície interna. Foi realizada uma análise com os valores máximos a fim de verificar os casos mais críticos considerando um curto prazo, e uma análise com as médias com o objetivo de avaliar os valores cumulativos e realizar uma avaliação a longo prazo.

Os resultados da análise de sensibilidade são mostrados na Tabela 15 abaixo, com o valor-F das variáveis individuais e combinadas de cada critério de análise. A esquerda, as variáveis analisadas, e separado por colunas os critérios de análises com o resultado do valor-F. A cor cinza escuro representa o critério mais sensível, e a cor cinza claro representa a segunda variável mais sensível de cada critério de análise.

Tabela 15 – Análise de sensibilidade, resultados do valor-F.

Análise de sensibilidade valor-F								
	Teor de Umidade Total		Condensação Superficial	Temperatura		Umidade Relativa		Fungos
Variáveis	**valor-F** (máx.)	**valor-F** (med.)	**valor-F**	**valor-F** (máx.)	**valor-F** (med.)	**valor-F** (máx.)	**valor-F** (med.)	**valor-F**
Chuva dirigida (CH)	0,96	0,63	0,42	0,17	0,20	0,56	0,03	0,03
Ocupação (OC)	0,27	0,64	0,82	0,18	0,90	0,57	0,80	0,68
Vapor interno (VP)	0,01	0,001	0,10	0,33	0,09	0,05	0,01	0,01
Ventilação natural (VN)	0,01	0,42	0,16	0,75	0,36	0,02	0,59	0,73
Chuva - Ocupação	0,073	0,45	0,215	0,002	0,003	0,57	0,006	0,006
Chuva - Vapor	0,001	0	0,002	0,000	0,000	0,05	0,000	0,000
Chuva - Ventilação	0,002	0,025	0,006	0,001	0,000	0,018	0,001	0,002
Ocupação - Vapor	0,013	0,014	0,054	0,009	0,001	0,163	0,070	0,090
Ocupação - Ventilação	0,001	0,106	0,245	0,518	0,038	0,018	0,057	0,079
Vapor - Ventilação	0,000	0,001	0,076	0,001	0,003	0,001	0,004	0,004

Fonte: Autora.

Entre todos os critérios de análise, podemos observar que a variável mais influente foi a ocupação interna (OC). A chuva dirigida (CH) e a ventilação natural (VN) também apresentaram influência significativa nos resultados. Os resultados da análise de sensibilidade variam conforme o critério de análise, portanto não é possível concluir que apenas uma variável é totalmente influente no desempenho higrotérmico da edificação analisada. Para melhor visualização e discussões dos resultados das variáveis mais sensíveis, a seguir serão apresentados os gráficos e os *rankings* de cada critério de análise separadamente.

4.1.1. Teor de umidade total

A Figura 24 apresenta o gráfico do critério de teor de umidade total, com o valor-F máximo na cor amarelo escuro, e o valor-F médio na cor amarelo claro. A Tabela 16 mostra o *ranking* na ordem da variável mais sensível para a menos sensível.

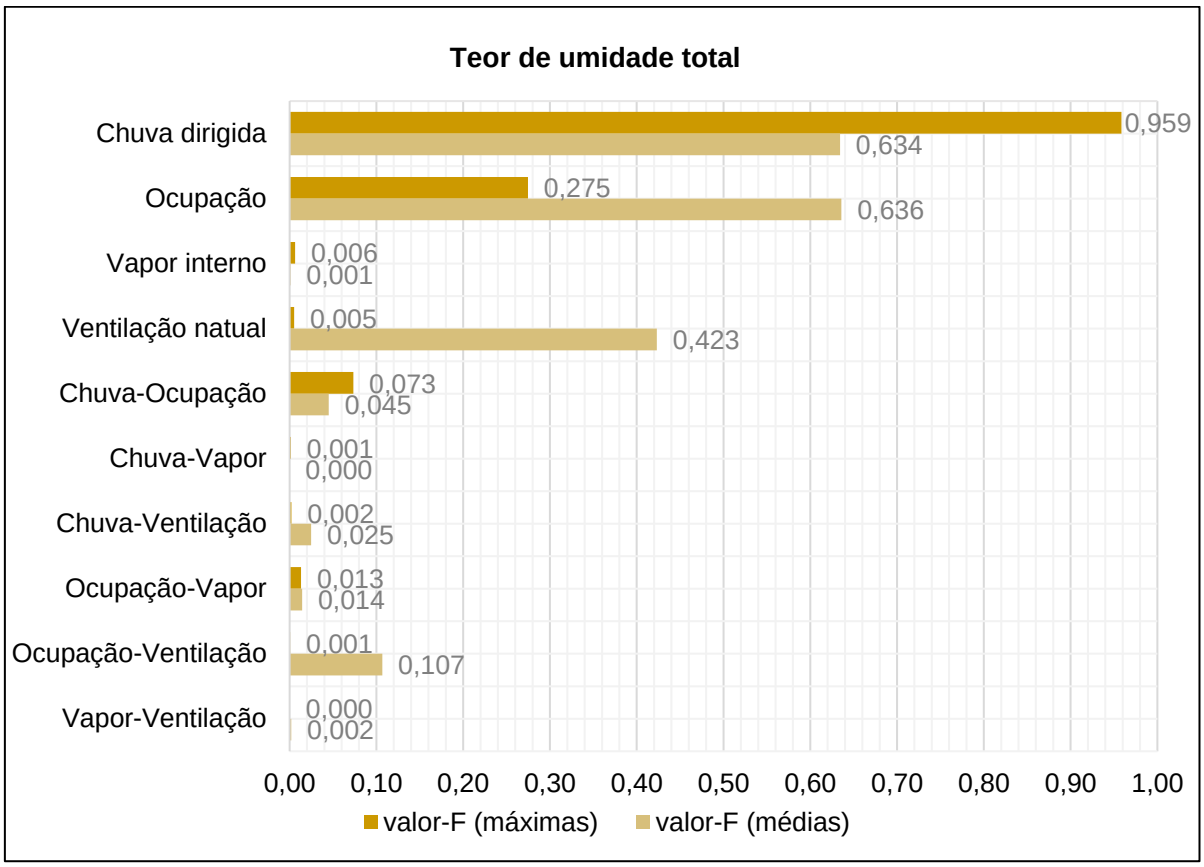


Figura 24 – Análise de sensibilidade do critério teor de umidade total.
Fonte: Autora.

Tabela 16 – Análise de sensibilidade, *ranking* do critério teor de umidade total.

	Teor de umidade total	
Ranking	(máximas)	(médias)
1	Chuva dirigida (CH)	Ocupação (OC)
2	Ocupação (OC)	Chuva dirigida (CH)
3	Chuva (CH) – Ocupação (OC)	Ventilação natural (VN)
4	Ocupação (OC) – Vapor (VP)	Ocupação (OC) – Ventilação (VN)
5	Vapor interno (VP)	Chuva (CH) – Ocupação (OC)
6	Ventilação natural (VN)	Chuva (CH) – Ventilação (VN)
7	Chuva (CH) – Ventilação (VN)	Ocupação (OC) – Vapor (VP)
8	Chuva (CH) – Vapor (VP)	Vapor (VP) – Ventilação (VN)
9	Ocupação (OC) – Ventilação (VN)	Vapor interno (VP)
10	Vapor (VP) – Ventilação (VN)	Chuva (CH) – Vapor (VP)

Fonte: Autora.

Podemos observar que a chuva dirigida obteve o maior valor de 0,959 na análise por meio dos valores máximos, apresentando uma diferença grande em relação a próxima variável ocupação, que apresentou 0,275. A chuva dirigida representou um destaque nos resultados.

Já com as médias, a variável mais sensível foi a ocupação, com o valor de 0,636, no entanto, esse valor foi muito próximo da próxima variável chuva dirigida, com o valor de 0,634. Podemos considerar que a ocupação e a chuva dirigida foram as variáveis mais influentes para os valores médios.

Os dois resultados mostram a grande influência da chuva dirigida nos resultados de teor de umidade total, o que se justifica pelo fato do teor de umidade representar o total de água do elemento construtivo, resultante da água em forma líquida e vapor. Como obtido por Zanoni (2015) em seu estudo, os meses que apresentaram os maiores valores de teor de umidade corresponderam aos meses mais chuvosos, quando a umidade relativa do ar é maior. A autora destaca que a alteração do teor de umidade é decorrente da resposta do sistema construtivo diante da incidência da chuva dirigida, a qual varia de acordo com a direção dos ventos (ZANONI, 2015).

4.1.2. Risco de condensação superficial na superfície interna

A Figura 25 apresenta o gráfico do critério de condensação superficial da análise de sensibilidade com as variáveis analisadas. Na Tabela 17 é mostrado o *ranking* por ordem da variável mais sensível para a menos sensível.

É possível observar que a ocupação obteve a maior sensibilidade no critério de análise condensação superficial, com 0,82 de valor-F. Seguido da chuva dirigida com o valor-F de 0,42, apresentando metade do valor-F da variável ocupação. O terceiro maior valor foi da combinação da ocupação e a ventilação natural, com valor-F de 0,245.

Podemos observar que a variável chuva dirigida é uma variável destaque, assim como encontrado pelo estudo de Pires (2020), em que na zona bioclimática 2 as condições de clima externo impactaram na geração de umidade interna aumentando o risco de condensação superficial, principalmente ao se tratar de edificações com pouco volume interno, como é o caso da habitação social analisada.

A grande influência da variável chuva dirigida nas simulações computacionais deste estudo, mostra a importância de considerar a chuva nas normas técnicas. O rascunho inicial do projeto de norma ABNT (ABNT, 2023) considera a precipitação de chuva, o que torna os resultados mais precisos em relação as simulações higrotérmicas. No entanto, a norma NBR 15575-4 (2021c) não considera a chuva como premissa no método de simulação computacional, o que pode influenciar nos resultados das simulações.

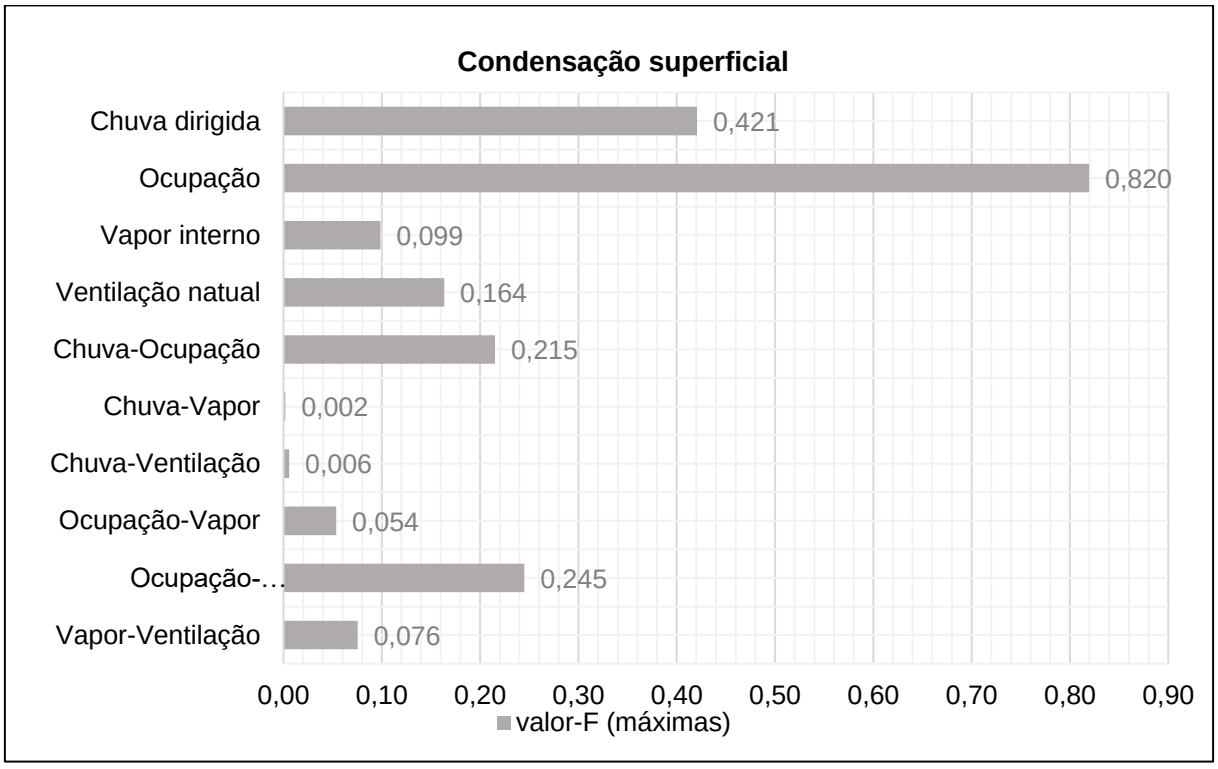


Figura 25 – Análise de sensibilidade do critério condensação superficial da superfície interna.
Fonte: Autora.

Tabela 17 – Análise de sensibilidade, *ranking* do critério condensação superficial da superfície interna.

Ranking	Condensação superficial
1	Ocupação (OC)
2	Chuva dirigida (CH)
3	Ocupação (OC) – Ventilação natural (VN)
4	Chuva dirigida (CH) – Ocupação (OC)
5	Ventilação natural (VN)
6	Vapor (VP)
7	Vapor (VP) – Ventilação (VN)
8	Ocupação (OC) – Vapor (VP)
9	Chuva dirigida (CH) – Ventilação (VN)
10	Chuva dirigida (CH) – Vapor (VP)

Fonte: Autora.

4.1.3. Temperatura e umidade relativa na superfície interna

A Figura 26 apresenta o gráfico do critério de temperatura na superfície interna. Na cor vermelho escuro apresenta o valor-F dos valores máximos de temperatura, e na cor vermelho claro apresenta o valor-F a partir das médias. A Tabela 18 mostra o *ranking* do critério de temperatura, em que a ordem é da variável mais sensível para a menos sensível.

Para as máximas, o critério de análise de temperatura mostra uma maior sensibilidade da variável ventilação natural com um valor-F de 0,747, seguido das variáveis ocupação e ventilação natural em conjunto com um valor-F de 0,518. As duas variáveis apresentam pouca distância entre si, como também pouca distância em relação a terceira variável que é o vapor interno com 0,33.

Na análise de sensibilidade dos valores médios, a variável mais sensível foi a ocupação interna com 0,90, sendo a próxima variável ventilação natural com um valor bem abaixo da primeira, com valor-F de 0,36. A ocupação interna foi o destaque em relação a análise de sensibilidade com os valores médios.

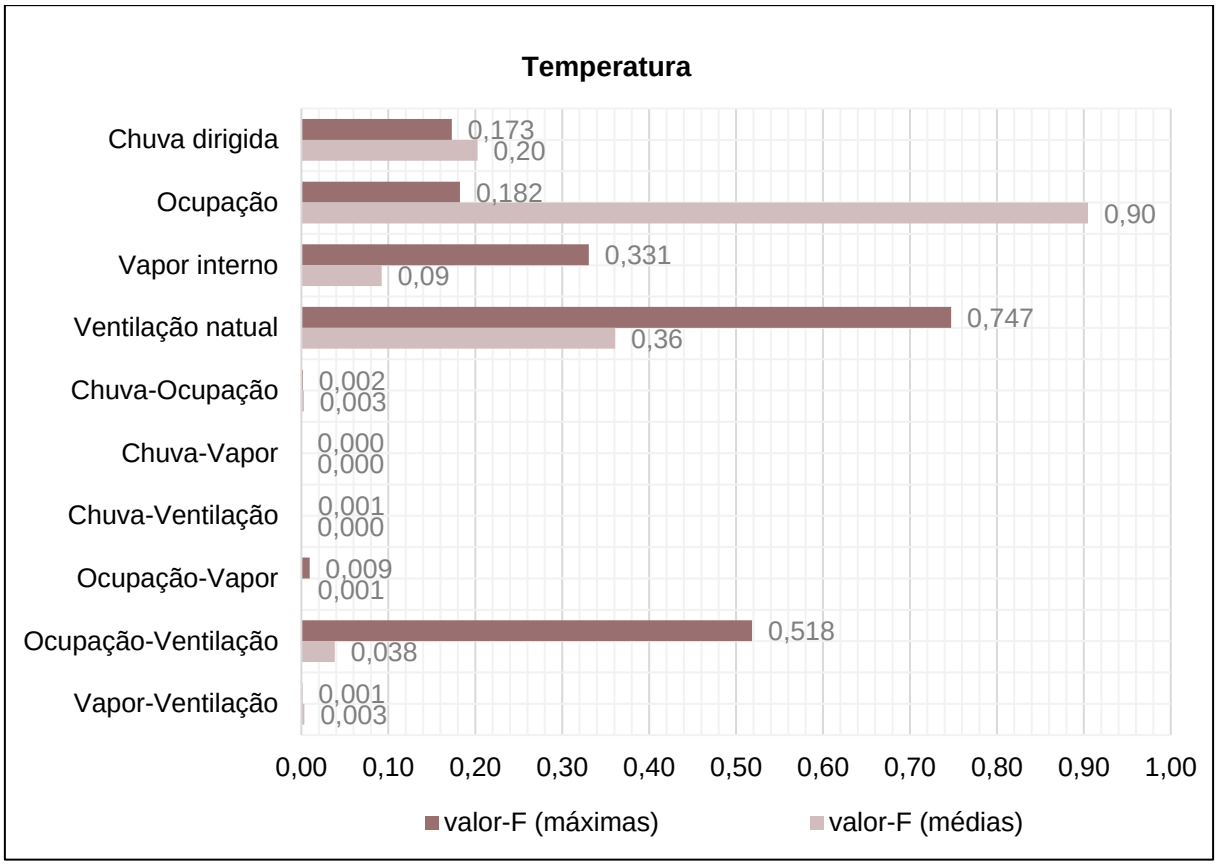


Figura 26 – Análise de sensibilidade do critério temperatura.
Fonte: Autora.

Tabela 18 – Análise de sensibilidade, *ranking* do critério temperatura.

Ranking	Temperatura (máximas)	Temperatura (médias)
1	Ventilação natural (VN)	Ocupação (OC)
2	Ocupação (OC) – Ventilação (VN)	Ventilação natural (VN)
3	Vapor (VP)	Chuva (CH)
4	Ocupação (OC)	Vapor (VP)
5	Chuva (CH)	Ocupação (OC) – Ventilação (VN)
6	Ocupação (OC) – Vapor (VP)	Vapor (VP) – Ventilação (VN)
7	Chuva (CH) – Ocupação (OC)	Chuva (CH) – Ocupação (OC)
8	Vapor (VP) – Ventilação (VN)	Ocupação (OC) – Vapor (VP)
9	Chuva (CH) – Ventilação (VN)	Chuva (CH) – Ventilação (VN)
10	Chuva (CH) – Vapor (VP)	Chuva (CH) – Vapor (VP)

Fonte: Autora.

As variáveis ventilação natural e ocupação interna foram destaque nesse critério de análise, apresentando os maiores valores nas duas análises. A ocupação representa uma alta geração de calor interno, e a ventilação natural contribui para a mudança de temperatura interna da edificação. Dependendo do *setpoint* de abertura da esquadria, a ventilação natural pode auxiliar no controle da temperatura interna, assim como, também pode contribuir com um alto ganho de calor ou perda indesejada.

A análise com as médias apresentaram resultados diferentes da análise com as máximas, mostrando que os modelos podem apresentar picos de alta de temperatura em períodos pequenos. Essas diferenças vão ser mais bem observadas na análise descritiva, em que são mostrados os modelos que apresentaram as máximas, as mínimas e também as médias de temperatura da superfície interna da parede.

No critério umidade relativa na superfície interna a análise de sensibilidade é mostrada na Figura 27, em que a cor azul escuro representa a análise com os valores máximos, e a cor azul claro representa os valores médios. A Tabela 19 mostra o *ranking* da análise de sensibilidade com os valores máximos e com os valores médios, com a ordem do mais sensível para o menos sensível.

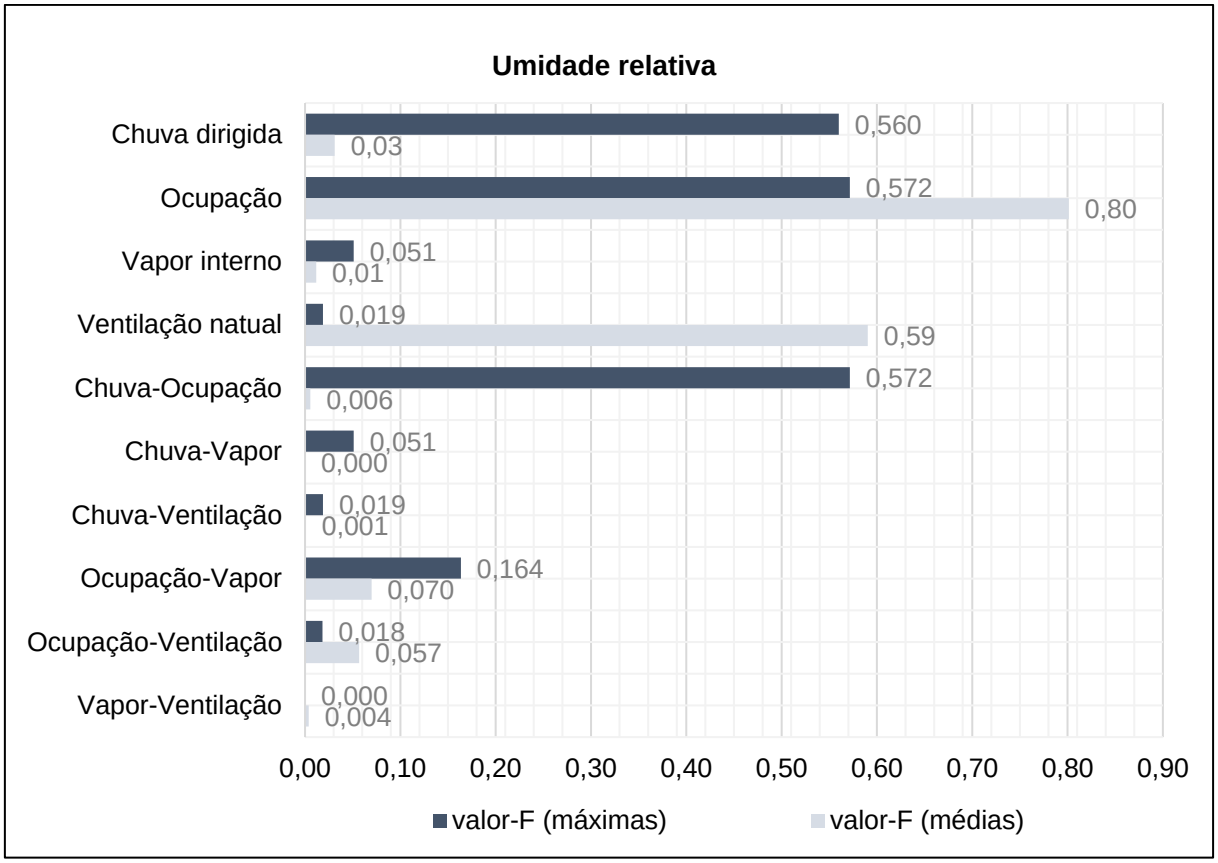


Figura 27 – Análise de sensibilidade do critério de umidade relativa.
Fonte: Autora.

Tabela 19 – Análise de sensibilidade, *ranking* do critério umidade relativa.

	Umidade relativa	
Ranking	(máximas)	(médias)
1	Ocupação (OC)	Ocupação (OC)
2	Chuva (CH) – Ocupação (OC)	Ventilação natural (VN)
3	Chuva dirigida (CH)	Ocupação (OC) – Vapor (VP)
4	Ocupação (OC) – Vapor (VP)	Ocupação (OC) – Ventilação (VN)
5	Chuva (CH) – Vapor (VP)	Chuva dirigida (CH)
6	Vapor interno (VP)	Vapor interno (VP)
7	Ventilação natural (VN)	Chuva (CH) – Ocupação (OC)
8	Chuva (CH) – Ventilação (VN)	Vapor (VP) – Ventilação (VN)
9	Ocupação (OC) – Ventilação (VN)	Chuva (CH) – Ventilação (VN)
10	Vapor (VP) – Ventilação (VN)	Chuva (CH) – Vapor (VP)

Fonte: Autora.

Como será mostrado na próxima seção, a maioria dos modelos do critério de análise de umidade relativa atingiram o valor de 100% de umidade relativa nas superfícies internas da parede, dificultando a análise dos valores máximos nesse quesito.

Nos resultados com os valores máximos, a variável mais sensível foi a ocupação, no entanto, a próxima variável teve um valor extremamente próximo. A próxima variável é a combinação das variáveis chuva dirigida com a ocupação. Sendo assim, a variável ocupação e a combinação da chuva com ocupação foram consideradas as variáveis mais influentes com valores de 0,572.

Em relação a análise de sensibilidade com as médias, a variável ocupação interna obteve o primeiro lugar, com um valor-F de 0,80, seguido da ventilação natural com um valor-F de 0,59.

4.1.4. Risco de formação de fungos filamentosos na superfície interna

No critério de risco de formação de fungos filamentosos na superfície interna, a Figura 28 abaixo apresenta a análise de sensibilidade com as variáveis analisadas. A Tabela 20 mostra o *ranking* da variável mais sensível para a menos sensível.

A partir desses dados é possível analisar que a variável ventilação natural foi a mais sensível, apresentando um valor-F de 0,725, seguida pela variável ocupação, que teve um valor-F de 0,677. Essas variáveis apresentam grande distância das próximas variáveis, representando alta sensibilidade nesse critério de análise.

Como visto por Afonso (AFONSO, 2018) em seu estudo, a variável ocupação interna foi determinante, apresentou alto risco de formação de fungos filamentosos em uma análise *in loco* em habitações de interesse social. E a taxa de ventilação foi outra variável decisiva, pois é responsável pela renovação de ar, e por retirar o excesso de umidade do ambiente em determinadas regiões climáticas, como também por receber altas porcentagens de umidade relativa em climas muito úmidos.

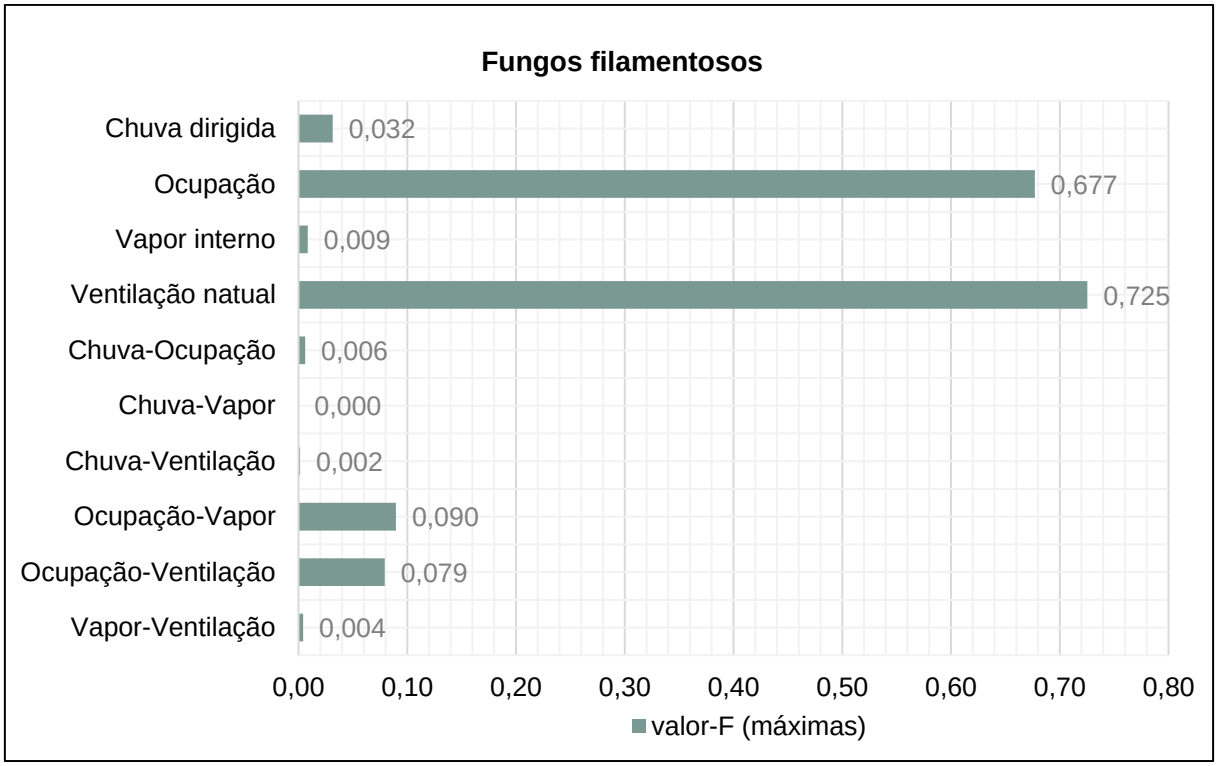


Figura 28 – Análise de sensibilidade do critério risco de formação de fungos filamentosos.
Fonte: Autora.

Tabela 20 – Análise de sensibilidade, ranking do critério risco de formação de fungos filamentosos.

Ranking	Fungos filamentosos
1	Ventilação natural (VN)
2	Ocupação (OC)
3	Ocupação (OC) – Vapor (VP)
4	Ocupação (OC) – Ventilação (VN)
5	Chuva dirigida (CH)
6	Vapor interno (VP)
7	Chuva (CH) – Ocupação (OC)
8	Vapor (VP) – Ventilação (VN)
9	Chuva (CH) – Ventilação (VN)
10	Chuva (CH) – Vapor (VP)

Fonte: Autora.

Com os resultados da análise de sensibilidade apresentados, na próxima seção será apresentada a análise descritiva e discussão dos resultados, a fim de realizar uma análise mais detalhada dos resultados.

4.2. Análise descritiva

Será apresentada uma análise descritiva dos resultados de cada variável, quais os modelos apresentaram os maiores valores, e quais os modelos apresentaram os menores valores. As tabelas foram separadas por critério de análise, primeiro a de teor de umidade total, seguindo com a de condensação superficial da superfície interna, após é apresentada a tabela de temperatura, depois a de umidade relativa da superfície interna, e por fim, a tabela do risco de formação de fungos filamentosos.

Na análise descritiva foram avaliados todos os modelos simulados, em que as variáveis são combinadas entre si. O “Apêndice A. Tabela resumo dos modelos”, apresenta todos os modelos com as variáveis de cada um. O “Apêndice B. Resumo dos resultados” apresenta um resumo dos resultados de todos os modelos de todos os critérios de análise.

Vale ressaltar que a chuva dirigida varia com todas as variáveis, como também a ocupação interna e a ventilação natural. No entanto, a variável vapor interno não varia igualmente com todas as variáveis. Os modelos que não possuem vapor interno, variam com todas as variáveis, entretanto, não variam com todos os números de pessoas, apenas com o número relativo ao vapor interno gerado. Pois é irreal a situação da geração de vapor interno relativo a 8 pessoas quando só possui a ocupação de 4 pessoas. O resumo com todas as variáveis pode ser encontrado na Tabela 3, 4 e 5, e no Apêndice A “Tabela resumo dos modelos”.

4.2.1. Teor de umidade total

A Tabela 21 abaixo apresenta as variáveis na esquerda, e na direita os valores máximos, mínimos, as maiores e menores médias. Abaixo de cada valor está descrito o modelo em que se refere, com a ordem de descrição: modelo de 01 a 104; variável chuva (CH), 0 para sem chuva e 1 para com chuva; variável ocupação (OC), 0 pessoas, 2 pessoas, 4 pessoas, 6 pessoas e 8 pessoas; variável vapor interno (VP), 0 representa sem vapor interno, 2 representa o valor para duas pessoas que é 142,5 W, 4 representa o valor para quatro pessoas 285 W, 6 o valor para seis pessoas 427,5 W e 8 para oito pessoas 570 W; e a variável ventilação natural (VN), com o valor 0 que representa sem ventilação, o valor 19 para o *setpoint* de 19°C, o valor 23 para o *setpoint* de 23°C e o valor 25 que representa o *setpoint* de 25°C.

Tabela 21 – Análise descritiva, teor de umidade total da parede.

Variáveis		Teor de umidade total (Balanço kg/m²) Máximo	Mínimo	Maior média	Menor média
Chuva dirigida (CH)	**00**	14,90 (33: CH0; OC8; VP8; VN0)	7,88 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)	13,83 (33: CH0; OC8; VP8; VN0)	9,67 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)
	01	15,49 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	9,13 (37: CH1; OC0; VP0; VN0)	13,94 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	11,38 (37: CH1; OC0; VP0; VN0)
Ocupação (OC)	**00**	15,34 (101: CH1; OC0; VP8; VN0)	7,88 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)	12,40 (101: CH1; OC0; VP8; VN0)	9,67 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)
	02	15,36 (41: CH1; OC2; VP0; VN0)	7,98 (10: CH0; OC2; VP2; VN19)	12,99 (45: CH1; OC2; VP2; VN0)	10,23 (10: CH0; OC2; VP2; VN19)
	04	15,46 (53: CH1; OC4; VP4; VN0)	8,01 (18: CH0; OC4; VP4; VN19)	13,55 (53: CH1; OC4; VP4; VN0)	10,42 (18: CH0; OC4; VP4; VN19)
	06	15,48 (61: CH1; OC6; VP6; VN0)	8,04 (26: CH0; OC6; VP6; VN19)	13,81 (61: CH1; OC6; VP6; VN0)	10,47 (26: CH0; OC6; VP6; VN19)
	08	15,49 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	8,05 (34: CH0; OC8; VP8; VN19)	13,94 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	10,49 (34: CH0; OC8; VP8; VN19)
Vapor interno (VP)	**00**	15,47 (65: CH1; OC8; VP0; VN0)	7,88 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)	13,79 (65: CH1; OC8; VP0; VN0)	9,67 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)
	02	15,36 (45: CH1; OC2; VP2; VN0)	7,93 (73: CH0; OC0; VP2; VN0)	12,99 (45: CH1; OC2; VP2; VN0)	9,69 (75: CH0; OC0; VP2; VN23)
	04	15,46 (53: CH1; OC4; VP4; VN0)	7,95 (79: CH0; OC0; VP4; VN23)	13,55 (53: CH1; OC4; VP4; VN0)	9,84 (78: CH0; OC0; VP4; VN19)
	06	15,48 (61: CH1; OC6; VP6; VN0)	7,98 (83: CH0; OC0; VP6; VN23)	13,81 (61: CH1; OC6; VP6; VN0)	9,98 (82: CH0; OC0; VP6; VN19)
	08	15,49 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	8,00 (86: CH0; OC0; VP8; VN19)	13,94 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	10,09 (86: CH0; OC0; VP8; VN19)
Ventilação natural (VN)	**00**	15,49 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	7,88 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)	13,94 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	9,67 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)
	19	15,34 (42: CH1; OC2; VP0; VN19)	7,96 (74: CH0; OC0; VP2; VN19)	11,94 (58: CH1; OC6; VP0; VN19)	9,70 (74: CH0; OC0; VP2; VN19)
	23	15,48 (71: CH1; OC8; VP8; VN23)	7,93 (75: CH0; OC0; VP2; VN23)	12,35 (71: CH1; OC8; VP8; VN23)	9,69 (75: CH0; OC0; VP2; VN23)
	25	15,48 (72: CH1; OC8; VP8; VN25)	7,96 (76: CH0; OC0; VP2; VN25)	12,69 (68: CH1; OC8; VP0; VN25)	9,71 (76: CH0; OC0; VP2; VN25)

Fonte: Autora.

A variável chuva dirigida apresenta grande influência nos valores do critério de teor de umidade total. Nos valores mínimos e menores médias, todos os modelos não apresentam chuva (CH0). E nos valores máximos e nas maiores médias, todos os modelos apresentam a chuva (CH1).

Também foi observada uma influência na variável ocupação (OC). Todos os valores mínimos e as menores médias possuem ocupação de 0 (OC0), representando um padrão de influência dessa variável. Os valores máximos e maiores médias possuem uma variação, no entanto a maioria apresenta ocupação de 8 (OC8).

A variável vapor interno (VP) apresentou pouca influência nos resultados. Essa variável possui grande variação nos resultados tanto nos valores máximos, quanto nos mínimos e nas médias.

Os modelos sem ventilação (VN0) estão presentes em todos os valores máximos e maiores médias do teor de umidade total. No entanto, os modelos com valores mínimos não possuem um padrão de ventilação, variam entre sem ventilação (VN0), ventilação com *setpoint* de 19 (VN19) e ventilação com *setpoint* de 23 (VN23). Já nas menores médias a maioria dos modelos possuem ventilação com *setpoint* de 19 (VN19), mas não representam uma totalidade. Mostrando que a variável ventilação natural (VN) não possui tanta influência neste critério.

Como foi observado anteriormente na análise de sensibilidade, pode-se perceber que a variável mais influente do critério teor de umidade total foi a variável chuva dirigida (CH). A chuva dirigida contribuiu no aumento da quantidade de água na parede, como era esperado, visto que o teor de umidade total representa a quantidade de água total no sistema construtivo.

4.2.2. Risco de condensação superficial na superfície interna

Abaixo é apresentada a análise descritiva do critério condensação superficial na superfície interna, que compreende o número de horas (h) em que a temperatura do ponto de orvalho da superfície foi igual ou superior a temperatura da superfície. A seguir a Tabela 22 apresenta as variáveis na esquerda, e os valores máximos e mínimos na direita. Como na tabela anterior, abaixo de cada valor está apresentado o modelo com a ordem de descrição: modelo de 01 a 104; variável chuva (CH), 0 e 1; variável ocupação (OC), 0, 2, 4, 6 e 8; variável vapor interno (VP), 0 representa sem vapor interno, 2 representa o valor de 142,5 W, 4 representa o valor de 285 W, 6 o valor de 427,5 W e 8 de 570 W; e variável ventilação natural (VN), 0, 19, 23 e 25.

No critério de condensação superficial, os modelos de 01 a 08, 10 a 12 e 73 a 88 apresentaram valor 0, o que dificulta uma análise precisa.

Tabela 22 – Análise descritiva, condensação superficial na superfície interna.

Condensação superficial na superfície interna (Total de horas, h)			
Variáveis		**Máximo**	**Mínimo**
Chuva dirigida (CH)	**00**	1547 (33: CH0; OC8; VP8; VN0)	0 (Modelos 01-08, 10-12, 73-88)
	01	2307 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	39 (90: CH1; OC0; VP2; VN19)
Ocupação (OC)	**00**	150 (101: CH1; OC0; VP8; VN0)	0 (Modelos 01-08, 10-12, 73-88)
	02	410 (45: CH1; OC2; VP0; VN0)	0 (Modelos 05-08, 10-12)
	04	762 (53: CH1; OC4; VP4; VN0)	4 (14: CH0; OC4; VP2; VN19)
	06	1405 (61: CH1; OC6; VP6; VN0)	9 (22: CH0; OC6; VP0; VN19)
	08	2307 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	12 (30: CH0; OC8; VP0; VN19)
Vapor interno (VP)	**00**	1258 (65: CH1; OC8; VP0; VN0)	0 (Modelos 01-08)
	02	410 (45: CH1; OC2; VP2; VN0)	0 (Modelos 10-12, 73-76)
	04	762 (53: CH1; OC4; VP4; VN0)	0 (Modelos 77-80)
	06	1405 (61: CH1; OC6; VP6; VN0)	0 (Modelos 81-84)
	08	2307 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	0 (Modelos 85-88)
Ventilação natural (VN)	**00**	2307 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	0 (Modelos 01, 05, 73, 77, 81, 85)
	19	470 (70: CH1; OC8; VP8; VN19)	0 (Modelos 02, 06, 10, 74, 78, 82, 86)
	23	897 (71: CH1; OC8; VP8; VN23)	0 (Modelos 03, 07, 11, 75, 79, 83, 87)
	25	1125 (72: CH1; OC8; VP8; VN25)	0 (Modelos 04, 08, 12, 76, 79, 84, 88)

Fonte: Autora.

A chuva representou uma variável influente neste critério de análise. Os modelos que apresentam a chuva dirigida (CH1) atingiram os valores máximos, assim como os modelos sem a presença da chuva dirigida (CH0) obtiveram os valores mínimos.

O modelo 69 (69: CH1; OC8; VP8; VN0) apresentou o maior valor entre todos os modelos, com 2307 horas de condensação superficial. Esse modelo também apresentou o maior valor no critério anterior referente ao teor de umidade total. Representando que a consideração da chuva (CH1), com ocupação máxima (OC8),

vapor máximo (VP8) (relativo à geração de vapor de 570 W), e sem ventilação (VN0) apresenta um risco grande nos dois critérios analisados.

A maioria dos valores mínimos são relativos aos modelos sem ocupação (OC0), com exceção dos modelos de 10 a 12 que apresentam ocupação de 2 pessoas (OC2), os demais 24 modelos que atingiram o valor mínimo de 0 não possuem ocupação (OC0). Os modelos com valores máximos, todos apresentam a ocupação de 8 pessoas (OC8).

O vapor interno (VP) apresenta variação nos resultados mínimos e máximos, representando pouca influência nos resultados. Como pode ser percebido no resumo dos resultados, no Apêndice B, à medida que a ocupação aumenta, o risco de condensação superficial aumenta consideravelmente. E à medida que o vapor interno aumenta, o risco de condensação não aumenta tanto em comparação a ocupação.

Em relação a variável ventilação natural (VN), os modelos com valores máximos não possuem ventilação (VN0), e para os valores mínimos, não possui um padrão definido devido à dificuldade de análise por diversos modelos apresentarem resultados de condensação superficial de 0.

Como visto na análise de sensibilidade anteriormente, a variável mais sensível foi a ocupação interna (OC). No entanto, pelo motivo de vários modelos apresentarem o mesmo valor, esse critério apresenta uma dificuldade na análise e na interpretação dos resultados a partir da análise descritiva.

4.2.3. Temperatura e umidade relativa na superfície interna

Abaixo, a Tabela 23 apresenta a análise descritiva do critério de temperatura na superfície interna, e na Tabela 24, o critério de umidade relativa na superfície interna. São apresentadas a partir dos valores máximos, mínimos e as maiores médias das superfícies internas da parede. Como na tabela anterior, abaixo de cada valor está o modelo com a ordem de descrição: modelo de 01 a 104; variável chuva (CH), 0 e 1; variável ocupação (OC), 0, 2, 4, 6 e 8; variável vapor interno (VP), 0 representa sem vapor interno, 2 representa o valor para duas pessoas que é 142,5 W, 4 representa o valor para quatro pessoas 285 W, 6 o valor para seis pessoas 427,5 W e 8 para oito pessoas 570 W; e a variável ventilação natural (VN), 0, 19, 23 e 25.

Tabela 23 – Análise descritiva, temperatura na superfície interna.

Temperatura (°C)					
Variáveis		**Máximo**	**Mínimo**	**Maior média**	**Menor média**
Chuva dirigida (CH)	**00**	35,58 (34: CH0; OC8; VP8; VN19)	6,87 (03: CH0; OC0; VP0; VN23)	21,10 (33: CH0; OC8; VP8; VN0)	19,65 (02: CH0; OC0; VP0; VN19)
	01	35,38 (72: CH1; OC8; VP8; VN25)	6,80 (38: CH1; OC0; VP0; VN19)	20,91 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	19,41 (38: CH1; OC0; VP0; VN19)
Ocupação (OC)	**00**	35,12 (73: CH0; OC0; VP2; VN0)	6,80 (38: CH1; OC0; VP0; VN19)	20,23 (85: CH0; OC0; VP8; VN0)	19,41 (38: CH1; OC0; VP0; VN19)
	02	35,13 (12: CH0; OC2; VP2; VN25)	7,23 (43: CH1; OC2; VP2; VN23)	20,44 (09: CH0; OC2; VP2; VN0)	19,57 (42: CH1; OC2; VP2; VN19)
	04	35,29 (20: CH0; OC4; VP4; VN25)	7,61 (50: CH1; OC4; VP0; VN19)	20,67 (17: CH0; OC4; VP4; VN0)	19,70 (50: CH1; OC4; VP0; VN19)
	06	35,45 (28: CH0; OC6; VP6; VN25)	7,77 (58: CH1; OC6; VP0; VN19)	20,90 (25: CH0; OC6; VP6; VN0)	19,81 (58: CH1; OC6; VP0; VN19)
	08	35,58 (34: CH0; OC8; VP8; VN19)	7,55 (31: CH0; OC8; VP0; VN23)	21,10 (33: CH0; OC8; VP8; VN0)	19,92 (66: CH1; OC8; VP0; VN19)
Vapor interno (VP)	**00**	35,26 (30: CH0; OC8; VP0; VN19)	6,80 (38: CH1; OC0; VP0; VN19)	20,84 (29: CH0; OC8; VP0; VN0)	19,41 (38: CH1; OC0; VP0; VN19)
	02	35,13 (12: CH0; OC2; VP2; VN25)	6,89 (90: CH1; OC0; VP2; VN19)	20,44 (09: CH0; OC2; VP2; VN0)	19,56 (90: CH1; OC0; VP2; VN19)
	04	35,29 (20: CH0; OC4; VP4; VN25)	6,83 (96: CH1; OC0; VP4; VN25)	20,67 (17: CH0; OC4; VP4; VN0)	19,56 (94: CH1; OC0; VP4; VN19)
	06	35,45 (28: CH0; OC6; VP6; VN25)	6,85 (99: CH1; OC0; VP6; VN23)	20,90 (25: CH0; OC6; VP6; VN0)	19,57 (98: CH1; OC0; VP6; VN19)
	08	35,58 (34: CH0; OC8; VP8; VN19)	6,88 (104: CH1; OC0; VP8; VN25)	21,10 (33: CH0; OC8; VP8; VN0)	19,58 (102: CH1; OC0; VP8; VN19)
Ventilação natural (VN)	**00**	35,12 (73: CH0; OC0; VP2; VN0)	6,87 (37: CH1; OC0; VP0; VN0)	21,10 (33: CH0; OC8; VP8; VN0)	19,70 (37: CH1; OC0; VP0; VN0)
	19	35,58 (34: CH0; OC8; VP8; VN19)	6,80 (38: CH1; OC0; VP0; VN19)	20,25 (34: CH0; OC8; VP8; VN19)	19,41 (38: CH1; OC0; VP0; VN19)
	23	35,58 (35: CH0; OC8; VP8; VN23)	6,80 (39: CH1; OC0; VP0; VN23)	20,51 (35: CH0; OC8; VP8; VN23)	19,53 (39: CH1; OC0; VP0; VN23)
	25	35,58 (36: CH0; OC8; VP8; VN25)	6,80 (40: CH1; OC0; VP0; VN25)	20,64 (36: CH0; OC8; VP8; VN25)	19,59 (40: CH1; OC0; VP0; VN25)

Fonte: Autora.

No critério de temperatura, a variável sem chuva (CH0) está presente em todos os resultados máximos e maiores médias dos modelos. E a variável com chuva (CH1) está presente na maioria dos resultados mínimos dos modelos, com exceção no modelo 31 (31: CH0; OC8; VP0; VN23), que não possui chuva (CH0), possui ocupação de 8 pessoas (OC8), não possui vapor interno (VP0) e possui ventilação com *setpoint* de 23°C (VN23). Em relação as menores médias, os modelos com chuva (CH1) estão presentes em todos os resultados.

A variável ocupação (OC), em relação ao valor máximo, grande parte dos modelos apresentam ocupação de 8 (OC8), nas maiores médias todos os modelos apresentam a ocupação de 8 pessoas (OC8). Nos valores mínimos e menores médias todos os modelos não possuem ocupação (OC0).

Em relação ao vapor interno (VP), nos valores mínimos a maioria dos modelos não apresentam vapor interno (VP0), com exceção do modelo 43 (42: CH1; OC2; VP2; VN23), em que apresenta chuva (CH1), ocupação de 2 pessoas (OC2), vapor interno de 2 pessoas (VP2) (relativo à geração de vapor de 142,5 W), e ventilação natural com *setpoint* de 23°C (VN23). E para as menores médias a maioria dos modelos não apresentam vapor interno (VP0), com exceção do modelo 42 (42: CH1; OC2; VP2; VN19), em que apresenta chuva (CH1), ocupação de 2 pessoas (OC2), vapor de 2 (VP2) (relativo à geração de vapor para 2 pessoas, 142,5 W), e ventilação natural com *setpoint* de 19°C (VN19).

Ainda em relação do vapor interno (VP), já nos valores máximos a maioria dos modelos apresentam vapor interno de 8 (VP8) (relativo à geração de vapor para 8 pessoas, 570 W), com exceção do modelo 73 (73: CH0; OC0; VP2; VN0) no qual não possui chuva (CH0), não possui ocupação (OC0), possui vapor interno de 2 (VP2) (relativo à geração de vapor para 2 pessoas, 142,5 W) e não possui ventilação (VN0). Já nas maiores médias todos os modelos apresentam vapor interno de 8 (VP8) (relativo à geração de vapor para 8 pessoas, 570 W). O que pode representar que o modelo 73 apresenta um pico de temperatura em determinada hora do ano, mas não apresenta uma continuidade de temperatura por um período longo.

Em relação a variável ventilação natural (VN), apresenta uma variação para os valores máximos com os modelos de 0 (VN0), *setpoint* de 19°C (VN19) e 25°C (VN25). No entanto para as maiores médias, nenhum dos modelos possui ventilação natural (VN0). Os valores mínimos apresentam a variação de modelos com *setpoint* de 19°C

(VN19), 23°C (VN23) e 25°C (VN25). Já nas menores médias todos os modelos possuem ventilação com *setpoint* de 19°C (VN19).

Como foi visto anteriormente na análise de sensibilidade realizada a partir dos valores máximos, a fim de analisar os casos críticos, as variáveis mais influentes foram as com ventilação natural (VN) e a combinação da ocupação com a ventilação natural (OC-VN). Na análise descritiva podemos observar um padrão de ocupação nos valores máximos e mínimos.

E na análise de sensibilidade, para uma análise a longo prazo, em que foi realizada a partir das médias, o padrão com maior influência foi a ocupação (OC) seguido pela ventilação natural (OC-VN). Na análise descritiva das médias podemos observar melhor os padrões em relação à ocupação e à ventilação natural, o que não está tão presente nos valores máximos e mínimos. Esse fato pode se justificar pelo motivo dessa variável ter picos de temperatura em determinados períodos do ano, apresentando as máximas e mínimas diferentes das médias, e diferenciando os resultados das duas análises.

Essa variável mostra a importância de se escolher o método de acordo com o objetivo específico da análise de sensibilidade. Como foi mencionado anteriormente a análise de sensibilidade com os valores máximos foi realizada a fim de verificar os valores mais críticos, e a análise com as médias se deu a fim de verificar um desempenho a longo prazo.

No critério de umidade relativa na superfície interna, Tabela 24, a maioria dos resultados atingiram 100% de umidade relativa, representando uma dificuldade de análise pela análise descritiva.

Em relação à variável chuva dirigida (CH), todos os modelos com valores mínimos e com menores médias não possuem chuva (CH0). Os valores máximos apresentam uma imprecisão nos resultados. Em relação as maiores médias, a maioria dos modelos possui chuva dirigida (CH1), no entanto não é a totalidade, a exceção é o modelo 31 (31: CH0; OC8; VP0; VN23), em que não apresenta chuva (CH0), apresenta ocupação de 8 pessoas (OC8), não apresenta vapor interno (VP0) e apresenta uma ventilação com *setpoint* de 23°C (VN23).

Tabela 24 – Análise descritiva, umidade relativa da superfície interna.

Variáveis		Umidade (%) Máximo	Mínimo	Maior média	Menor média
Chuva dirigida (CH)	**00**	100 (Modelos 09, 13-36)	28,58 (80: CH0; OC0; VP4; VN25)	99,56 (33: CH0; OC8; VP8; VN0)	79,03 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)
	01	100 (Modelos 37-72, 89-104)	29,71 (38: CH1; OC0; VP0; VN19)	99,61 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	81,60 (38: CH1; OC0; VP0; VN19)
Ocupação (OC)	**00**	100 (Modelos 37-40, 89-104)	28,58 (80: CH0; OC0; VP4; VN25)	93,12 (101: CH1; OC0; VP8; VN0)	79,03 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)
	02	100 (Modelos 09, 41-48)	29,97 (10: CH0; OC2; VP2; VN19)	96,44 (45: CH1; OC2; VP2; VN0)	84,10 (10: CH0; OC2; VP2; VN19)
	04	100 (Modelos 12-20, 49-56)	31,17 (19: CH0; OC4; VP4; VN23)	96,71 (53: CH1; OC4; VP4; VN0)	85,23 (18: CH0; OC4; VP4; VN19)
	06	100 (Modelos 21-28, 57-64)	32,03 (27: CH0; OC6; VP6; VN23)	99,38 (61: CH1; OC6; VP6; VN0)	85,83 (26: CH0; OC6; VP6; VN19)
	08	100 (Modelos 29-36, 65-72)	32,04 (30: CH0; OC8; VP0; VN19)	99,61 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	86,14 (34: CH0; OC8; VP8; VN19)
Vapor interno (VP)	**00**	100 (Modelos 13-16, 21-24, 29-32, 37-44, 49-52, 57-60, 65-68)	29,44 (02: CH0; OC0; VP0; VN19)	99,34 (65: CH1; OC8; VP0; VN0)	79,03 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)
	02	100 (Modelos 45-48, 89-92)	28,77 (74: CH0; OC0; VP2; VN19)	96,44 (45: CH1; OC2; VP2; VN0)	80,44 (74: CH0; OC0; VP2; VN19)
	04	100 (Modelos 17-20, 53-56, 93-96)	28,58 (80: CH0; OC0; VP4; VN25)	98,71 (53: CH1; OC4; VP4; VN0)	81,88 (78: CH0; OC0; VP4; VN19)
	06	100 (Modelos 25-28, 61-64, 97-100)	28,88 (84: CH0; OC0; VP6; VN25)	99,38 (61: CH1; OC6; VP6; VN0)	82,88 (82: CH0; OC0; VP6; VN19)
	08	100 (Modelos 33-36, 69-72, 101-104)	28,86 (88: CH0; OC0; VP8; VN25)	99,61 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	83,60 (86: CH0; OC0; VP8; VN19)
Ventilação natural (VN)	**00**	100 (Modelos 09, 13, 17, 21, 25, 29, 33, 37, 41, 45, 49, 53, 57, 61, 65, 69, 89, 93, 97, 101)	43,09 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)	99,61 (69: CH1; OC8; VP8; VN0)	79,03 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)
	19	100 (Modelos 14, 18, 22, 26, 30, 34, 38, 42, 46, 50, 54, 58, 62, 66, 70, 90, 94, 98, 102)	28,77 (74: CH0; OC0; VP2; VN19)	87,61 (66: CH1; OC8; VP0; VN19)	79,23 (02: CH0; OC0; VP0; VN19)
	23	100 (Modelos 15, 19, 23, 27, 31, 35, 39, 43, 47, 51, 55, 59, 63, 67, 71, 91, 95, 99, 103)	29,30 (75: CH0; OC0; VP2; VN23)	92,39 (31: CH0; OC8; VP0; VN23)	79,25 (03: CH0; OC0; VP0; VN23)
	25	100 (Modelos 16, 20, 24, 28, 32, 36, 40, 44, 48, 52, 56, 60, 64, 68, 72, 92, 96, 100, 104)	28,58 (80: CH0; OC0; VP4; VN25)	93,04 (68: CH1; OC8; VP0; VN25)	79,44 (04: CH0; OC0; VP0; VN25)

Fonte: Autora.

Os modelos sem ocupação (OC0) representam todos os valores mínimos e menores médias, mostrando a influência da ocupação interna na umidade relativa das superfícies internas. Nas maiores médias, todos os modelos apresentam ocupação de 8 pessoas (OC8). A geração de vapor interno (VP) apresenta uma variação nos resultados, tanto nos mínimos quanto nas maiores médias, e na menor média todos os modelos não possuem vapor interno (VP0)

O *setpoint* de ventilação (VN) nas menores médias varia de sem ventilação (VN0) e 19°C (VN19), com a maioria do *setpoint* de 19°C (VN19). E nas maiores médias todos os modelos não possuem ventilação (VN0), como também foi encontrado no critério de temperatura.

Podemos realizar uma comparação entre a análise de sensibilidade realizada anteriormente e a análise descritiva. Na análise de sensibilidade, o critério de análise de umidade relativa apresentou uma diferença entre a análise com as máximas e com as médias. A análise com as máximas mostrou a ocupação (OC) como a variável mais influente, seguida do conjunto da chuva (CH) com a ocupação (OC). E a análise descritiva apresenta uma dificuldade de análise com as máximas devido a maioria dos valores atingirem o valor de 100%.

Já na análise de sensibilidade das médias, a variável mais sensível foi a ocupação (OC), seguida da ventilação (VN). O que pode ser percebido na análise descritiva, em que mostra um padrão das maiores médias apresentarem ocupação de 8 (OC8), as menores médias apresentarem sem ocupação (OC0), e a ventilação natural das maiores médias não possuírem ventilação (VN0).

4.2.4. Risco de formação de fungos filamentosos

A análise descritiva do critério de risco de formação de fungos filamentosos na superfície interna foi feita a partir da norma DIN 4108-8 (2022), em que avalia quantas vezes a umidade relativa da superfície é superior a 80% por 12 h em cinco dias consecutivos. Na Tabela 25, abaixo de cada valor está descrito o modelo com a ordem de descrição: modelo de 01 à 104; variável chuva (CH), 0 e 1; variável ocupação (OC), 0, 2, 4, 6 e 8; variável vapor interno (VP), 0 representa sem vapor interno, 2 representa o valor para duas pessoas 142,5 W, 4 representa o valor para quatro pessoas 285 W,

6 o valor para seis pessoas 427,5 W, e 8 para oito pessoas 570 W; e variável ventilação natural (VN), 0, 19, 23 e 25.

Tabela 25 – Análise descritiva, risco de formação de fungos filamentosos na superfície interna.

Risco de formação de fungos filamentosos (Número de vezes)			
Variáveis		**Máximo**	**Mínimo**
Chuva dirigida (CH)	**00**	146 (Modelos 21, 25, 29, 33)	52 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)
	01	146 (Modelos 57, 61, 65, 69)	65 (39: CH1; OC0; VP0; VN23)
Ocupação (OC)	**00**	120 (101: CH1; OC0; VP8; VN0)	52 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)
	02	135 (Modelos 41, 45)	77 (10: CH0; OC2; VP2; VN19)
	04	145 (Modelos 17, 53)	80 (18: CH0; OC4; VP4; VN19)
	06	146 (Modelos 21, 25, 57, 61)	81 (26: CH0; OC6; VP6; VN19)
	08	146 (Modelos 29, 33, 65, 69)	81 (34: CH0; OC8; VP8; VN19)
Vapor interno (VP)	**00**	146 (Modelos 21, 29, 57, 65)	52 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)
	02	135 (45: CH1; OC2; VP2; VN0)	61 (74: CH0; OC0; VP2; VN19)
	04	145 (Modelos 17, 53)	69 (78: CH0; OC0; VP4; VN19)
	06	146 (Modelos 25, 61)	73 (82: CH0; OC0; VP6; VN19)
	08	146 (Modelos 33, 69)	74 (86: CH0; OC0; VP8; VN19)
Ventilação natural (VN)	**00**	146 (Modelos 21, 25, 29, 33, 57, 61, 65, 69)	52 (01: CH0; OC0; VP0; VN0)
	19	90 (Modelos 58, 66)	54 (02: CH0; OC0; VP0; VN19)
	23	112 (31: CH0; OC8; VP0; VN23)	55 (03: CH0; OC0; VP0; VN23)
	25	115 (68: CH1; OC8; VP0; VN25)	55 (04: CH0; OC0; VP0; VN25)

Fonte: Autora.

Para o critério risco de formação de fungos filamentosos na superfície interna diversos modelos atingiram o valor máximo de 146, o que representa que houve 146 vezes em que a umidade relativa da superfície interna da parede foi maior que 80% por um período de 12 h, por pelo menos 5 dias consecutivos.

Outros modelos apresentaram valores iguais, como o valor de 90, 135 e 145. Como diversos modelos atingiram o mesmo valor, esse parâmetro não apresenta uma análise descritiva tão determinante quanto os demais critérios de análise.

Os modelos sem chuva dirigida (CH0) representam os valores mínimos, no entanto, nos valores máximos apresentam uma variação nos resultados. Representando que a variável chuva dirigida não impactou de uma maneira significativa o risco de formação de fungos filamentosos.

Os valores mínimos foram atingidos com os modelos sem ocupação (OC0) e os modelos sem vapor interno (VP0). Os modelos sem ocupação (OC0) são predominantes em todos os resultados mínimos, representando que a variável ocupação interna possui influência nos resultados.

Para os valores máximos, podemos observar que a variável ventilação apresenta um padrão, no qual todos os modelos não possuem ventilação natural (VN0). E todos os modelos que atingiram o valor máximo de 146 não possuem ventilação natural (VN0), os modelos 21 (CH0; OC6; VP0; VN0), 25 (CH0; OC6; VP6; VN0), 29 (CH0; OC8; VP0; VN0), 33 (CH0; OC8; VP8; VN0), 57 (CH1; OC6; VP0; VN0), 61 (CH1; OC6; VP6; VN0), 65 (CH1; OC8; VP0; VN0) e 69 (CH1; OC8; VP8; VN0). E os valores mínimos mostram uma variação nos modelos, a maioria possui ventilação de 19°C (VN19), representando uma variável com grande influência nos resultados.

Esse critério possui dificuldades de visualização e conclusões acerca das variáveis críticas devido a diversos modelos atingirem o mesmo valor máximo, no entanto, podemos observar que as variáveis ocupação e ventilação natural apresentaram um padrão. Como foi visto anteriormente na análise de sensibilidade, as variáveis que mais impactaram os resultados de risco de formação de fungos filamentosos foram a ventilação natural (VN) seguida da ocupação interna (OC).

Com a análise de sensibilidade e a análise descritiva apresentadas, na próxima seção serão apresentados os modelos críticos em relação a cada critério de análise.

4.3. Resultados críticos

Nessa seção são apresentados os resultados críticos verificados anteriormente nos critérios de teor de umidade total, seguindo para a condensação superficial da superfície interna, após, a temperatura e umidade relativa na superfície interna, e por fim, o risco de formação de fungos filamentosos.

Tabela 26 – Resumo dos resultados críticos.

	Teor de umidade total			Cond. sup.	Temperatura			Umidade relativa			Fungos
	Máx.	Min.	Média	Total	Máx.	Min.	Média	Máx.	Min.	Média	Total
01	13,59	7,88	9,67	0	34,82	6,94	19,97	97,66	43,09	79,03	52
02	13,57	8,00	9,73	0	34,65	6,87	19,65	96,54	29,44	79,23	54
03	13,57	7,98	9,71	0	34,65	6,87	19,77	97,30	29,61	79,25	55
04	13,57	8,01	9,71	0	34,67	6,87	19,84	97,30	30,60	79,44	55
05	14,62	10,15	12,36	0	34,42	7,47	20,20	99,97	60,66	95,56	133
06	14,50	8,04	10,35	0	34,83	7,42	19,79	99,86	30,43	84,67	79
07	14,50	8,11	10,75	0	34,83	7,40	19,93	99,86	30,90	87,04	92
08	14,50	8,24	10,96	0	34,84	7,40	20,02	99,86	32,92	88,77	101
10	14,50	7,98	10,23	0	35,12	7,56	19,93	99,89	29,97	84,10	77
11	14,51	8,03	10,69	0	35,12	7,52	20,10	99,90	30,00	86,72	90
12	14,51	8,15	10,91	0	35,13	7,52	20,19	99,90	32,64	88,37	99
21	14,78	12,28	13,46	174	34,08	7,79	20,64	100	80,06	98,84	146
25	14,86	12,56	13,67	581	34,66	7,92	20,90	100	85,15	99,28	146
29	14,84	12,54	13,64	487	34,37	8,01	20,84	100	83,69	99,23	146
33	14,90	12,81	13,83	1547	34,62	8,09	21,10	100	90,05	99,56	146
34	14,71	8,05	10,49	29	35,58	8,06	20,25	100	33,11	86,14	81
38	15,04	9,21	11,42	40	34,47	6,80	19,41	100	29,71	81,60	68
57	15,45	12,35	13,65	773	34,03	7,78	20,45	100	80,06	99,02	146
61	15,48	12,57	13,81	1405	34,51	7,91	20,71	100	84,83	99,38	146
65	15,47	12,56	13,79	1258	34,32	7,99	20,65	100	84,77	99,34	146
69	15,49	12,82	13,94	2307	34,58	8,07	20,91	100	89,90	99,61	146
73	13,63	7,93	9,84	0	35,12	7,20	20,21	98,14	44,60	83,02	73
74	13,49	7,96	9,70	0	34,96	7,01	19,80	97,19	28,78	80,44	61
75	13,48	7,93	9,69	0	34,97	7,01	19,95	97,22	29,30	80,84	63
76	13,47	7,96	9,71	0	34,99	7,02	20,03	97,22	28,80	81,24	64
77	14,08	8,10	10,39	0	35,07	7,34	20,22	99,45	47,43	87,15	93
78	13,77	7,97	9,84	0	34,97	7,07	19,80	98,39	28,99	81,88	69
79	13,78	7,95	9,92	0	34,98	7,06	19,95	98,43	29,43	82,90	74
80	13,78	7,99	9,96	0	34,99	7,06	20,03	98,43	28,58	83,50	76
81	14,38	8,32	10,91	0	34,98	7,40	20,22	99,73	51,02	89,96	107
82	13,99	7,99	9,98	0	34,98	7,14	19,80	99,11	29,17	82,88	73
83	14,04	7,98	10,15	0	34,98	7,12	19,95	99,19	29,56	84,33	80
84	14,04	8,02	10,21	0	34,99	7,12	20,03	99,19	28,88	85,11	83
85	14,48	8,59	11,41	0	34,88	7,38	20,23	99,82	55,35	92,12	117
86	14,16	8,00	10,09	0	34,98	7,13	19,80	99,50	29,35	83,60	74
87	14,24	8,00	10,34	0	34,99	7,11	19,95	99,54	29,70	85,38	83
88	14,24	8,05	10,44	0	35,00	7,11	20,04	99,55	28,86	86,32	88

Fonte: Autora.

A Tabela 26 apresenta um resumo de todos os modelos críticos. São os modelos que apresentam os valores máximos, mínimos e as maiores e menores médias dos critérios de análise. A cor marrom apresenta os maiores valores, e em

cinza claro os menores valores. Os modelos que atingiram os valores máximos do critério de umidade relativa não foram mostrados, pois a maioria dos 104 modelos apresentou valor de 100%. Todos os demais modelos críticos foram apresentados na tabela acima.

4.3.1. Casos mais críticos do teor de umidade total

Serão analisados os casos mais críticos do critério teor de umidade total a partir de um gráfico anual do último ano de análise retirado do programa *WUFI Pro* 6.7.

O maior valor de teor de umidade total foi 15,49 kg/m², no modelo número 69 (69: CH1; OC8; VP8; VN0), que possui chuva dirigida (CH1), ocupação de oito pessoas (OC8), vapor interno relativo a oito pessoas (VP8) (geração de vapor para 8 pessoas, 570 W) e não possui ventilação (VN0). Esse modelo apresentou o valor máximo nos critérios de análise do teor de umidade total, no critério risco de condensação superficial e no risco de formação de fungos filamentosos. Representando um modelo crítico na maioria dos critérios de análise.

O menor valor de teor de umidade total foi de 7,88 kg/m², com o modelo 01 (01: CH0; OC0; VP0; VN0), esse modelo apresentou também a menor média de teor de umidade total, com 9,67 kg/m². O modelo 01 não possui chuva (CH0), não possui ocupação (OC0) nem vapor interno (VP0), e não possui ventilação (VN0). Além desses resultados o modelo obteve o menor valor no risco de formação de fungos filamentosos e a menor média de umidade relativa.

A Figura 29 abaixo apresenta o gráfico do teor de umidade total, do último ano de análise em kg/m² com o modelo 01 (01: CH0; OC0; VP0; VN0) na cor azul, e o modelo 69 (69: CH1; OC8; VP8; VN0) na cor laranja. Podemos observar que o modelo 69 apresentou uma constância no resultado durante todo o ano. O modelo 01 não demostrou uma constância durante o ano, apresentou durante o verão e outono valores semelhantes, no entanto, apresentou picos de alta no final do inverno e começo da primavera.

O modelo 69 se mantém constante devido à alta produção de vapor e ocupação internas durante todo o ano, e a consideração da chuva dirigida. No entanto, o modelo 01 apresenta um pico nos meses de inverno. O modelo 01 pode ter apresentado influência das condições climáticas externas de umidade relativa. Observa-se que o

teor de umidade total aumenta nos meses de maio a outubro, em que são os meses com valores mais altos de umidade relativa do clima analisado.

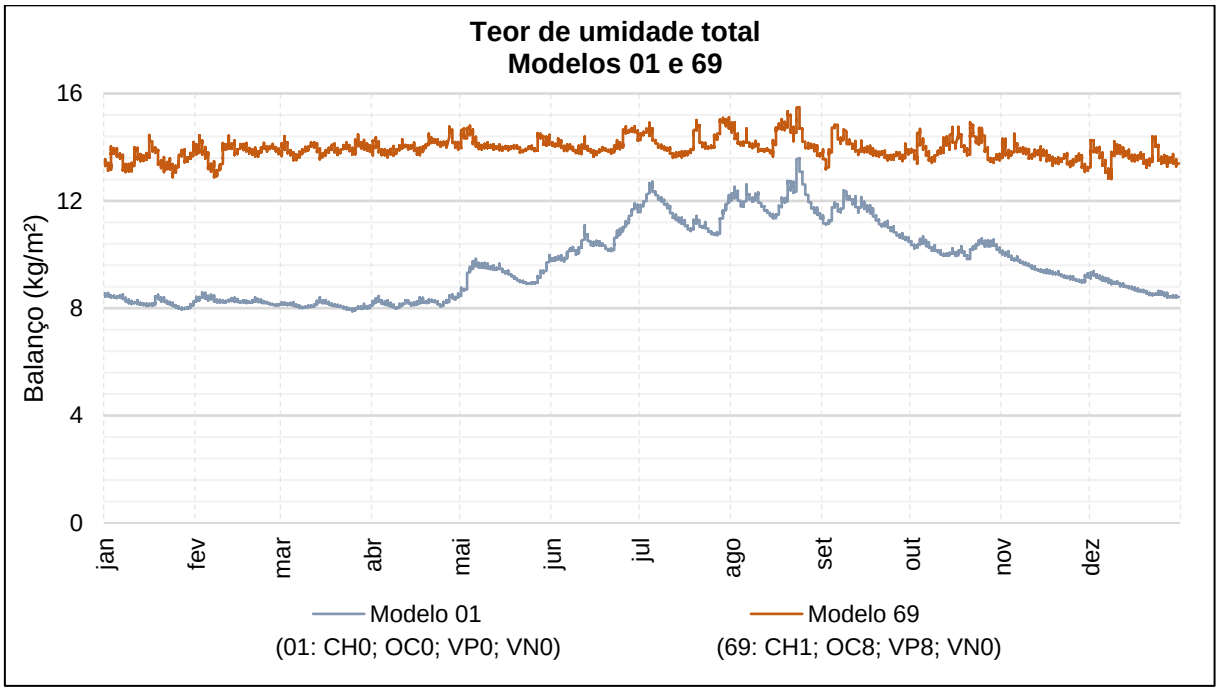


Figura 29 – Gráfico teor de umidade total, modelos 01 e 69.
Fonte: Autora.

Como será mostrado na próxima seção, o modelo 69 apresentou umidade relativa próxima a 100% durante todo o ano, já o modelo 01 apresentou um aumento durante os períodos de inverno, corroborando com a hipótese de que a umidade relativa externa pode ter influenciado o pico de teor de umidade total da parede 01. Como foi mencionado anteriormente, Zanoni (2015) afirma que o teor de umidade total é o conjunto de diversos fatores, como a chuva dirigida, a umidade relativa do ar, as temperaturas superficiais e as características dos materiais.

4.3.2. Casos mais críticos na condensação superficial

Essa seção apresenta os casos mais críticos do critério condensação superficial da superfície interna a partir de um gráfico do último ano de análise, com a temperatura, a temperatura do ponto de orvalho e a umidade relativa da superfície interna. A superfície apresenta risco de condensação quando a temperatura do ponto de orvalho da superfície é maior ou igual a temperatura da superfície.

O maior valor foi de 2307 horas de condensação superficial do modelo número 69 (69: CH1; OC8; VP8; VN0), o mesmo modelo do critério anterior. No qual possui chuva dirigida (CH1), ocupação de oito pessoas (OC8), vapor interno relativo a oito pessoas (VP8) e não possui ventilação (VN0). Esse modelo apresenta valores críticos nos dois critérios de análise mencionados até então, o mesmo modelo também será mencionado na próxima seção em que apresentou a maior média de umidade relativa dentre os modelos.

Abaixo, a Figura 30 apresenta o gráfico do modelo 69 com valores críticos. O gráfico apresenta em azul a umidade relativa, em roxo a temperatura do ponto de orvalho e em vermelho a temperatura da superfície interna. Podemos observar que a umidade relativa se manteve perto ou igual a 100% durante todo o ano de análise, com uma pequena diminuição no período de verão. E a temperatura do ponto de orvalho se manteve muito próximo ou superior a temperatura durante todo o ano de análise, podendo se observar inclusive que as linhas na cor vermelha não são muito visíveis no gráfico, devido a aproximação das duas linhas.

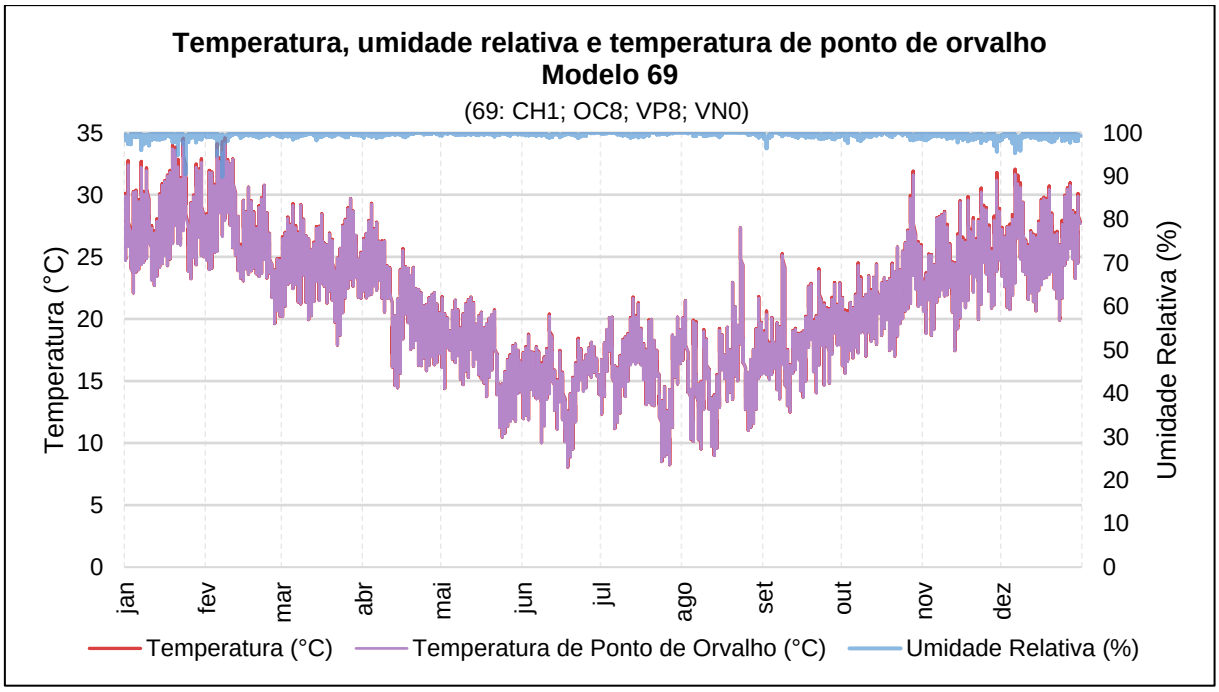


Figura 30 – Gráfico condensação superficial da superfície interna, modelo 69.
Fonte: Autora.

A Figura 31, abaixo, apresenta o segundo modelo com o maior valor de condensação superficial, o modelo 33 (33: CH0; OC8; VP8; VN0), no qual apresentou 1547 horas em que a temperatura do ponto de orvalho da superfície foi maior ou igual a temperatura da superfície, 760 horas a menos que o primeiro modelo. O modelo apresenta as mesmas características do primeiro modelo, com a exceção de não considerar a chuva dirigida (CH0). Mostrando que a alta ocupação e as janelas fechadas apresentam um risco de condensação superficial nos modelos analisados. No gráfico podemos observar as mesmas condições do modelo anterior, a umidade relativa muito próxima ou igual a 100% durante todo o ano, e a temperatura do ponto de orvalho muito próxima ou superior a temperatura da superfície durante todo o ano.

As condições muito próximas dos dois modelos, a alta condição de ocupação interna com a alta geração de vapor interno em um ambiente fechado podem representar alto risco de condensação superficial nas superfícies internas. Corroborando com os resultados de análise de sensibilidade, em que a variável mais sensível deste critério de análise foi a ocupação.

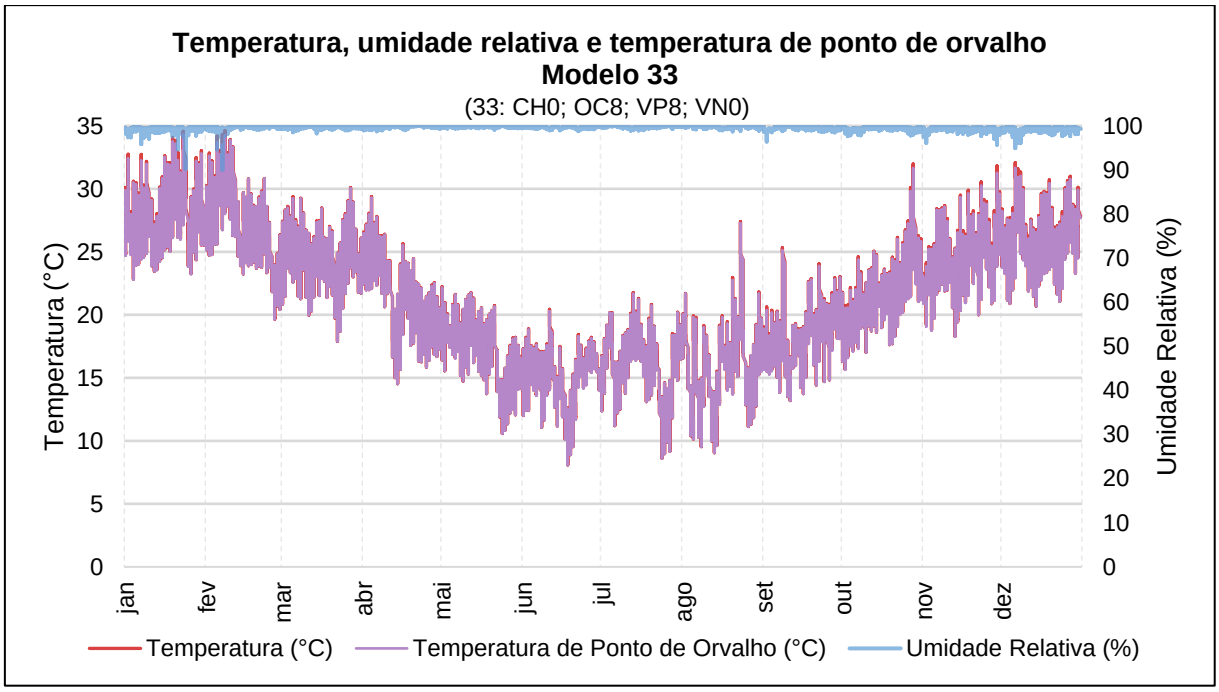


Figura 31 – Gráfico condensação superficial da superfície interna, modelo 33.
Fonte: Autora.

Em relação aos valores mínimos nesse critério de análise, diversos modelos apresentaram nenhuma hora do ano com a temperatura do ponto de orvalho maior ou igual a temperatura da superfície, foram os modelos 01 a 08, 10 a 12 e 73 a 88, todos esses modelos possuem em comum não considerar a chuva dirigida.

Os modelos de 01 a 04, não possuem chuva (CH0), não possuem ocupação (OC0), nem vapor interno (VP0), apenas a ventilação é alterada, variando de sem ventilação, *setpoint* de 19°C, 23°C e 25°C, respectivamente. Os modelos de 05 a 08 não possuem chuva, possuem duas pessoas de ocupação, não possuem vapor interno, e a ventilação é alterada, de sem ventilação, *setpoint* de 19°C, 23°C e 25°C respectivamente.

Os modelos de 10 a 12 não possuem chuva (CH0), possuem duas pessoas de ocupação (OC2), vapor interno relativo a duas pessoas (VP2) (geração de vapor de 142,5 W), e a ventilação é alterada, de sem ventilação, para o *setpoint* de abertura de janelas de 19°C, 23°C e 25°C respectivamente.

Os modelos de 73 a 88 não possuem ocupação (OC0) nem chuva dirigida (CH0), no entanto o vapor interno (VP) possui uma variação. Os modelos de 73 a 76 possuem vapor interno de 2 (VP2) (relativo à geração de vapor de 142,5 W), os modelos de 77 a 80 possuem vapor de 4 (VP4) (relativo à geração de vapor de 285 W), os modelos de 81 a 84 possuem vapor de 6 (VP6) (relativo à geração de vapor de 427,5 W), e os modelos de 85 a 88 possuem vapor de 8 (VP8) (relativo à geração de vapor de 570 W).

O modelo número 01 (01: CH0; OC0; VP0; VN0) foi o modelo no qual apresentou menor valor e menor média do critério teor de umidade total e menor valor de risco de formação de fungos filamentosos. E foi o modelo que apresentou a menor média de umidade relativa. É mostrado na Figura 32, abaixo, que a temperatura do ponto de orvalho se manteve abaixo da temperatura do ar, no entanto, muito próximo. E a umidade relativa não se aproximou dos 100%, mas passou dos 80% em grande parte do ano.

Com os valores altos de umidade relativa, mesmo correndo pouco risco de condensação superficial, já pode correr o risco de formação de fungos filamentosos. Como será mostrado, o sistema construtivo utilizado, concreto moldado *in loco*, não obteve resultados satisfatórios de desempenho higrotérmico, obtendo alta umidade relativa mesmo no modelo sem ocupação, sem vapor interno e sem considerar a chuva dirigida.

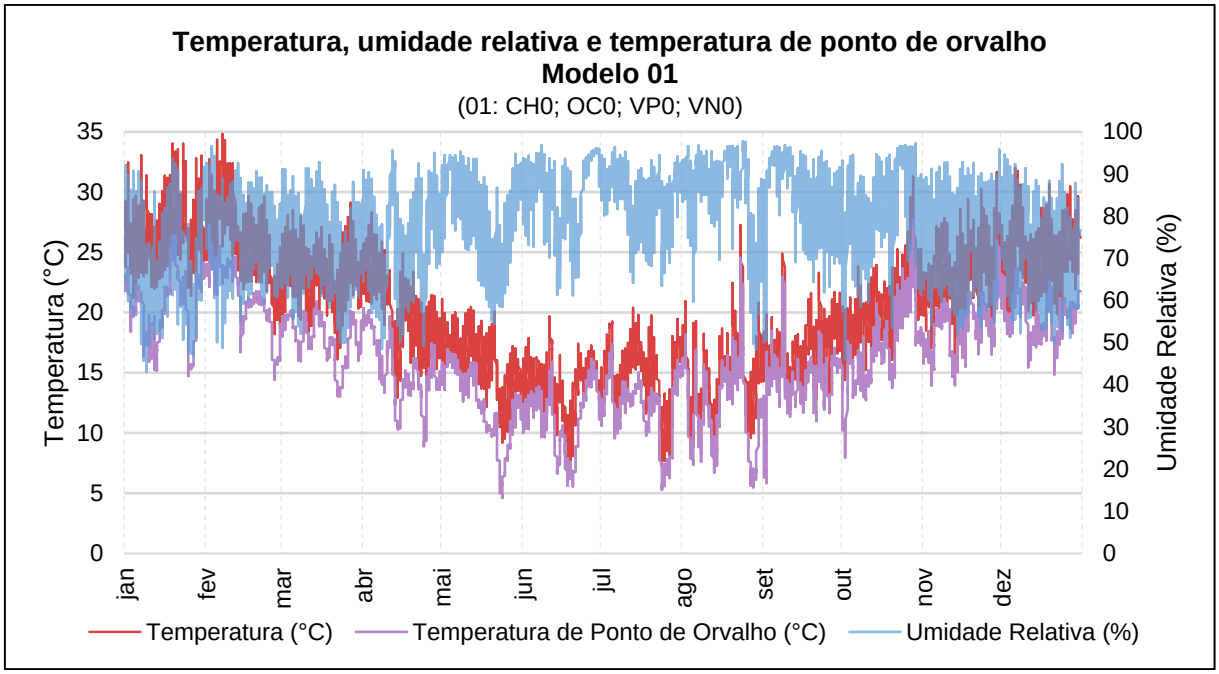


Figura 32 – Gráfico condensação superficial na superfície interna, modelo 01.
Fonte: Autora.

A Figura 33 e a Tabela 27 mostram a comparação dos resultados de condensação superficial dos modelos sem e com chuva dirigida, com ocupação de 02 a 08 e sem ventilação natural. Os modelos mostrados abaixo apresentam os maiores valores de condensação superficial. No gráfico podemos perceber as grandes diferenças entre cada valor de ocupação interna (aumento da intensidade da cor), no qual foi a variável mais sensível no critério de condensação superficial. Também podemos observar diferenças entre considerar e não considerar a chuva dirigida, em que os modelos com chuva dirigida (cor azul) apresentam valores muito superiores aos modelos sem chuva dirigida (cor amarela).

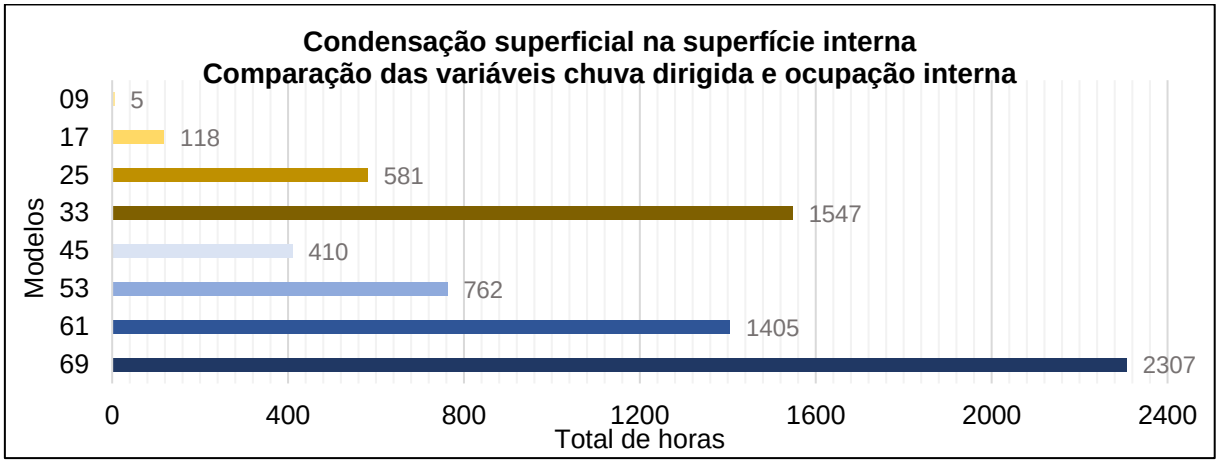


Figura 33 – Gráfico resumo da condensação superficial, comparação das variáveis chuva dirigida e ocupação interna.
Fonte: Autora.

Tabela 27 – Tabela resumo condensação superficial, comparação das variáveis chuva dirigida e ocupação interna.

Condensação superficial na superfície interna			
Modelos	**Total de horas**	**Modelos**	**Total de horas**
09 (CH0; OC2; VP2; VN0)	5	**45** (CH1; OC2; VP2; VN0)	410
17 (CH0; OC4; VP4; VN0)	118	**53** (CH1; OC4; VP4; VN0)	762
25 (CH0; OC6; VP6; VN0)	581	**61** (CH1; OC6; VP6; VN0)	1405
33 (CH0; OC8; VP8; VN0)	1547	**69** (CH1; OC8; VP8; VN0)	2307

Fonte: Autora.

4.3.3. Casos mais críticos de temperatura e umidade relativa

Nesta seção, são apresentados os casos mais críticos em relação ao critério de temperatura e umidade relativa da superfície interna. É apresentado a partir da máxima, mínima, e maior e menor temperatura média. E da máxima, mínima e maior e menor média de umidade relativa ao longo do último ano de análise.

Nas Tabelas 28 e 29 abaixo, a cor marrom representa os maiores valores, e a cor cinza claro os menores valores. À esquerda está o modelo com suas características e ordem de descrição utilizada anteriormente: modelo de 01 a 104; variável chuva dirigida (CH), 0 que representa sem chuva e 1 com chuva; variável ocupação de pessoas (OC), 0 sem ocupação, 2, 4, 6 e 8; variável vapor interno (VP) de panelas e chuveiro, 0 representa sem vapor interno, 2 representa o valor para duas pessoas que é 142,5 W, 4 representa o valor para quatro pessoas 285 W, 6 o valor para seis pessoas 427,5 W e 8 para oito pessoas 570 W; e a variável ventilação natural (VN), 0 que representa sem ventilação e os *setpoints* de abertura de 19, 23 e 25. E à direita os resultados de temperatura (°) e umidade relativa (%) da superfície interna.

Tabela 28 – Temperatura e umidade relativa da superfície interior, modelos 01 ao 50.

Modelos		Temperatura (°C)			Umidade relativa (%)		
		Máx.	Min.	Média	Máx.	Min.	Média
01	(CH0; OC0; VP0; VN0)	34,82	6,94	19,97	97,66	43,09	79,03
02	(CH0; OC0; VP0; VN19)	34,65	6,87	19,65	96,54	29,44	79,23
13	(CH0; OC4; VP0; VN0)	34,18	7,63	20,43	100	73,16	97,97
14	(CH0; OC4; VP0; VN19)	34,99	7,62	19,91	100	31,51	85,65
15	(CH0; OC4; VP0; VN23)	34,99	7,62	20,09	100	31,86	88,56
16	(CH0; OC4; VP0; VN25)	35,00	7,62	20,18	100	35,14	90,89
17	(CH0; OC4; VP4; VN0)	34,36	7,72	20,67	100	75,62	98,47
18	(CH0; OC4; VP4; VN19)	35,28	7,70	20,05	100	31,39	85,23
19	(CH0; OC4; VP4; VN23)	35,28	7,70	20,25	100	31,17	88,35
20	(CH0; OC4; VP4; VN25)	35,29	7,70	20,36	100	33,82	90,58
21	(CH0; OC6; VP0; VN0)	34,08	7,79	20,64	100	80,06	98,84
22	(CH0; OC6; VP0; VN19)	35,15	7,78	20,03	100	32,46	86,06
23	(CH0; OC6; VP0; VN23)	35,15	7,78	20,23	100	32,93	89,22
24	(CH0; OC6; VP0; VN25)	35,15	7,78	20,34	100	35,94	91,76
25	(CH0; OC6; VP6; VN0)	34,66	7,92	20,90	100	85,15	99,28
26	(CH0; OC6; VP6; VN19)	35,45	7,89	20,15	100	32,10	85,83
27	(CH0; OC6; VP6; VN23)	35,45	7,89	20,38	100	32,03	89,14
28	(CH0; OC6; VP6; VN25)	35,45	7,89	20,51	100	35,76	91,53
29	(CH0; OC8; VP0; VN0)	34,37	8,01	20,84	100	83,69	99,23
30	(CH0; OC8; VP0; VN19)	35,26	7,98	20,13	100	33,04	86,17
31	(CH0; OC8; VP0; VN23)	35,15	7,55	20,16	100	34,88	92,39
32	(CH0; OC8; VP0; VN25)	35,26	7,98	20,48	100	36,54	92,19
33	(CH0; OC8; VP8; VN0)	34,62	8,09	21,10	100	90,05	99,56
34	(CH0; OC8; VP8; VN19)	35,58	8,06	20,25	100	33,11	86,14
35	(CH0; OC8; VP8; VN23)	35,58	8,06	20,51	100	33,07	89,54
36	(CH0; OC8; VP8; VN25)	35,58	8,06	20,64	100	36,35	92,02
37	(CH1; OC0; VP0; VN0)	34,62	6,87	19,70	100	43,52	81,63
38	(CH1; OC0; VP0; VN19)	34,47	6,80	19,41	100	29,71	81,60
39	(CH1; OC0; VP0; VN23)	34,47	6,81	19,53	100	29,84	81,66
40	(CH1; OC0; VP0; VN25)	34,49	6,81	19,59	100	30,83	81,91
41	(CH1; OC2; VP0; VN0)	34,19	7,46	19,99	100	60,84	96,23
42	(CH1; OC2; VP0; VN19)	34,64	7,23	19,57	100	30,68	86,20
43	(CH1; OC2; VP0; VN23)	34,65	7,23	19,72	100	31,25	88,32
44	(CH1; OC2; VP0; VN25)	34,66	7,23	19,81	100	33,33	90,06
45	(CH1; OC2; VP2; VN0)	34,45	7,57	20,22	100	63,72	96,44
46	(CH1; OC2; VP2; VN19)	34,92	7,37	19,71	100	30,22	85,65
47	(CH1; OC2; VP2; VN23)	34,93	7,37	19,89	100	30,29	88,01
48	(CH1; OC2; VP2; VN25)	34,94	7,37	19,98	100	32,95	89,57
49	(CH1; OC4; VP0; VN0)	34,07	7,61	20,23	100	73,51	98,29
50	(CH1; OC4; VP0; VN19)	34,80	7,61	19,70	100	31,78	87,08

Fonte: Autora.

Tabela 29 –Temperatura e umidade relativa da superfície interior (continuação), modelos 51 ao 104.

Modelos		Temperatura (°C)			Umidade relativa (%)		
		Máx.	Min.	Média	Máx.	Min.	Média
51	(CH1; OC4; VP0; VN23)	34,81	7,61	19,89	100	32,17	89,61
52	(CH1; OC4; VP0; VN25)	34,82	7,61	19,99	100	35,75	91,89
53	(CH1; OC4; VP4; VN0)	34,27	7,71	20,48	100	75,81	98,71
54	(CH1; OC4; VP4; VN19)	35,08	7,69	19,83	100	31,66	86,70
55	(CH1; OC4; VP4; VN23)	35,09	7,69	20,05	100	31,45	89,38
56	(CH1; OC4; VP4; VN25)	35,10	7,69	20,16	100	34,40	91,51
57	(CH1; OC6; VP0; VN0)	34,03	7,78	20,45	100	80,06	99,02
58	(CH1; OC6; VP0; VN19)	34,95	7,77	19,81	100	32,74	87,47
59	(CH1; OC6; VP0; VN23)	34,96	7,77	20,04	100	33,37	90,16
60	(CH1; OC6; VP0; VN25)	34,96	7,77	20,15	100	36,50	92,69
61	(CH1; OC6; VP6; VN0)	34,51	7,91	20,71	100	84,83	99,38
62	(CH1; OC6; VP6; VN19)	35,24	7,88	19,94	100	32,39	87,28
63	(CH1; OC6; VP6; VN23)	35,24	7,88	20,19	100	32,33	90,09
64	(CH1; OC6; VP6; VN25)	35,25	7,88	20,32	100	36,19	92,40
65	(CH1; OC8; VP0; VN0)	34,32	7,99	20,65	100	84,77	99,34
66	(CH1; OC8; VP0; VN19)	35,06	7,97	19,92	100	33,39	87,61
67	(CH1; OC8; VP0; VN23)	35,06	7,97	20,17	100	33,44	90,42
68	(CH1; OC8; VP0; VN25)	35,07	7,97	20,29	100	37,10	93,04
69	(CH1; OC8; VP8; VN0)	34,58	8,07	20,91	100	89,90	99,61
70	(CH1; OC8; VP8; VN19)	35,37	8,05	20,03	100	33,46	87,57
71	(CH1; OC8; VP8; VN23)	35,38	8,05	20,32	100	33,37	90,44
72	(CH1; OC8; VP8; VN25)	35,38	8,05	20,46	100	36,90	92,84
80	(CH0; OC0; VP4; VN25)	34,99	7,06	20,03	98,43	28,58	76
89	(CH1; OC0; VP2; VN0)	34,91	7,16	19,94	100	45,06	85,18
90	(CH1; OC0; VP2; VN19)	34,77	6,89	19,56	100	29,04	82,66
91	(CH1; OC0; VP2; VN23)	34,78	6,89	19,70	100	29,59	83,07
92	(CH1; OC0; VP2; VN25)	34,80	6,89	19,78	100	29,33	83,44
93	(CH1; OC0; VP4; VN0)	34,84	7,31	19,96	100	47,91	88,80
94	(CH1; OC0; VP4; VN19)	34,78	6,84	19,56	100	29,26	83,89
95	(CH1; OC0; VP4; VN23)	34,79	6,83	19,71	100	29,72	84,82
96	(CH1; OC0; VP4; VN25)	34,80	6,83	19,79	100	29,80	85,41
97	(CH1; OC0; VP6; VN0)	34,75	7,39	19,98	100	51,51	91,26
98	(CH1; OC0; VP6; VN19)	34,79	6,86	19,57	100	29,44	84,73
99	(CH1; OC0; VP6; VN23)	34,80	6,85	19,72	100	29,86	86,01
100	(CH1; OC0; VP6; VN25)	34,81	6,85	19,80	100	30,17	86,77
101	(CH1; OC0; VP8; VN0)	34,64	7,37	20,00	100	56,06	93,12
102	(CH1; OC0; VP8; VN19)	34,79	6,88	19,58	100	29,62	85,32
103	(CH1; OC0; VP8; VN23)	34,80	6,88	19,73	100	30,00	86,90
104	(CH1; OC0; VP8; VN25)	34,82	6,88	19,81	100	29,14	87,79

Fonte: Autora.

No caso da temperatura, o valor máximo foi atingido pelo modelo número 34 (34: CH0; OC8; VP8; VN19) com o valor de 35,58°C. A maior média foi observada no modelo 33 (33: CH0; OC8; VP8; VN0) com 21,10°C, que também foi o modelo com maior resultado de condensação na superfície interna nos casos sem chuva dirigida, conforme foi mostrado na seção anterior.

Pode ser considerado que a alta geração de calor pela ocupação interna e o padrão de ventilação geraram influência nos resultados de temperatura interna. No modelo 33 (33: CH0; OC8; VP8; VN0) as janelas fechadas contribuíram para as maiores médias atingidas. Já o modelo número 34 (34: CH0; OC8; VP8; VN19), que obteve maior temperatura, possui as mesmas condições de ocupação e geração de vapor internos do modelo 33, no entanto, possui a ventilação com *setpoint* de 19°C, o que levou o modelo a apresentar um pico de temperatura. Como pode ser observado na Figura 34, os três modelos apresentam valores muito próximos, no entanto o modelo 34 (34: CH0; OC8; VP8; VN19) apresenta picos de temperatura levemente mais altos, principalmente no verão.

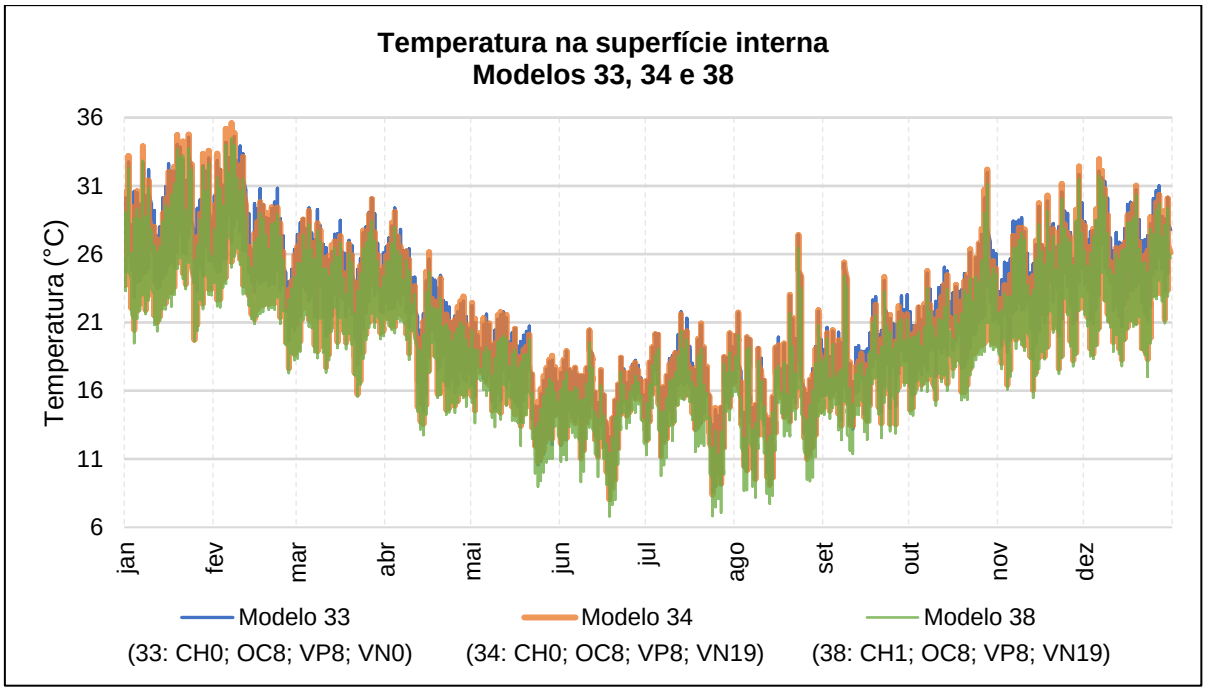


Figura 34 – Gráfico de temperatura na superfície interna, modelos 33, 34 e 38.
Fonte: Autora.

A menor média de temperatura foi de 19,41°C, atingida pelo modelo 38 (38: CH1; OC8; VP8; VN19) que também atingiu a menor temperatura entre todos os modelos, com 6,80°C. Podemos observar que esse modelo apresenta apenas a

diferença da consideração da chuva dirigida em relação aos modelos com maiores valores. Podemos constatar que a chuva dirigida contribuiu para diminuir as temperaturas dos modelos, corroborando com os resultados anteriores e com a importância da consideração da precipitação de chuva nas normas técnicas. O rascunho inicial do projeto de norma ABNT (ABNT, 2023) considera a chuva dirigida nas simulações higrotérmicas, o que torna as simulações mais precisas.

Já em relação a umidade relativa, o valor máximo foi atingido pela maioria dos modelos, do número 13 até o 36, do número 37 ao 72, e do número 89 ao 104. O valor mínimo foi atingido pelo modelo 80 (80: CH0; OC0; VP4; VN25), com 28,58%. A maior média de umidade relativa foi de 99,61%, que foi obtida pelo modelo 69 (69: CH1; OC8; VP8; VN0), que foi o modelo com maior valor de teor de umidade total, maior valor de risco de condensação superficial e maior média de teor de umidade total. E a menor média de umidade relativa foi obtida pelo modelo 01 (01: CH0; OC0; VP0; VN0), de 79,03%, este modelo também obteve o menor teor de umidade total da parede, como também o menor valor de risco de formação de fungos filamentosos e a menor média de teor de umidade total.

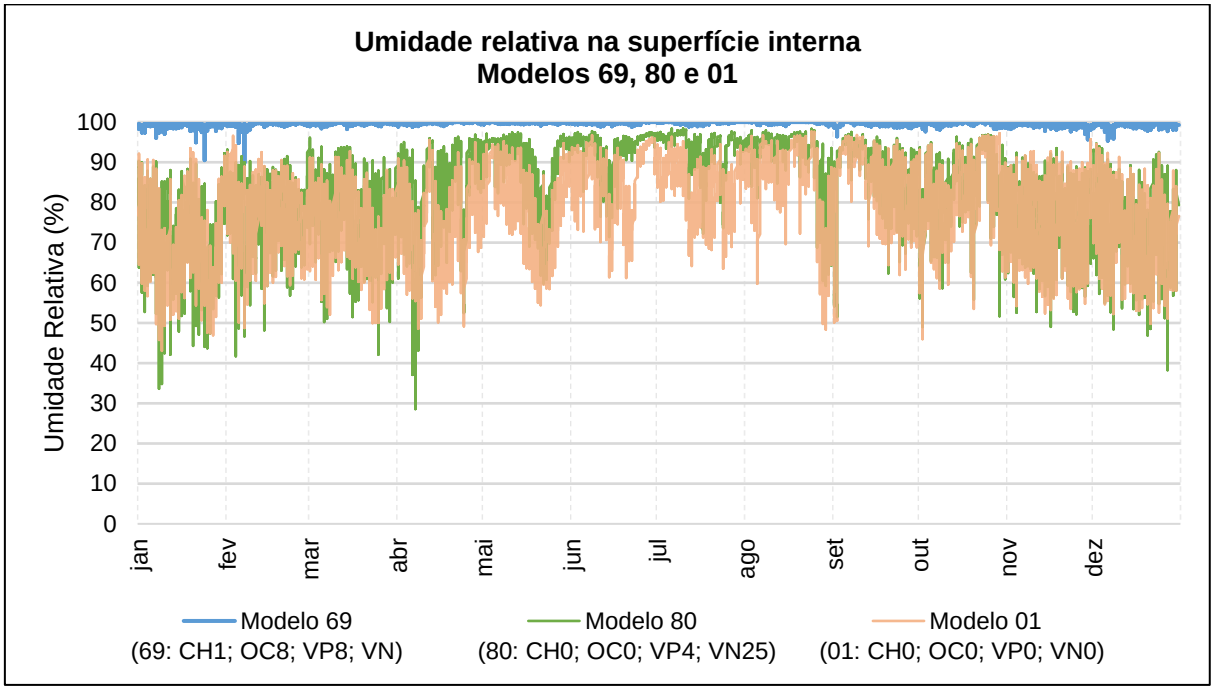


Figura 35 – Gráfico de umidade relativa na superfície interna, modelos 69, 80 e 01.
Fonte: Autora.

Como podemos observar na Figura 35, o modelo 69 (69: CH1; OC8; VP8; VN0), apresentou maior média e, maior constância de umidade relativa. Esse resultado pode se justificar pela alta geração de vapor interno, e consideração de chuva dirigida e por

não possuir nenhuma ventilação natural. O modelo 80 (80: CH0; OC0; VP4; VN25) apresentou o valor mínimo 28,58% no mês de abril, um valor distante do modelo com a menor média 79,03%, o modelo 01 (01: CH0; OC0; VP0; VN0).

4.3.4. Casos mais críticos na formação de fungos filamentosos

Essa seção apresenta o caso mais crítico do critério de risco de formação de fungos filamentosos, a partir do gráfico do teor de umidade crítico e do esporo em kg/m³, do programa *WUFI BIO*. O risco de formação de fungos acontece quando o teor de umidade do esporo ultrapassa o teor de umidade crítico.

O modelo com o menor valor do critério foi o número 01 (01: CH0; OC0; VP0; VN0), o modelo atingiu o valor de 52 vezes. Esse mesmo modelo esteve presente como menor valor e menor média do teor de umidade total, e a menor média de umidade relativa. Apesar de ter apresentado os menores valores, o modelo 01 não possui nenhum ganho interno, não possui ocupação nem vapor interno, representando um modelo apenas para análise. Como mostra a Figura 36 abaixo, o teor de umidade do esporo (linha amarela) na maioria do ano ultrapassou o teor de umidade crítico (linha azul), e apenas alguns pontos em que o teor de umidade do esporo permanece abaixo do teor de umidade crítico.

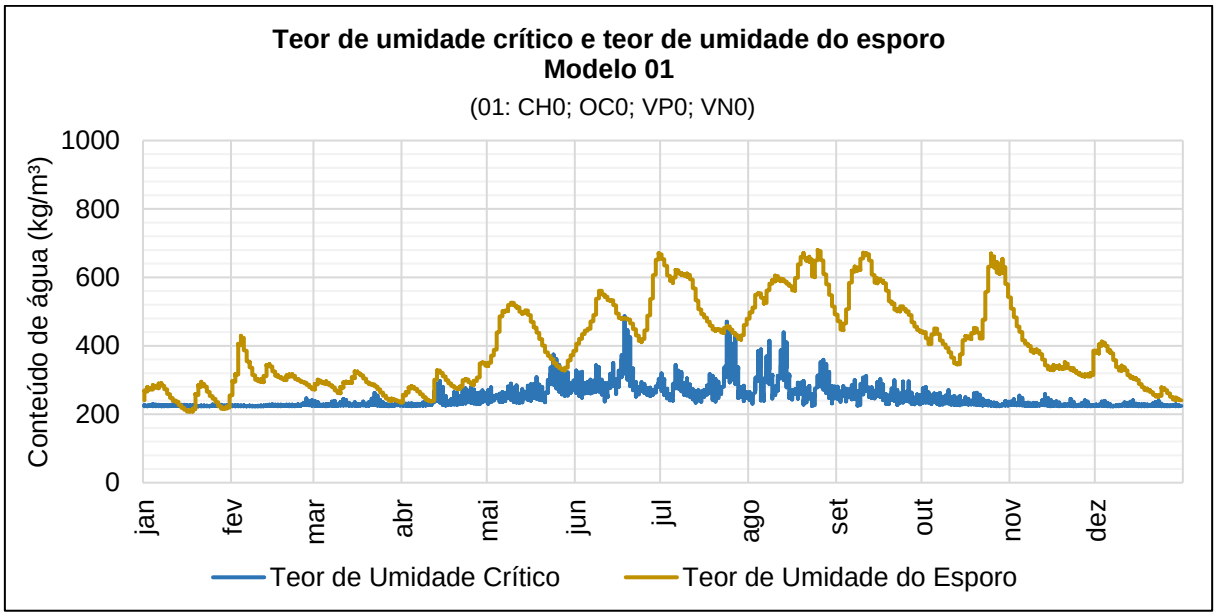


Figura 36 – Gráfico teor de umidade crítico e do esporo, modelo 01.
Fonte: Autora.

No modelo 01, mesmo possuindo o menor valor na análise descritiva, o gráfico de teor de umidade crítico e do esporo mostra um risco da parede de concreto moldado *in loco* frente as condições climáticas da cidade de Pelotas/RS analisada no estudo, pois apresentou a maior parte do ano com o teor de umidade do esporo acima do limite crítico. Como também foi analisado no critério de condensação superficial da superfície interna. O sistema construtivo analisado, de concreto moldado *in loco*, pode ser um sistema crítico em relação a formação de fungos filamentosos, considerando o clima predominantemente úmido de Pelotas, RS, presente na zona bioclimática 2.

Os outros modelos com os menores valores são o modelo 02 (02: CH0; OC0; VP0; VN19), o 03 (03: CH0; OC0; VP0; VN23) e o 04 (04: CH0; OC0; VP0; VN25), em que apresentam as mesmas condições do número 01, apenas com a modificação do padrão de ventilação para o *setpoint* de 19ºC, 23ºC e 25ºC. Esses modelos possuem os menores valores, mas não produzem vapor interno, nem calor gerado pelas pessoas, e não é considerado a chuva dirigida. São modelos apenas para análise. Neste sentido, ao fechar todas as janelas (VN0), o modelo 01 sem ganhos internos apresenta o menor risco de fungos filamentosos.

No entanto, ao analisar os modelos que possuem ocupação interna, ao fechar as janelas (VN0) esses modelos apresentam os maiores valores entre os demais modelos, como pode ser observado na Figura 37. Isto representa que ao produzir calor e vapor no interior da edificação, a edificação deve ser ventilada para que ocorra menos risco de formação de fungos filamentosos. E os modelos com o *setpoint* de abertura para ventilação de 19°C apresentam menor risco frente aos modelos com *setpoint* de 23°C e 25°C.

Em relação ao maior valor, a maioria dos modelos apresentaram o valor máximo de 146 horas de risco de formação de fungos filamentosos. Os modelos 21 (21: CH0; OC6; VP0; VN0), 25 (25: CH0; OC6; VP6; VN0), 29 (29: CH0; OC8; VP0; VN0) e 33 (33: CH0; OC8; VP8; VN0), quando não possui a consideração da chuva dirigida, e nem a ventilação natural (VN0). E nos modelos que possuem chuva dirigida, os modelos 57 (57: CH1; OC6; VP0; VN0), 61 (61: CH1; OC6; VP6; VN0), 65 (65: CH1; OC8; VP0; VN0) e 69 (69: CH1; OC8; VP8; VN0), que também não possuem ventilação natural (VN0). Esses mesmos modelos, com a consideração da chuva dirigida, também possuem os maiores resultados de condensação superficial na superfície interna.

Os modelos mostrados com o gráfico do teor de umidade crítico e do esporo são os modelos que possuem apenas a diferença da consideração da chuva, o modelo 33 (33: CH0; OC8; VP8; VN0) e o modelo 69 (69: CH1; OC8; VP8; VN0), conforme a Figura 37 e a Figura 38, respectivamente.

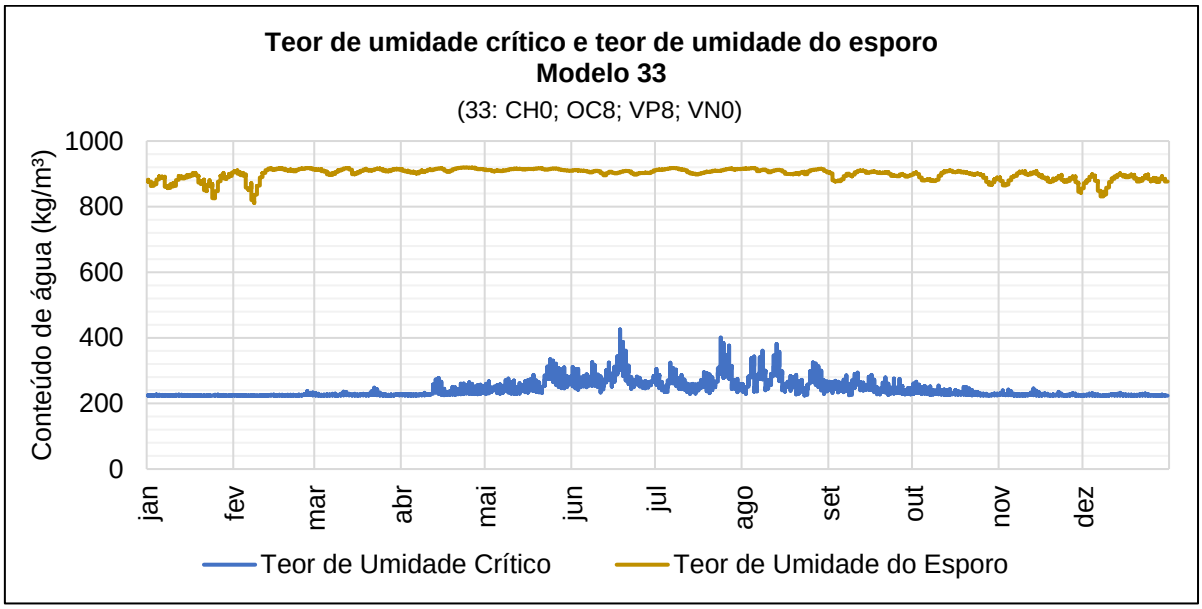


Figura 37 – Gráfico teor de umidade crítico e do esporo, modelo 33.
Fonte: Autora.

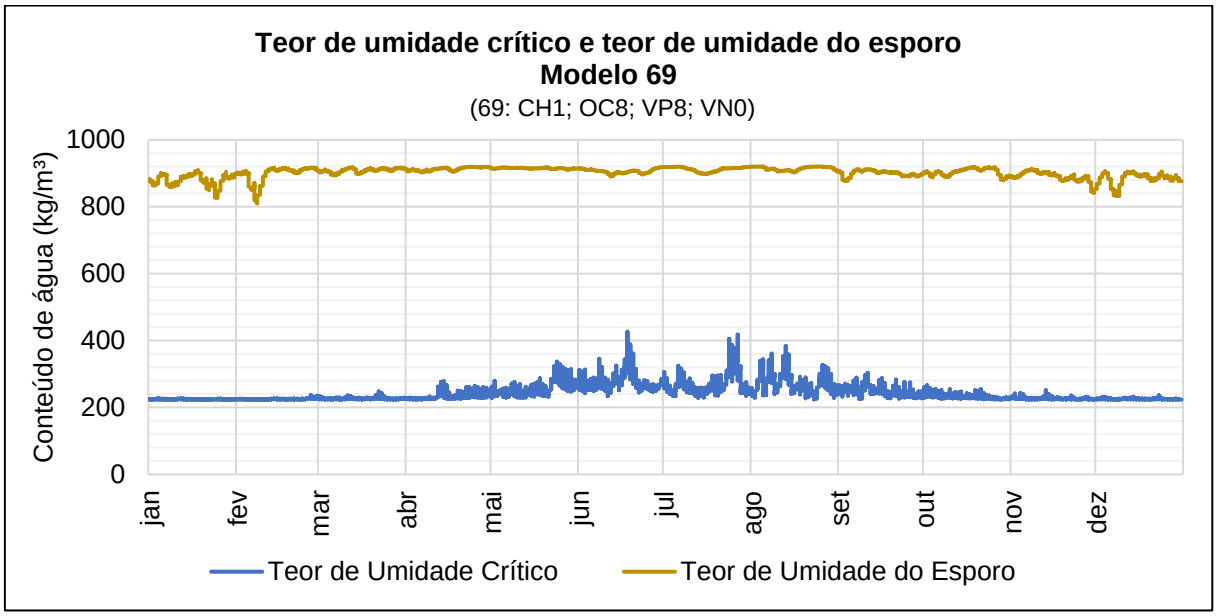


Figura 38 – Gráfico teor de umidade crítico e do esporo, modelo 69.
Fonte: Autora.

Podemos observar que durante todo o ano o teor de umidade do esporo (linha amarela) permaneceu acima do teor de umidade crítico (linha azul) nos dois modelos analisados. Os dois modelos também apresentam uma constância no teor de umidade

do esporo (linha amarela), principalmente durante o período do inverno, permanecendo com os valores mais altos. O modelo 69 e o 33 são destaques de resultados críticos em diversas análises. O modelo 69 apresentou o maior valor e maior média no teor de umidade total, maior valor no risco de condensação superficial, e foi um dos modelos que atingiu o valor máximo de umidade relativa, obteve também a maior média de umidade relativa, e obteve o segundo valor mais crítico na média de temperatura. Já o modelo 33 foi o segundo valor mais crítico nos mesmos critérios de análise, no teor de umidade total, risco de condensação superficial, na maior média de umidade relativa, no entanto, apresentou a maior média de temperatura, em que o modelo 69 obteve o segundo lugar.

Como foi mostrado na análise de sensibilidade, a ventilação natural foi uma variável com bastante influência no critério de formação de fungos filamentosos. Em que os modelos com os maiores valores não possuem a ventilação natural, e a mudança nos *setpoint* de abertura de esquadria resultam em mudanças nos resultados. A ocupação interna foi a variável com a segunda sensibilidade, em que os modelos com ocupação interna de 8 pessoas apresentam maiores valores nos resultados, e os modelos com ocupação de 2 pessoas possuem os menores.

A Figura 39 e a Tabela 30 abaixo mostram a comparação dos resultados de risco de formação de fungos filamentosos dos modelos sem chuva dirigida (cor amarela) e com chuva dirigida (cor azul), com ocupação de 02 a 08 (aumento da intensidade da cor) e com a variação na ventilação natural, 0, 19, 23 e 25 (ordem crescente de cada cor). Podemos observar que os modelos apresentam uma grande variação dos resultados ao alterar o padrão de ventilação, os modelos sem ventilação natural (VN0), 09, 17, 25, 33, 45, 53, 61 e 69, possuem os maiores valores entre todos os modelos. Também é observado que os valores aumentam conforme a adição de ocupação interna (aumento da intensidade da cor).

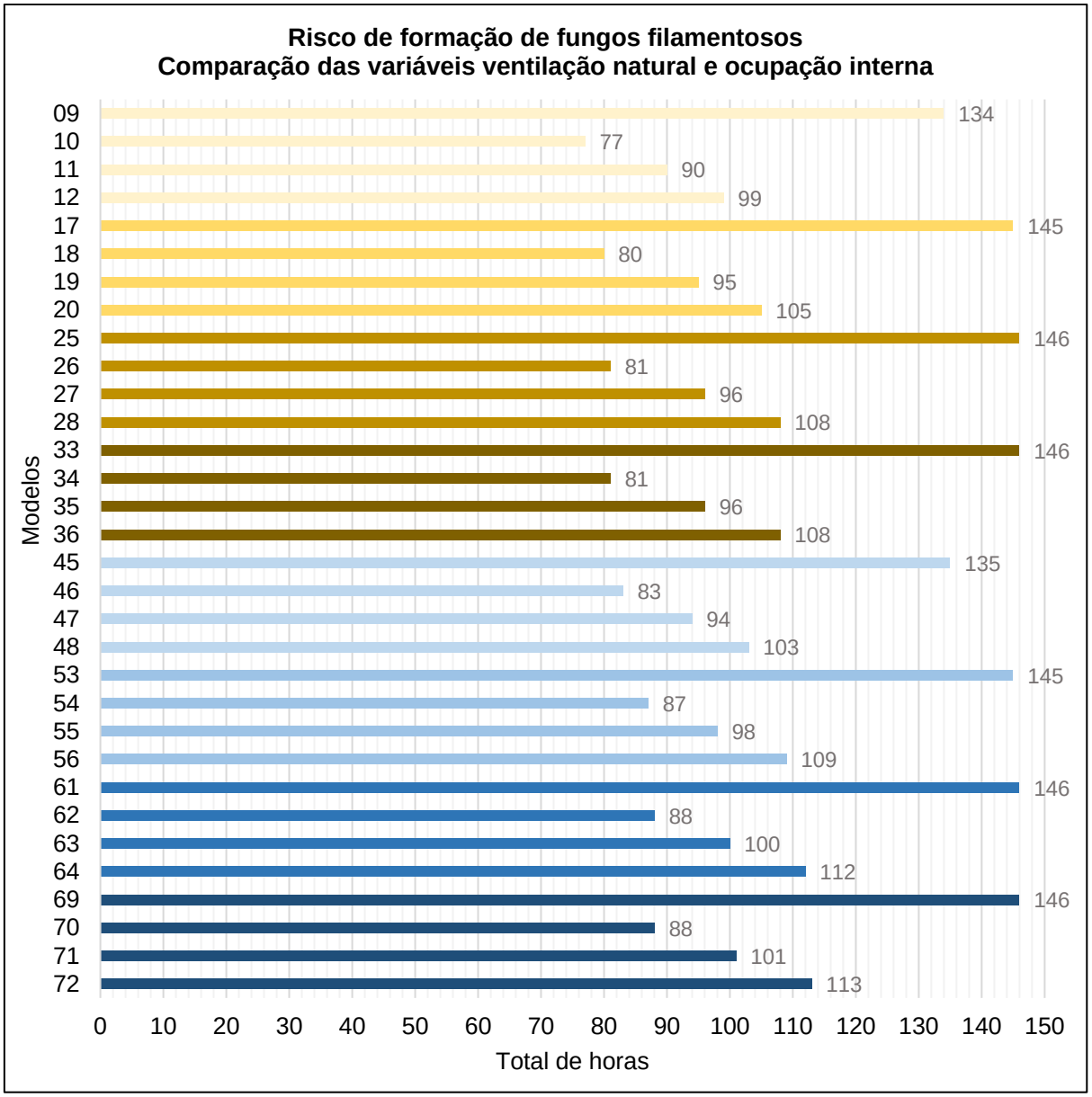


Figura 39 – Gráfico resumo risco de formação de fungos filamentosos, comparação das variáveis ventilação natural e ocupação interna.
Fonte: Autora.

Os resultados mostram que os modelos com maiores valores apresentam a janela fechada. A falta de ventilação natural se mostrou a variável mais influente nesse critério, seguida da ocupação interna. A alta taxa de ocupação com a alta geração de valor interno em conjunto com a falta de ventilação natural foram questões decisivas para os piores resultados de formação de fungos filamentosos. Esses resultados corroboram os resultados da análise de sensibilidade em que a variável mais sensível do critério formação de fungos filamentosos foi o padrão de ventilação natural e a segunda foi a ocupação interna.

Tabela 30 – Tabela resumo risco de formação de fungos filamentosos, comparação das variáveis chuva dirigida e ocupação interna.

Risco de formação de fungos filamentosos					
Modelos		Total de horas	Modelos		Total de horas
09	(CH0; OC2; VP2; VN0)	134	**45**	(CH1; OC2; VP2; VN0)	135
10	(CH0; OC2; VP2; VN19)	77	**46**	(CH1; OC2; VP2; VN19)	83
11	(CH0; OC2; VP2; VN23)	90	**47**	(CH1; OC2; VP2; VN23)	94
12	(CH0; OC2; VP2; VN25)	99	**48**	(CH1; OC2; VP2; VN25)	103
17	(CH0; OC4; VP4; VN0)	145	**53**	(CH1; OC4; VP4; VN0)	145
18	(CH0; OC4; VP4; VN19)	80	**54**	(CH1; OC4; VP4; VN19)	87
19	(CH0; OC4; VP4; VN23)	95	**55**	(CH1; OC4; VP4; VN23)	98
20	(CH0; OC4; VP4; VN25)	105	**56**	(CH1; OC4; VP4; VN25)	109
25	(CH0; OC6; VP6; VN0)	146	**61**	(CH1; OC6; VP6; VN0)	146
26	(CH0; OC6; VP6; VN19)	81	**62**	(CH1; OC6; VP6; VN19)	88
27	(CH0; OC6; VP6; VN23)	96	**63**	(CH1; OC6; VP6; VN23)	100
28	(CH0; OC6; VP6; VN25)	108	**64**	(CH1; OC6; VP6; VN25)	112
33	(CH0; OC8; VP8; VN0)	146	**69**	(CH1; OC8; VP8; VN0)	146
34	(CH0; OC8; VP8; VN19)	81	**70**	(CH1; OC8; VP8; VN19)	88
35	(CH0; OC8; VP8; VN23)	96	**71**	(CH1; OC8; VP8; VN23)	101
36	(CH0; OC8; VP8; VN25)	108	**72**	(CH1; OC8; VP8; VN25)	113

Fonte: Autora.

4.4. Resumo dos resultados

Na análise de sensibilidade, a variável que apresentou maior influência nas simulações de desempenho higrotérmico entre todos os critérios de análise foi a variável ocupação interna. No entanto, diversos critérios de análise apresentaram outras variáveis mais influentes, como a chuva dirigida que, entre todos os critérios de análise, apresentou a segunda variável mais influente nos resultados. Cada critério de análise possui uma variável mais influente, não podendo concluir que apenas uma variável é mais influente no desempenho higrotérmico total da edificação.

Na análise de sensibilidade no critério de teor de umidade total, ao realizar a análise com os resultados máximos, a variável mais sensível foi a chuva dirigida. E com as médias, a variável mais sensível foi a ocupação, no entanto, essa variável apresentou um valor muito próximo da variável chuva dirigida. Foi considerado que as duas variáveis são as mais influentes. Essa diferença entre as duas análises mostra que certos modelos podem apresentar picos, mas a totalidade das 8760 horas do ano mostram uma continuidade, fazendo com que as análises se modifiquem. No entanto,

a chuva dirigida foi o destaque como a variável mais sensível no critério de análise do teor de umidade total, considerando as condições do sistema construtivo analisado, como também do clima utilizado nas análises. O teor de umidade total sofreu grande influência das condições climáticas, como foi analisado nos modelos sem ganhos internos e sem chuva dirigida, em que sofreram um aumento no teor de umidade total nos períodos mais úmidos do ano.

A chuva dirigida como a variável mais sensível do critério de teor de umidade total era esperada, pois o teor de umidade total mede a quantidade de água total no sistema construtivo em relação a espessura da parede. Como também foi mostrada na análise descritiva dos demais critérios de análise, os modelos com e sem chuva dirigida apresentam diferenças consideráveis. Esses resultados mostram a importância de considerar a chuva dirigida nas simulações computacionais, e de utilizar ferramentas de simulação que consideram a chuva dirigida nos seus modelos matemáticos.

Para o critério de condensação superficial da superfície interna, a variável mais sensível foi a variável ocupação interna. E a segunda variável foi a chuva dirigida. A alta ocupação interna pode se tornar um risco, principalmente com edificações com um volume interno pequeno, como a habitação social analisada. A chuva dirigida está presente em diversos critérios de análise, corroborando com o resultado do critério anterior, mostrando também a importância da escolha de um arquivo climático confiável com condições realísticas de chuva dirigida do local analisado.

No critério de análise de temperatura, a análise de sensibilidade com as máximas e com as médias apresentaram diferenças. Para a análise de sensibilidade com as máximas a variável mais sensível foi a ventilação natural, e a segunda posição foi da ocupação em conjunto com a ventilação natural. Para as médias a variável mais sensível foi a ocupação, seguido da ventilação natural. Nos dois tipos de análise a ocupação e a ventilação natural foram destaques de variáveis mais sensíveis no critério de temperatura da superfície interna. A ocupação interna da edificação resulta em uma significativa produção de calor interno. Nesse contexto, a ventilação natural desempenha um papel importante no controle da temperatura interna do ambiente. Entretanto, o *setpoint* de abertura das janelas pode tanto auxiliar no controle térmico interno quanto contribuir com um aumento indesejado da carga de calor ou perda térmica, e consequentemente na alteração do teor de umidade relativa.

Cabe ressaltar também, que a variável chuva dirigida contribuiu para diminuir as temperaturas dos modelos, corroborando com os resultados anteriores, mostrando a importância da consideração da precipitação de chuva nas normas técnicas. O rascunho inicial do projeto de norma ABNT (ABNT, 2023) considera a chuva dirigida nas simulações higrotérmicas, o que torna as simulações mais precisas. Entretanto, a norma NBR 15575-4 (2021c) não considera a chuva no método de simulação computacional, o que pode influenciar nos resultados das simulações.

No critério de umidade relativa da superfície interna, a análise de sensibilidade tanto com as máximas quanto com as médias, apresentou a mesma variável sensível, a ocupação interna. No entanto, na análise com os valores máximos a variável mais sensível, a ocupação interna, apresentou valores extremamente próximos da segunda posição, que foi a combinação das variáveis chuva dirigida e ocupação. Foi considerado que a ocupação e a chuva dirigida foram as variáveis mais sensíveis no critério de análise de umidade relativa da superfície interna.

Foram realizadas análises considerando os valores máximos e as médias de determinados critérios de análise, no teor de umidade total, temperatura e umidade relativa da superfície interna. Considerando as diferenças nos resultados, para uma condição a curto prazo é válida a análise dos valores máximos. Entretanto, a longo prazo a análise das médias é mais indicada. A observação dos resultados com diferentes valores de um mesmo critério de análise possibilitou destacar a grande influência que a mudança dos valores utilizados representam nos resultados da análise de sensibilidade, destacando a importância da escolha do método ideal para o objetivo específico de estudo.

No critério de análise de risco de formação de fungos filamentosos, a variável mais sensível foi a ventilação natural. A próxima variável, a ocupação interna, apresentou um valor próximo da primeira. Como visto no critério de análise de temperatura, as duas variáveis são responsáveis pela alta geração de calor e vapor internos, como também pela renovação do ar e mudança na porcentagem de umidade relativa no ambiente interior. A umidade relativa e a temperatura internas são pontos decisivos na formação de fungos filamentosos. A ventilação natural pode retirar o excesso de umidade do ambiente, contudo, pode também acarretar o aumento da porcentagem de umidade relativa em climas muito úmidos. Nos resultados

encontrados, ao produzir calor e vapor no interior da edificação a mesma deve ser ventilada para que ocorra menor risco de formação de fungos filamentosos.

Por fim, mesmo a parede com o menor valor de risco de formação de fungos filamentosos apresentou risco durante a maior parte do ano, essa parede não possui ocupação e nem ventilação natural. Nesse contexto, pode ser concluído que a parede analisada de concreto moldado *in loco*, no clima analisado, predominantemente úmido presente na zona bioclimática 2, pode estar propensa ao risco de crescimento de fungos filamentosos.

5. Conclusões

O presente trabalho analisou a sensibilidade do projeto de norma ABNT em relação a variação das condições de contorno, com simulações computacionais de desempenho higrotérmico analisando diferentes critérios de análise. Inicialmente, foram realizadas simulações computacionais de desempenho higrotérmico com variações para análise, de diferentes condições de chuva dirigida, ocupação interna, geração de vapor interno e ventilação natural. Então, foi realizada uma análise de sensibilidade com os critérios de análise de teor de umidade total, condensação superficial da superfície interna, temperatura e umidade relativa e risco de formação de fungos filamentosos na superfície interna, e foram encontradas as variáveis mais influentes para cada critério de análise. Posteriormente realizou-se uma análise descritiva e discussão dos resultados, para uma melhor visualização dos modelos que apresentaram os maiores, menores valores, e maiores e menores médias de cada critério de análise. Por fim, foram realizadas análises dos resultados críticos de cada critério de análise, com gráficos e tabelas, a fim de realizar uma análise mais aprofundada dos casos mais críticos encontrados.

Na análise de sensibilidade realizada, não foi possível concluir que apenas uma variável é sensível ao desempenho higrotérmico de uma edificação, cada critério de análise possui uma variável sensível respectiva.

Um ponto importante que foi concluído é a necessidade da utilização de ferramentas computacionais adequadas para um cálculo higrotérmico preciso, pois a diferença na ferramenta pode impactar significativamente os resultados da análise. Como também a utilização de uma ferramenta que considera os cálculos de chuva dirigida nos modelos. Pode ser destacada também a importância da escolha de um arquivo climático com condições climáticas realísticas, e a consideração da chuva dirigida do local analisado.

Em modo geral, foi observado que a mudança nas variáveis de entrada impacta significativamente os resultados, mostrando a importância de o rascunho inicial do projeto de norma ABNT estabelecer condições de contorno adequadas com a realidade do nosso país.

O sistema construtivo utilizado, de paredes de concreto moldadas *in loco*, apresentou resultados críticos nas análises, mesmo nos modelos que não possuem a consideração da ocupação interna nem vapor internos. Representando que as paredes de concreto moldadas *in loco* não apresentam um desempenho higrotérmico satisfatório no clima analisado, o clima predominantemente úmido de Pelotas, RS, presente na zona bioclimática 2.

O rascunho inicial do projeto de norma ABNT utiliza valores de ocupação e geração de vapor internos que foram baseados na NBR 15575-4. No entanto, para uma análise mais crítica considerando a alta ocupação das habitações de interesse social no Brasil, esses valores poderiam ser maiores. A ocupação considerada, ocupação média de 4 pessoas, em alguns casos pode não ser uma ocupação realista. Outro quesito é a abertura das janelas para ventilação natural considerando um *setpoint* definido, esse padrão não é considerado realista, visto que para sua funcionalidade as esquadrias necessitam de automação, o que não é o caso das habitações de interesse social. O padrão de abertura mais realista poderia ser a partir de horários fixos de abertura da esquadria, o que resolveria a problemática da escolha correta do *setpoint* de abertura para cada região brasileira. Em relação a chuva dirigida, a consideração no rascunho inicial do projeto de norma ABNT foi de extrema importância, visto que na NBR 15575-4 não consta a consideração da precipitação de chuva nas simulações computacionais, e os resultados desse estudo mostraram a grande variação nos resultados quando considerada a chuva nos resultados, inclusive na temperatura da superfície interna da parede.

Considera-se o objetivo da pesquisa atingido. Com a análise e contribuição para a elaboração do rascunho inicial do projeto de norma ABNT, a partir da análise de sensibilidade das variáveis de condição de contorno. Foi verificado ainda o cenário atual de critérios de análise nas normas ou diretrizes brasileiras em relação ao desempenho higrotérmico. E o sistema construtivo de concreto moldado no local, sistema utilizado na NBR 15575-4, foi analisado para o clima predominantemente úmido da zona bioclimática 2.

Podem ser apontadas algumas limitações deste trabalho relacionadas a diferentes partes do estudo:

- Foi apenas considerada a avaliação de uma unidade residencial, e com um tipo de planta. Uma edificação comercial não foi abordada, na qual apresenta diferentes condições de ocupação e geração de vapor internos. Essa escolha se dá pelo fato da norma de desempenho NBR 15575-4 se referir apenas a unidades residenciais e não abranger diferentes tipos de edificações. No entanto, edificações comerciais, pelo alto nível de ocupação, podem gerar grande quantidade de vapor interno como também altas temperaturas.

- Foi apenas considerada uma parede maciça de concreto, em que não houve ensaios dos materiais em relação ao comportamento higrotérmico. Dessa forma, esse estudo se limita ao material estudado e ao comportamento higrotérmico do concreto do banco de dados do programa utilizado. No entanto, estão sendo realizados ensaios das propriedades higrotérmicas de um bloco cerâmico e de um concreto utilizado em construções de concreto moldado *in loco* da região de estudo, Pelotas, RS. A fim de diminuir essa limitação e auxiliar na criação de um banco de dados dos materiais construtivos nacionais, que também será benéfico para o projeto de norma ABNT.

- O estudo apresenta limitações relativas às ferramentas computacionais utilizadas. No programa *EnergyPlus* não foi utilizado o algoritmo HAMT que realiza simulações higrotérmicas, devido ao alto tempo computacional e grande demanda da máquina ao realizar uma quantidade muito grande de simulações simultâneas. Foi utilizado o algoritmo CTF convencional do *EnergyPlus*. Outra limitação foi que não foi utilizada uma ferramenta de análise em que apresenta a modelagem e a análise higrotérmicas juntas, utilizou-se o *EnergyPlus* para a condição interna e o *WUFI Pro* para a análise higrotérmica, podendo haver divergências ao utilizar uma ferramenta com a modelagem e a análise higrotérmica integradas.

5.1. Recomendações para trabalhos futuros

As recomendações para trabalhos futuros são:

- O método pode ser aplicado em diferentes condições climáticas, visto que este estudo foi utilizada a cidade de Pelotas, RS, presente na zona bioclimática 2. Uma cidade em que apresenta condições climáticas de alta umidade relativa do ar. Análises em outras cidades e zonas bioclimáticas são importantes para uma maior avaliação das influências das condições de contorno no desempenho higrotérmico das edificações.

- Diferentes sistemas construtivos podem ser analisados, esse trabalho utilizou uma parede maciça de concreto moldado *in loco*, um sistema construtivo bastante utilizado nas habitações de interesse social e que representa a parede de referência da NBR 15575-4. No entanto, existem outros sistemas construtivos utilizados nas habitações e que podem ser analisados. Diferentes sistemas construtivos podem resultar em diferentes influências das condições de contorno.

- A análise de sensibilidade com a abrangência de mais variáveis independentes podem ser avaliadas. Como também a inclusão de mais níveis de variação das variáveis.

- Em relação a ferramenta computacional, para trabalhos futuros pode ser utilizada uma ferramenta com modelagem e análise higrotérmica integradas, para uma maior precisão nos resultados.

Referências

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9574:** Execução de impermeabilização. Rio de Janeiro, 2008.

____. **NBR 9575:** Seleção de projeto de Impermeabilização. Rio de Janeiro, 2010.

____. **NBR 10844:** Instalações prediais de aguas pluviais. Rio de Janeiro, 1989.

____. **NBR 15220-2:** Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Componentes e elementos construtivos das edificações – Resistência e transmitância térmica. Rio de Janeiro, 2022.

____. **NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

____. **NBR 15270:** Componentes Cerâmicos. Rio de Janeiro, 2017.

____. **NBR 15575:** Edificações Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2021a.

____. **NBR 15575-1:** Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2021b.

____. **NBR 15575-4:** Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE, Rio de Janeiro, 2021c.

____. **Rascunho do Projeto de Norma ABNT – Simulação computacional do comportamento higrotérmico de paredes – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2023.

AFONSO, T. M. **Desempenho higrotérmico de edificações e procedimentos para previsão de ocorrência de bolores em ambientes internos: estudo de caso em habitações construídas com paredes de concreto**. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia). Departamento de Tecnologia em Construção de Edifícios do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. São Paulo. 2018.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Standard 160:** Criterie for Moisture - Control Design Analysis in Buildings. Atlanta, USA, 2009.

____. **ASHRAE Standard 160:** Criterie for Moisture - Control Design Analysis in Buildings. Atlanta, USA, 2016.

____. **ASHRAE Standard 160:** Criterie for Moisture - Control Design Analysis in Buildings. Atlanta, USA, 2021.

____. **ASHRAE Standard 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, USA, 2017.

AZEVEDO, A. F. F. L. C. **Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Braga, Portugal. 2002.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 79–97, 2011.

BEBER, L. A.; BERNARDES, L. C.; BERSCH, J. D.; BULIGON, L. B.; MASUERO, A. B.; CUNHA, E. G. Comportamento Higrotérmico de Tijolo Cerâmico de Olaria do Sul do Brasil. *In:* XVII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2023. São Paulo. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC. 2023a.

BEBER, L. A.; BERNARDES, L. C.; CUNHA, E. G.; MENDES, N. Análise da influência da umidade no consumo de climatização de edificação isolada termicamente. *In:* XVII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2023. São Paulo. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC. 2023b.

BELIZARIO-SILVA, F.; BRITO, A. C. Efeito da variação das características higrotérmicas do concreto no comportamento higrotérmico de uma parede. **Ambiente Construído**, v. 24, 2024.

BERGER, J.; GUERNOUTI, S.; WOLOSZYN, M.; BUHE, C. Factors governing the development of moisture disorders for integration into building performance simulation. **Journal of Building Engineering**, v. 3, p. 1–15, 2015.

BERNARDES, L. C.; DUARTE, C. M.; BEBER, L. A.; LEITZKE, R. K.; SILVA, A. C. B.; CUNHA, E. G. Estudo comparativo de uma parede de bloco cerâmico atendendo a norma NBR 15575, ZB2, com uma parede de Steel Frame quanto ao desempenho higrotérmico. *In:* XIX ENTAC2022 - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 19, 2022. Canela, RS. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC. 2022.

BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. A review of wind-driven rain research in building science. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 92, n. 13, p. 1079–1130, 2004.

BRITO, A. C.; BELIZARIO-SILVA, F. Análise da sensibilidade do comportamento higrotérmico de uma parede a diferentes características higrotérmicas de concreto. *In:* XIX ENTAC2022 - Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 19, 2022. Canela, RS. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC. 2022.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN ISO 15148:2002** – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water absorption coefficient by partial immersion. Brussels. 2002.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 15026:** Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements – Assessment of Moisture Transfer by Numerical Simulation. Brussels. 2007.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS ISO 24353:2008** – Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of moisture adsorption/ desorption properties in response to humidity variation. Brussels. 2008.

BULIGON, L. B. **Comportamento higrotérmico e energético de painéis de vedação vertical externa em madeira para zona bioclimática 2**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2021.

BULIGON, L. B.; MACARTHY, M. R.; BERNARDES, L. C.; LEITZKE, R. K.; GRIGOLETTI, G. C.; CUNHA, E. G. Hygrothermal Performance of Masonry Walls in Residential Building in a Humid Subtropical Climate. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 13, 2022.

CAVALCANTE, C.; DANTAS, A. L. F.; RIOS, R. B.; ZANONI, V. Comportamento higrotérmico da parede de concreto da biblioteca central da UNB. *In:* IV TECSIC 2023 - Workshop de tecnologia de sistemas e processos construtivos, 2023. Porto Alegre, RS. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC. 2023.

CDHU - COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO HABITACIONAL E URBANO. **Caderno de tipologias**. São Paulo. 1997. Disponível em: https://cdhu.sp.gov.br/publicacoes/manuais-tecnicos/anexos-do-manual-de-projetos. Acesso em: 27 mai. 2022.

CIB - INTERNATIONAL COUNCIL FOR RESEARCH AND INNOVATION IN BUILDING AND CONSTRUCTION. **CIB W040** - Heat, air and moisture transfer terminology: Parameters and concepts. CIB, 2012.

COSTA, L. J. D. **Paredes de concreto moldadas in loco em condomínios horizontais: avaliação de desempenho pelos usuários**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio grande. 2013.

DANTAS, A. L. F. .; ZANONI, V. A. G. Simulação Computacional e Medições in loco: um Estudo do Desempenho Higrotérmico em um Edifício Alto em Brasília. *In:* IV CBPAT - Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, 2020. Fortaleza. **Anais [...]** Porto Alegre: ALCONPAT Brasil. 2020.

DIN - DEUTSHCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4108-8:** Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden. Berlin, Germany. 2022.

DOE - United States Department of Energy. **Getting started EnergyPlus™ Version 8.9.0 - Documentation**. Washington, USA: DOE. 2018.

ELI, L. G.; KRELLING, A. F.; MENDES, L. S.; MACHADO, R. M. S.; MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Objeto Ground Domain no Programa EnergyPlus - Versão 9.0.1**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - LabEEE, 2019. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/pt-br/node/805.

FERREIRA, R. J. da S. **Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Cálculo das Coberturas Jardim**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Construções). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2013.

FRAUNHOFER IBP - FRAUNHOFER INSTITUTE FOR BUILDING PHYSICS. **WUFI Pro 6 manual**. Stuttgart, DE: Fraunhofer Institute for Building Physics. 2019a.

FRAUNHOFER IBP - FRAUNHOFER INSTITUTE FOR BUILDING PHYSICS. **WUFI Bio 4 manual**. Stuttgart, DE: Fraunhofer Institute for Building Physics. 2019b.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11–23, 1992.

GOFFART, J.; RABOUILLE, M.; MENDES, N. Uncertainty and sensitivity analysis applied to hygrothermal simulation of a brick building in a hot and humid climate. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 10, n. 1, p. 37–57, 2017.

GUERRA, F. L. **Biodeterioração de conjunto histórico do século XIX em Pelotas/RS: fungos filamentosos**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas - PROGRAU/UFPel. Pelotas. 2012.

GUERRA, F. L.; CUNHA, E. G.; SILVA, A. C. S. B.; KNOP, S. Análise das condições favoráveis à formação de bolor em edificação histórica de Pelotas, RS, Brasil. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 4, p. 7–23, 2012.

HAMBY, D. M. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 32, n. c, p. 135–154, 1994.

HENRIQUES, F. M. A. **Humidade em paredes**. 1. ed. Lisboa, Portugal: Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, 1994.

HENS, H. L. S. C. Combined heat, air, moisture modelling: A look back, how, of help? **Building and Environment**, v. 91, p. 138–151, 2015.

HOLM, A.; KUENZEL, H. M.; SEDLBAUER, K. The hygrothermal behaviour of rooms: combining thermal building simulation and hygrothermal envelope calculation. *In:* VIII International IBPSA Conference, 2003. Eindhoven, Netherlands. **Anais [...]** IBPSA. 2003.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **EBC Annex 41:** Whole Building Heat-Air-Moisture Response. Birmingham, United Kingdom. 2013.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **EBC Annex 55-1:** Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting. Probability Assessment of Performance and Cost (RAP-RETRO) - Subtask 1: Stochastic Data. Gothenburg, Suécia. 2015a.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **EBC Annex 55-2:** Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting. Probability Assessment of Performance and Cost (RAP-RETRO) - Subtask 2: Probabilistic Tools. Gothenburg, Suécia. 2015b.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **EBC Annex 55-3:** Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting. Probability Assessment of Performance and Cost (RAP-RETRO) - Substak 3: Framework for probabilistic assessment of performance of retrofitted building envelopes. Gothenburg, Suécia. 2015c.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **EBC Annex 55-4:** Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting. Probability Assessment of Performance and Cost (RAP-RETRO) - Subtask 4: Practice and Guidelines. Gothenburg, Suécia. 2015d.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **EBC Annex 55-5:** Reliability of Energy Efficient Building Retrofitting. Probability Assessment of Performance and Cost (RAP-RETRO) - Subtask 5: Risk management by probabilistic assessment. Development of guidelines for practice. Gothenburg, Suécia. 2015e.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **EBC International Energy Agency**. Disponível em: https://www.iea.org/.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil**. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/normais#. Acesso em: 16 mai. 2022.

ISO - INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 13788:** Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods. International Standard - ISO. 2012.

ISO - INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 12572**: Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties – Cup method. International Standard - ISO. 2016.

JORNE, F. J. F. **Análise do comportamento higrotérmico de soluções construtivas de paredes em regime variável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, PT. 2010.

KARAGIOZIS, A.; SALONVAARA, M. Hygrothermal system-performance of a whole building. **Building and Environment**, v. 36, n. 6, p. 779–787, 2001.

KUINTCHER, A.; BURIOL, G. A. Clima do estado do rio grande do sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia Série Ciências Exatas**, v. 2, n. 1, p. 171–182, 2001.

KÜNZEL, H. M. **Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components**. Suttgart, DE: Fraunhofer - IRB. 1995.

KÜNZEL, H. M.; HOLM, A. H. Moisture control and problem analysis of heritage constructions. **Meeting on Building Pathology and Rehabilitation**, p. 85–102, 2009.

LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Projeteee - Projetando Edificações Energeticamente Eficientes.** Florianópolis: LabEEE. Disponível em: http://www.mme.gov.br/projeteee. Acesso em: 15 abr. 2022.

LARA, R. R. Á. **Hygro–thermo–mechanical analysis of masonry: Experimental characterization and numerical simulations**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Braga, PT. 2023.

LEITZKE, R. K.; BELTRAME, C. M.; FREITAS, J. R.; SEIXAS, J. N.; MACIEL, T. S.; CUNHA, E. G.; RHEINGANTZ, P. A. Optimization of the Traditional Method for Creating a Weather Simulation File: The Pelotas.epw Case. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 12, n. 10, 2018.

MENDES, M. V. A. S. **Avaliação das propriedades de transporte de massa em concretos contendo adições minerais**. Dissertação (Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil). Programa de Pós-graduação em Geotecnia e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás. Goiânia. 2009.

MENDES, N. **Modelos para Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1997.

MENDES, N.; CHHAY, M.; BERGER, J.; DUTYKH, D. **Numerical Methods for Diffusion Phenomena in Building Physics. A practical introduction**. 1. ed. Curitiba: PUCPRess. 2019.

MENDES, N.; WINKELMANN, F. C.; LAMBERTS, R.; PHILIPPI, P. C. Moisture effects on conduction loads. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 7, p. 631–644, 2003.

MORISHITA, C. **On the assessment of potential moisture risks in residential buildings across Brazil**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontífica Universidade Católica do Paraná. Curitiba. 2020.

MORISHITA, C.; BERGER, J.; CARNEIRO, A.; MENDES, N. Issues about moisture in residential buildings of Brazil. *In:* XX CIB World Building Congress, 2016. Tampere, Finland. **Anais [...]** Canada: CIB. 2016.

NASCIMENTO, M. L. M. **Aplicação da simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil). Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília. Brasília. 2016.

PÉREZ-BELLA, J. M.; DOMÍNGUEZ-HERNÁNDEZ, J.; CANO-SUÑÉN, E.; COZ-DÍAZ, J. J.; ALONSO-MARTÍNEZ, M. On the significance of the climate-dataset time resolution in characterising wind-driven rain and simultaneous wind pressure. Part I: scalar approach. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 32, p. 1783–1797, 2018.

PESSOA, K. Q.; MASUERO, A. B. Desempenho Higrotérmico de paredes de bloco de concreto com camada de ar de 3 cm e diferentes tipos de revestimento. *In:* XVII Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das Construções, 2021. Fortaleza. **Anais [...]** Fortaleza: CINPAR. 2021.

PINHEIRO, J. A. **Importância do Clima Exterior e Interior na Quantificação do Desempenho Higrotérmico dos Edifícios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Especialização em Construções). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2013.

PIRES, J. R. **Estimativa da condensação em edificações unifamiliares em território brasileiro: Simulação higrotérmica computacional**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS. 2020.

R-PROJECT. **The R Project for Statistical Computing**. Disponível em: https://www.r-project.org/. Acesso em: 20 ago. 2023.

RIBEIRO, A. S.; LANZINHA, J. C. G.; HADDAD, A. N.; FARIA, M. V. J. Estado da arte dos principais softwares de simulação utilizados na análise de energia de edifícios. *In:* ICEUBI - International Congress on Engineering, 2017. Covilhã, Portugal. **Anais [...]** Portugal: UBI. 2017.

RIBEIRO, P. J. T. **Análise comparativa de diferentes modelos de simulação numérica na avaliação da ocorrência de condensações internas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa. 2013.

SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concreto moldados in loco: Avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2008.

SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S. **Global Sensitivity Analysis. The Primer**. 1. Ed. Chilchester, England: John Wiley & Sons, Ltd. 2008.

SANTOS, A. C. **Avaliação do desempenho potencial de duas soluções de revestimentos argamassados em função do risco de formação de fungos emboloradores no interior de edificações na cidade de São Paulo.** Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia). Departamento de Tecnologia em Construção de Edifícios do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. São Paulo. 2019.

SANTOS, T. L.; PORTO, F. H. F. dos S.; SILVA, A. S. Análise da correlação entre conforto e desempenho térmico em habitações de interesse social por simulação computacional. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 2, p. 211–229, 2020.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e das propriedades de transporte de massa de concretos com vistas à avaliação de suas durabilidades**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1998.

SCHMIDT, T. **On-line Help for WUFI Pro.** Stuttgart, DE: Fraunhofer Institute for Building Physics - IBP. 2019.

SEDLBAUER, K. **Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components**. Tese (Doutorado em física das construções) Fraunhofer Institute for Building Physics - Universität Stuttgart. 2001.

SILVA, A. S. **Desenvolvimento de um método para avaliação do desempenho térmico e energético de edificações aplicando análise de incertezas e sensibilidade**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. 2016.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Decision-making process for improving thermal and energy performance of residential buildings: A case study of constructive systems in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 128, p. 270–286, 2016.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise de sensibilidade global dos parâmetros termofísicos de uma edificação residencial de acordo com o método de simulação do RTQ-R. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 135–148, 2013.

SISTEMA NACIONAL DE AVALIAÇÕES TÉCNICAS - SINAT. **Diretriz SiNAT n°003:** Revisão 02 – Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço zincado conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Steel Framing”). Brasília, 2017.

SISTEMA NACIONAL DE AVALIAÇÕES TÉCNICAS - SINAT. **Diretriz SiNAT n°001:** Revisão 03 – Diretriz para Avaliação Técnica de paredes estruturais de concreto moldadas no local. Brasília, 2017.

SOCOLOSKI, R. F.; BERSCH, J. D.; GUERRA, M.; MASUERO, A. B. The influence of temperature and rain moisture in mortar facades obtained through hygrothermal simulation. **Construction and Building Materials**, v. 370, n. January, 2023.

STRAUBE, J. F. Moisture in buildings. **ASHRAE Journal**, v. 44, n. 1, p. 15–19, 2002.

TIAN, W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, n. June, p. 411–419, 2013.

TONDO, G. H. **Influência das estratégias bioclimáticas no desempenho térmico em edifícios escolares**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Estado de Santa Catarina. 2017.

TRINDADE, A. D.; COELHO, G. B. A.; HENRIQUES, F. M. A. Influence of the climatic conditions on the hygrothermal performance of autoclaved aerated concrete masonry walls. **Journal of Building Engineering**, v. 33, n. October 2019, 2021.

VON EYE, F.; BRAGA, N.; ZANONI, V. A. G. .; BAUER, E. Quantificação da ação do clima na degradação de fachadas em argamassa empregando a simulação higrotérmica. *In:* XII SBTA - XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 2017. São Paulo. **Anais [...]** Porto Alegre, ANTAC. 2017.

YATES, F. Sir Ronald Fisher and the Design of Experiments. **International Biometric Society**, v. 20, n. 2, p. 307–321, 1963.

ZANONI, V. A. G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília. Brasília. 2015.

ZANONI, V. A. G. .; DANTAS, A. L. F. .; NUNES, L. S. .; RIOS, R. B. Estudo higrotérmico na autoconstrução: simulação computacional e medições em campo. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 109–120, 2020.

ZANONI, V. A. G.; SANCHEZ, J. M. M.; BAUER, E. Métodos para quantificação de chuva dirigida incidente nas fachadas das edificações. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 9, n. 2, p. 122–132, 2018.

ZHANG, Y. **jEPlus User's Manual 2.1.0.** v.2.1, 2020. Disponível em: https://www.jeplus.org/wiki/doku.php?id=docs:manual_2_1. Acesso em: 23 jul. de 2023.

APÊNDICES

A. Tabela resumo dos modelos

Abaixo é apresentada a tabela de resumo dos 104 modelos. O número do modelo à esquerda, e à direita as variáveis chuva dirigida, ocupação, vapor interno e ventilação natural.

Tabela 31 – Resumo dos modelos.

Modelos	Chuva dirigida	Ocupação	Vapor interno	Ventilação natural
01	0	0	0	0
02	0	0	0	19
03	0	0	0	23
04	0	0	0	25
05	0	2	0	0
06	0	2	0	19
07	0	2	0	23
08	0	2	0	25
09	0	2	142,5	0
10	0	2	142,5	19
11	0	2	142,5	23
12	0	2	142,5	25
13	0	4	0	0
14	0	4	0	19
15	0	4	0	23
16	0	4	0	25
17	0	4	285	0
18	0	4	285	19
19	0	4	285	23
20	0	4	285	25
21	0	6	0	0
22	0	6	0	19
23	0	6	0	23
24	0	6	0	25
25	0	6	427,5	0
26	0	6	427,5	19
27	0	6	427,5	23
28	0	6	427,5	25
29	0	8	0	0
30	0	8	0	19
31	0	8	0	23
32	0	8	0	25
33	0	8	570	0
34	0	8	570	19
35	0	8	570	23
36	0	8	570	25

37	1	0	0	0
38	1	0	0	19
39	1	0	0	23
40	1	0	0	25
41	1	2	0	0
42	1	2	0	19
43	1	2	0	23
44	1	2	0	25
45	1	2	142,5	0
46	1	2	142,5	19
47	1	2	142,5	23
48	1	2	142,5	25
49	1	4	0	0
50	1	4	0	19
51	1	4	0	23
52	1	4	0	25
53	1	4	285	0
54	1	4	285	19
55	1	4	285	23
56	1	4	285	25
57	1	6	0	0
58	1	6	0	19
59	1	6	0	23
60	1	6	0	25
61	1	6	427,5	0
62	1	6	427,5	19
63	1	6	427,5	23
64	1	6	427,5	25
65	1	8	0	0
66	1	8	0	19
67	1	8	0	23
68	1	8	0	25
69	1	8	570	0
70	1	8	570	19
71	1	8	570	23
72	1	8	570	25
73	0	0	142,5	0
74	0	0	142,5	19
75	0	0	142,5	23
76	0	0	142,5	25
77	0	0	285	0
78	0	0	285	19
79	0	0	285	23
80	0	0	285	25
81	0	0	427,5	0
82	0	0	427,5	19

83	0	0	427,5	23
84	0	0	427,5	25
85	0	0	570	0
86	0	0	570	19
87	0	0	570	23
88	0	0	570	25
89	1	0	142,5	0
90	1	0	142,5	19
91	1	0	142,5	23
92	1	0	142,5	25
93	1	0	285	0
94	1	0	285	19
95	1	0	285	23
96	1	0	285	25
97	1	0	427,5	0
98	1	0	427,5	19
99	1	0	427,5	23
100	1	0	427,5	25
101	1	0	570	0
102	1	0	570	19
103	1	0	570	23
104	1	0	570	25

Fonte: Autora.

B. Resumo dos resultados

Abaixo é apresentada a tabela resumo dos resultados. O número dos modelos à esquerda, e os critérios de análise à direita o teor de umidade total com máximo e mínimo, a condensação superficial na superfície interna com o total de horas, a temperatura e umidade relativa com máximo e mínimo, e por fim, o risco de crescimento de fungos filamentosos com o total de horas.

Tabela 32 – Resumo dos resultados.

	Teor de umidade total		Condensação superficial	Temperatura		Umidade relativa			Fungos filamentosos
Modelos	**Máx.**	**Min.**	**Total de horas**	**Máx.**	**Min.**	**Máx.**	**Min.**	**Média**	**Total de horas**
01	13,59	7,88	0	34,82	6,94	97,66	43,09	79,03	52
02	13,57	8,00	0	34,65	6,87	96,54	29,44	79,23	54
03	13,57	7,98	0	34,65	6,87	97,30	29,61	79,25	55
04	13,57	8,01	0	34,67	6,87	97,30	30,60	79,44	55
05	14,62	10,15	0	34,42	7,47	99,97	60,66	95,56	133
06	14,50	8,04	0	34,83	7,42	99,86	30,43	84,67	79
07	14,50	8,11	0	34,83	7,40	99,86	30,90	87,04	92
08	14,50	8,24	0	34,84	7,40	99,86	32,92	88,77	101
09	14,62	10,18	5	34,70	7,58	100	63,43	95,83	134
10	14,50	7,98	0	35,12	7,56	99,89	29,97	84,10	77
11	14,51	8,03	0	35,12	7,52	99,90	30,00	86,72	90
12	14,51	8,15	0	35,13	7,52	99,90	32,64	88,37	99
13	14,72	11,73	43	34,18	7,63	100	73,16	97,97	144
14	14,64	8,05	4	34,99	7,62	100	31,51	85,65	82
15	14,64	8,17	11	34,99	7,62	100	31,86	88,56	97
16	14,64	8,36	11	35,00	7,62	100	35,14	90,89	108
17	14,79	12,01	118	34,36	7,72	100	75,62	98,47	145
18	14,68	8,01	12	35,28	7,70	100	31,39	85,23	80
19	14,73	8,11	34	35,28	7,70	100	31,17	88,35	95
20	14,73	8,27	34	35,29	7,70	100	33,82	90,58	105
21	14,78	12,28	174	34,08	7,79	100	80,06	98,84	146
22	14,66	8,07	9	35,15	7,78	100	32,46	86,06	83
23	14,72	8,19	35	35,15	7,78	100	32,93	89,22	98
24	14,72	8,42	42	35,15	7,78	100	35,94	91,76	109
25	14,86	12,56	581	34,66	7,92	100	85,15	99,28	146
26	14,71	8,04	12	35,45	7,89	100	32,10	85,83	81
27	14,83	8,15	83	35,45	7,89	100	32,03	89,14	96
28	14,83	8,33	89	35,45	7,89	100	35,76	91,53	108
29	14,84	12,54	487	34,37	8,01	100	83,69	99,23	146
30	14,67	8,07	12	35,26	7,98	100	33,04	86,17	83
31	14,75	8,59	45	35,15	7,55	100	34,88	92,39	112
32	14,79	8,45	105	35,26	7,98	100	36,54	92,19	111

33	14,90	12,81	1547	34,62	8,09	100	90,05	99,56	146
34	14,71	8,05	29	35,58	8,06	100	33,11	86,14	81
35	14,87	8,16	233	35,58	8,06	100	33,07	89,54	96
36	14,87	8,37	325	35,58	8,06	100	36,35	92,02	108
37	15,03	9,13	43	34,62	6,87	100	43,52	81,63	66
38	15,04	9,21	40	34,47	6,80	100	29,71	81,60	68
39	15,04	9,25	43	34,47	6,81	100	29,84	81,66	65
40	15,04	9,28	43	34,49	6,81	100	30,83	81,91	68
41	15,36	11,00	309	34,19	7,46	100	60,84	96,23	135
42	15,34	9,23	163	34,64	7,23	100	30,68	86,20	86
43	15,34	9,38	191	34,65	7,23	100	31,25	88,32	96
44	15,34	9,96	194	34,66	7,23	100	33,33	90,06	104
45	15,36	10,95	410	34,45	7,57	100	63,72	96,44	135
46	15,26	9,19	198	34,92	7,37	100	30,22	85,65	83
47	15,32	9,26	243	34,93	7,37	100	30,29	88,01	94
48	15,32	9,64	253	34,94	7,37	100	32,95	89,57	103
49	15,43	11,95	551	34,07	7,61	100	73,51	98,29	144
50	15,30	9,25	322	34,80	7,61	100	31,78	87,08	89
51	15,42	9,49	419	34,81	7,61	100	32,17	89,61	101
52	15,42	9,98	436	34,82	7,61	100	35,75	91,89	112
53	15,46	12,12	762	34,27	7,71	100	75,81	98,71	145
54	15,30	9,21	397	35,08	7,69	100	31,66	86,70	87
55	15,44	9,31	544	35,09	7,69	100	31,45	89,38	98
56	15,44	9,98	583	35,10	7,69	100	34,40	91,51	109
57	15,45	12,35	773	34,03	7,78	100	80,06	99,02	146
58	15,29	9,27	375	34,95	7,77	100	32,74	87,47	90
59	15,44	9,52	521	34,96	7,77	100	33,37	90,16	102
60	15,44	10,04	578	34,96	7,77	100	36,50	92,69	114
61	15,48	12,57	1405	34,51	7,91	100	84,83	99,38	146
62	15,31	9,25	444	35,24	7,88	100	32,39	87,28	88
63	15,47	9,40	678	35,24	7,88	100	32,33	90,09	100
64	15,47	10,01	793	35,25	7,88	100	36,19	92,40	112
65	15,47	12,56	1258	34,32	7,99	100	84,77	99,34	146
66	15,30	9,28	396	35,06	7,97	100	33,39	87,61	90
67	15,45	9,50	636	35,06	7,97	100	33,44	90,42	102
68	15,45	10,05	760	35,07	7,97	100	37,10	93,04	115
69	15,49	12,82	2307	34,58	8,07	100	89,90	99,61	146
70	15,32	9,29	470	35,37	8,05	100	33,46	87,57	88
71	15,48	9,41	897	35,38	8,05	100	33,37	90,44	101
72	15,48	10,02	1125	35,38	8,05	100	36,90	92,84	113
73	13,63	7,93	0	35,12	7,20	98,14	44,60	83,02	73
74	13,49	7,96	0	34,96	7,01	97,19	28,78	80,44	61
75	13,48	7,93	0	34,97	7,01	97,22	29,30	80,84	63
76	13,47	7,96	0	34,99	7,02	97,22	28,80	81,24	64
77	14,08	8,10	0	35,07	7,34	99,45	47,43	87,15	93
78	13,77	7,97	0	34,97	7,07	98,39	28,99	81,88	69

79	13,78	7,95	0	34,98	7,06	98,43	29,43	82,90	74
80	13,78	7,99	0	34,99	7,06	98,43	28,58	83,50	76
81	14,38	8,32	0	34,98	7,40	99,73	51,02	89,96	107
82	13,99	7,99	0	34,98	7,14	99,11	29,17	82,88	73
83	14,04	7,98	0	34,98	7,12	99,19	29,56	84,33	80
84	14,04	8,02	0	34,99	7,12	99,19	28,88	85,11	83
85	14,48	8,59	0	34,88	7,38	99,82	55,35	92,12	117
86	14,16	8,00	0	34,98	7,13	99,50	29,35	83,60	74
87	14,24	8,00	0	34,99	7,11	99,54	29,70	85,38	83
88	14,24	8,05	0	35,00	7,11	99,55	28,86	86,32	88
89	15,05	9,23	49	34,91	7,16	100	45,06	85,18	83
90	15,04	9,17	39	34,77	6,89	100	29,04	82,66	71
91	15,04	9,20	43	34,78	6,89	100	29,59	83,07	73
92	15,04	9,26	43	34,80	6,89	100	29,33	83,44	77
93	15,14	9,58	69	34,84	7,31	100	47,91	88,80	99
94	15,11	9,19	55	34,78	6,84	100	29,26	83,89	77
95	15,12	9,22	59	34,79	6,83	100	29,72	84,82	82
96	15,12	9,31	59	34,80	6,83	100	29,80	85,41	86
97	15,23	10,04	92	34,75	7,39	100	51,51	91,26	112
98	15,17	9,20	67	34,79	6,86	100	29,44	84,73	81
99	15,21	9,23	74	34,80	6,85	100	29,86	86,01	87
100	15,21	9,36	74	34,81	6,85	100	30,17	86,77	92
101	15,34	10,16	150	34,64	7,37	100	56,06	93,12	120
102	15,19	9,21	77	34,79	6,88	100	29,62	85,32	82
103	15,30	9,25	84	34,80	6,88	100	30,00	86,90	90
104	15,30	9,42	84	34,82	6,88	100	29,14	87,79	96

Fonte: Autora.

A tabela abaixo apresenta o resumo da análise de sensibilidade. É apresentado o *ranking* de 1 a 10, da variável mais sensível para a menos sensível. Dos critérios de análise: teor de umidade total com análise dos valores máximos e as médias; condensação superficial na superfície interna; temperatura e umidade relativa da superfície interna com a análise dos valores máximos e médias; e, por fim, o risco de crescimento de fungos filamentosos.

Tabela 33 – Resumo dos resultados da análise de sensibilidade.

	***Ranking* por critério de análise**							
	Teor de umidade total		**Condensação superficial**	**Temperatura**		**Umidade relativa**		**Fungos filamentosos**
	(máximas)	(médias)		(máximas)	(médias)	(máximas)	(médias)	
1	Chuva (CH)	Ocupação (OC)	Ocupação (OC)	Ventilação (VN)	Ocupação (OC)	Ocupação (OC)	Ocupação (OC)	Ventilação (VN)
2	Ocupação (OC)	Chuva (CH)	Chuva (CH)	Ocup. (OC) Vent. (VN)	Ventilação (VN)	Ventilação (VN)	Ventilação (VN)	Ocupação (OC)
3	Chuva (CH) Ocup. (OC)	Ventilação (VN)	Ocup. (OC) Vent. (VN)	Vapor (VP)	Chuva (CH)	Ocup. (OC) Vapor (VP)	Ocup. (OC) Vapor (VP)	Ocup. (OC) Vapor (VP)
4	Ocup. (OC) Vapor (VP)	Ocup. (OC) Vent. (VN)	Chuva (CH) Ocup. (OC)	Ocupação (OC)	Vapor (VP)	Ocup. (OC) Vent. (VN)	Ocup. (OC) Vent.(VN)	Ocup. (OC) Vent. (VN)
5	Vapor (VP)	Chuva (CH) Ocup. (OC)	Ventilação (VN)	Chuva (CH)	Ocup. (OC) Vent. (VN)	Chuva (CH)	Chuva (CH)	Chuva (CH)
6	Ventilação (VN)	Chuva (CH) Vent. (VN)	Vapor (VP)	Ocup.(OC) Vapor (VP)	Vapor (VP) Vent. (VN)	Vapor (VP)	Vapor (VP)	Vapor (VP)
7	Chuva (CH) Vent. (VN)	Ocup.(OC) Vapor (VP)	Vapor (VP) Vent. (VN)	Chuva (CH) Ocup.(OC)	Chuva (CH) Ocup. (OC)	Chuva (CH) Ocup. (OC)	Chuva (CH) Ocup. (OC)	Chuva (CH) Ocup. (OC)
8	Chuva (CH) Vapor (VP)	Vapor (VP) Vent. (VN)	Ocup. (OC) Vapor (VP)	Vapor (VP) Vent. (VN)	Ocup. (OC) Vapor (VP)	Vapor (VP) Vent. (VN)	Vapor (VP) Vent.(VN)	Vapor (VP) Vent. (VN)
9	Ocup. (OC) Vent. (VN)	Vapor (VP)	Chuva (CH) Vent. (VN)	Chuva (CH) Vent. (VN)	Chuva (CH) Vent. (VN)	Chuva (CH) Vent. (VN)	Chuva (CH) Vent.(VN)	Chuva (CH) Vent. (VN)
10	Vapor (VP) Vent. (VN)	Chuva (CH) Vapor (VP)	Chuva (CH) Vapor (VP)	Chuva (CH) Vapor (VP)	Chuva (CH) Vapor (VP)	Chuva (CH) Vapor (VP)	Chuva (CH) Vapor (VP)	Chuva (CH) Vapor (VP)

Fonte: Autora.

ANEXOS

A. Rascunho inicial do projeto de norma ABNT

Esse anexo refere-se ao rascunho inicial do projeto de norma ABNT intitulado “Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento”. O documento está em processo de desenvolvimento, e o texto abaixo é o rascunho inicial do projeto de norma na íntegra (ABNT, 2023).

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes – Procedimento

Sumário

[a ser elaborado pela ABNT]

Prefácio

[a ser elaborado pela ABNT]

Introdução

Para projetar edifícios com comportamento adequado frente à umidade, é necessária uma abordagem que integre a prática convencional de projeto ao conhecimento das propriedades e características dos materiais e componentes. Essas premissas requerem considerações quanto ao transporte de calor e umidade nos elementos construtivos, considerando as condições de contorno internas e externas transientes às quais o edifício estará exposto.

A simulação computacional é um dos métodos quantitativos utilizados para análise do desempenho térmico e higrotérmico de edificações. Ao longo das últimas décadas, diversos modelos analíticos de simulação computacional foram desenvolvidos para prever condições de temperatura e umidade em edifícios e na sua envoltória. Esses modelos são cada vez mais utilizados para recomendações de projeto, em diferentes condições climáticas, visando obter condições adequadas de habitabilidade e durabilidade das edificações.

Nesse contexto, esta norma tem como objetivo padronizar o procedimento de simulação computacional do comportamento higrotérmico de paredes em regime transiente, de modo a permitir a comparação dos resultados de simulações higrotérmicas realizadas em âmbito nacional. Esta norma não estabelece critérios

mínimos de desempenho higrotérmico associados aos resultados das simulações computacionais, uma vez que a definição de tais critérios requer uma quantidade significativa de resultados de simulações higrotérmicas realizadas para diversas condições relacionadas ao clima e ao uso e operação de edifícios, bem como a comparação dos resultados de simulações computacionais com medições experimentais e em condições reais, aspectos que ainda não foram desenvolvidos no Brasil.

Esta norma baseia-se nas normas *ANSI/ASHRAE Standard 160-2016 – Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings* e *EN 15026:2007 - Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation*, com as devidas adaptações ao contexto brasileiro.

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

1. Escopo

Esta norma estabelece o procedimento para simulação computacional do comportamento higrotérmico de paredes de edifícios, incluindo orientações relativas aos seguintes aspectos:

− Características recomendadas para o modelo analítico da simulação computacional;

− Consideração das condições de contorno internas e externas;

− Apresentação dos resultados da simulação computacional.

A simulação computacional do comportamento higrotérmico de paredes considera as condições normais de uso e operação do edifício. Não são consideradas nas simulações higrotérmicas tratadas nesta norma a infiltração de água decorrente de falhas construtivas, a umidade ascendente, bem como eventos atípicos.

2. Referências normativas

Os documentos a seguir são citados no texto de tal forma que seus conteúdos, totais ou parciais, constituem requisitos para esta norma. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

ABNT NBR 15220-2, Desempenho térmico de edificações. Parte 2 – Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica — Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD).

ABNT NBR 15220-4, Desempenho térmico de edificações. Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida.

ABNT NBR 15575-1, Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais.

ISO 10456, Building materials and products — Hygrothermal properties — Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values.

ISO 12571, Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of hygroscopic sorption properties.

ISO 12572, Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of water vapour transmission properties — Cup method.

ISO 22185-2, Diagnosing moiture damage in buildings and implementing countermeasures Part 2: Condition assessment.

ISO 22185-1:2021, Diagnosing moisture damage in buildings and implementing countermeasures — Part 1: Principles, nomenclature and moisture transport mechanisms.

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

3. Termos e definições

Para os efeitos desta Norma, aplicam-se os seguintes termos e definições.

Ano higrotérmico de referência

Conjunto de dados horários com 8760 valores selecionados para a realização de análises higrotérmicas, representando as condições climáticas de determinada localização geográfica pelo período de um ano.

Ano meteorológico típico

Conjunto de dados meteorológicos horários com 8760 valores, representando as condições climáticas horárias de determinada localização geográfica pelo período de um ano.

NOTA: Este conjunto de dados provém de um longo período de medição, com determinação do ano típico baseada em procedimento padronizado [ABNT NBR 15575-1].

Simulação computacional do comportamento higrotérmico

Método computacional numérico para modelagem das trocas de calor e umidade entre componentes e entre componentes e o meio ambiente, considerando regime transiente.

Coeficiente de absorção d'água por capilaridade do material

Massa de água absorvida por um corpo de prova por unidade de área superficial e pela raiz quadrada do tempo [ISO 15148].

Coeficiente de transporte líquido de sucção do material

Densidade do fluxo líquido de absorção d'água por capilaridade dividida pela variação do conteúdo de umidade do material.

NOTA: O coeficiente de transporte líquido de sucção se refere à absorção de água por capilaridade nos momentos iniciais após o material ser exposto à umidade, quando o transporte capilar se dá predominantemente pelos poros capilares de maior diâmetro [KÜNZEL, 1995].

Coeficiente de transporte líquido de redistribuição do material

Densidade do fluxo líquido de redistribuição da água absorvida pelo material por capilaridade dividida pela variação do conteúdo de umidade do material.

NOTA: O coeficiente de transporte líquido de redistribuição se refere à redistribuição da água absorvida pelo material por capilaridade, quando o transporte capilar se dá mais predominantemente pelos poros capilares de menor diâmetro, esvaziando assim os poros capilares de maior diâmetro [KÜNZEL, 1995].

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

Espessura da camada de ar com difusão de vapor d'água equivalente à do material

Espessura de uma camada de ar estacionário que apresenta a mesma resistência à difusão de vapor d'água do material [ISO 12572].

Fator de resistência à difusão de vapor d'água do material

Permeabilidade ao vapor d'água do ar dividida pela permeabilidade ao vapor d'água do material.

NOTA: o fator de resistência ao vapor d'água indica quão maior é a resistência do material comparada a uma camada de espessura equivalente de ar estacionário à mesma temperatura [ISO 12572].

Isoterma de sorção do material

Curva que expressa o teor de umidade de equilíbrio do material para níveis crescentes de umidade relativa do ar, a uma determinada temperatura [ISO 12571].

NOTA: a isoterma de sorção apresenta a absorção de umidade pelo material por sorção de vapor d'água, mediante o aumento da umidade relativa do ar ao qual o material está exposto.

Isoterma de sucção do material

Curva que expressa o coeficiente de transporte líquido de sucção para níveis crescentes de teor de umidade de equilíbrio do material, a uma determinada temperatura.

NOTA: a isoterma de sucção apresenta a absorção de umidade pelo material por absorção por capilaridade de água, mediante o aumento do teor de umidade do material.

Isoterma de redistribuição do material

Curva que expressa o coeficiente de transporte líquido de redistribuição para níveis crescentes de teor de umidade do material, a uma determinada temperatura.

NOTA: a isoterma de redistribuição apresenta a redistribuição de umidade no interior do material por forças capilares, uma vez ocorrida a absorção de água por sucção ou condensação intersticial, mediante o aumento do teor de umidade do material.

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

Permeabilidade ao vapor d'água do material

Produto da permeância ao vapor d'água do material e da espessura de um corpo de prova homogêneo [ISO 12572].

Permeância ao vapor d'água do material

Densidade do fluxo de vapor d'água dividida pela diferença da pressão de vapor entre as duas faces do corpo de prova de um determinado material [ISO 12572].

Resistência ao vapor d'água

Inverso da permeância ao vapor d'água [ISO 12572].

Teor de umidade de equilíbrio do material

Teor de umidade de um material poroso em equilíbrio com a umidade relativa do ar ambiente, a uma determinada temperatura [ISO 12571].

4. Símbolos e abreviaturas

Símbolo	Descrição	Unidade
Letras romanas		
A_w	Coeficiente de absorção d'água por capilaridade do material	kg/(m².s0,5)
c	Calor específico do material	J/(kg.K)
d	Espessura do material	m
D_{WS}	Coeficiente de transporte líquido de sucção do material	m²/s
D_{WW}	Coeficiente de transporte líquido de redistribuição do material	m²/s
f_D	Fator de deposição de chuva da parede	-
f_E	Fator de exposição à chuva da parede	-
P	Intensidade de precipitação sobre superfície horizontal	mm/h
P_v	Deposição de água de chuva sobre parede vertical	kg/(m².h)
S_d	Espessura da camada de ar com difusão de vapor d'água equivalente à do material	m

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

V	Velocidade horária média do vento a 10m de altura acima do nível do solo	m/s
w	Teor de umidade do material	kg/m³
w_f	Teor de umidade de saturação livre do material	kg/m³
w_{80}	Teor de umidade de equilíbrio do material para umidade relativa de 80%	kg/m³
W	Permeância ao vapor d'água do material	kg/(m².s.Pa)

Letras gregas		
α	Ângulo entre a direção do vento e a normal à parede	-
δ	Permeabilidade ao vapor d'água do material	kg/(m.s.Pa)
δ_{ar}	Permeabilidade ao vapor d'água do ar	kg/(m.s.Pa)
λ	Condutividade térmica do material	W/(m.K)
ρ	Densidade aparente do material	kg/m³
μ	Fator de resistência à difusão de vapor d'água do material	-
φ	Umidade relativa do ar	-

DRAFT DO PASSO PARA O INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

5. Dados de entrada da simulação computacional

5.1. Dados climáticos

A simulação deve ser feita considerando dados climáticos do ano higrotérmico de referência (*Hygrothermal Reference Year* – HRY). Na ausência de dados climáticos tipo HRY, pode-se utilizar dados climáticos do ano meteorológico típico (Ty*pical Meteorological Year* – TMY), conforme ISO 15927-4 [3].

Os dados climáticos devem incluir dados horários dos seguintes parâmetros:

− Temperatura de bulbo seco;

− Pressão de vapor, ou qualquer outro parâmetro de umidade que possa ser utilizado para calcular a pressão de vapor;

− Radiação solar global e difusa;

− Velocidade média e direção do vento;

− Precipitação;

− Índice de cobertura de nuvens;

− Pressão atmosférica.

A norma EN 15026, Anexo B [2], dá orientações para elaboração do ano higrotérmico de referência, assim como o Anexo 24 da Agência Internacional de Energia [4].

5.2. Chuva dirigida

A quantidade de chuva dirigida deve ser determinada caso as paredes estejam expostas à chuva. Na ausência de informações específicas do local onde se encontra a edificação, a quantidade de chuva que atinge uma superfície vertical deve ser calculada utilizando a Equação 01 [1]:

$$rbv = FE \,.\, FD \,.\, V.\, 0{,}2 \,.\, cos(\alpha) \,.\, rh \qquad \text{Equação 01}$$

Onde:

rbv = deposição de chuva dirigida sobre parede vertical (kg/(m².h);

FE = fator de exposição à chuva;

FD = fator de deposição de chuva;

V = velocidade horária média do vento a 10m de altura (m/s);

α = ângulo entre a direção do vento e a normal à parede (º);

rh = intensidade de precipitação sobre superfície horizontal (mm/h).

O fator de exposição (FE) é influenciado pela topografia no entorno do edifício e pela altura do edifício. Devem ser adotados os valores indicados na Tabela 1 abaixo [1].

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

Tabela 1 – Fator de exposição.

Altura do edifício (m)	Categoria de exposição		
	Severa	Média	Abrigada
≤ 10	1,4	1,0	0,7
> 10 e ≤ 20	1,4	1,2	1,0
> 20	1,5	1,5	1,5

NOTA: Exposição severa inclui topos de morros, áreas costeiras e áreas sujeitas ao vento afunilado. Exposição abrigada inclui edifícios protegidos do vento por edificações vizinhas ou por outros dispositivos permanentes. Exposição média inclui condições de exposição intermediárias entre a exposição severa e a exposição leve.

Os seguintes fatores de deposição (FD) devem ser utilizados [1]:

− Paredes abaixo de cobertura com beiral e/ou calha com inclinação maior ou igual a 1:6 (altura:comprimento) ou 17%: FD = 0,35;

− Paredes abaixo de cobertura com beiral e/ou calha com inclinação menor que 1:6 (altura:comprimento) ou 17%: FD = 0,5;

− Paredes sujeitas ao escoamento de água de chuva: FD = 1,0.

5.3. Temperatura e umidade relativa do ar internas

Para edifícios ventilados naturalmente, a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar internas variam conforme as condições ambientais externas e de uso e operação do edifício. Sendo assim, esses parâmetros devem ser obtidos por meio de simulação computacional considerando regime transiente de trocas de calor e umidade.

Esta simulação para a obtenção das condições ambientais internas deve ser feita observando as condições de contorno de uso, ocupação e ventilação dos recintos, conforme o procedimento de simulação computacional indicado na ABNT NBR 15575-1. Para obter a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar internas, pode-se desconsiderar o transporte de massa difusivo pelas paredes. Deve-se acrescentar, no mínimo, as fontes de calor e umidade indicadas na Tabela 2.

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

Tabela 2 – Fontes internas de calor e umidade recomendadas para edifícios habitacionais.

Ambiente	Fonte de calor e/ou umidade	Horário de ocupação / acionamento	Potência	Fração radiante	Calor latente decorrente da geração de vapor d'água
Sala	4 pessoas	13h às 22h	130 W/pessoa (ver nota 1)	0,5	Ver nota 2
	1 televisor		120 W	0,25	-
	Iluminação	16h às 22h	5 W/m²	0,25	-
Dormitório	2 pessoas por dormitório	22h às 08h	81 W/pessoa	0,5	Ver nota 2
	Iluminação	06h às 8h 22h às 24 h	5 W/m²	0,25	-
Cozinha	2 pessoas	13h às 14h 19h às 20h	130 W/pessoa (ver nota 1)	0,5	Ver nota 2
	Iluminação	13h às 14h 19h às 20h	5 W/m²	0,25	-
	Panelas com água fervente	13h às 14h 19h às 20h	-	-	285 W
Banheiro	1 pessoa	18h às 19h	130 W/pessoa (ver nota 1)	0,5	Ver nota 2
	Iluminação		5 W/m²	0,3	-
	1 chuveiro		-	-	285 W

NOTA 1: Nesta norma estão sendo adotadas fontes internas de calor com o intuito de gerar condições ambientais mais rigorosas em termos de umidade do que o que consta da ABNT NBR 15575-1.
NOTA 2: Convém usar o valor de calor latente calculado por algoritmos de programas de simulação térmica computacional, que fornecem a parcela horária de calor latente dissipada por pessoa em função da temperatura do ambiente. Caso não haja essa possibilidade, pode-se adotar o valor padrão de 55 W para a parcela de calor latente dissipada para o ambiente por pessoa, por hora, com base na ABNT NBR 16401.
NOTA 3: Os valores do calor dissipado internamente por pessoas foram obtidos da ASHRAE para atividade leve.

Valores diferentes dos apresentados na Tabela 2 podem ser utilizados, mas devem ser informados e justificados no relatório com os resultados da simulação higrotérmica.

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

5.4. Características higrotérmicas dos materiais

As características higrotérmicas dos materiais que compõem as diferentes camadas das paredes, necessárias para a simulação computacional do comportamento higrotérmico, são apresentadas na Tabela 3, com os respectivos métodos de determinação.

Tabela 3 – Características higrotérmicas dos materiais.

Característica	**Método de determinação**
Densidade aparente (ρ)	Variável conforme o material (ver nota)
Condutividade térmica (λ)	ABNT NBR 15220-4 (ver nota)
Calor específico (c)	Varia conforme o material (ver nota)
Permeância ao vapor d'água (W)	ISO 12572 (ver nota)
Coeficiente de absorção d'água por capilaridade (A_w)	ISO 15148
Porosidade	Variável conforme o material
NOTA: para materiais com características conhecidas, pode-se adotar os valores da ABNT NBR 15220-2 ou ISO 10456.	

Dependendo da ferramenta de simulação computacional utilizada, outras características que não a permeância ao vapor d'água podem ser necessárias. As equações a seguir permitem calcular algumas dessas características:

$$\delta = W \times d \qquad \text{Equação 02}$$

$$\mu = \frac{\delta_{ar}}{\delta} \qquad \text{Equação 03}$$

$$S_d = \mu \times d \qquad \text{Equação 04}$$

Onde:

δ: permeabilidade ao vapor d'água do material (kg/(m.s.Pa);

W: permeância ao vapor d'água do material (kg/(m².s.Pa);

d: espessura do material (m);

μ: fator de resistência à difusão de vapor d'água do material (adimensional);

δar: permeabilidade ao vapor d'água do ar (kg/(m.s.Pa);

S_d: espessura da camada de ar equivalente (m).

As funções higrotérmicas dos materiais que compõem as diferentes camadas das paredes, necessárias para a simulação computacional do comportamento higrotérmico, são apresentadas na Tabela 4.

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

Tabela 4 – Funções higrotérmicas dos materiais.

Função	Abscissa	Ordenada	Método de determinação
Isoterma de sorção	Umidade relativa do ar (φ)	Teor de umidade do material (w)	ISO 12571 (ver nota 1)
Isoterma de sucção	Teor de umidade de equilíbrio do material (w)	Coeficiente de transporte líquido de sucção (D_{WS})	Aproximação a partir do coeficiente de absorção d'água por capilaridade
Isoterma de redistribuição	Teor de umidade de equilíbrio do material (w)	Coeficiente de transporte líquido de redistribuição (D_{WW})	Aproximação a partir da isoterma de sucção
Condutividade térmica em função do teor de umidade	Teor de umidade de equilíbrio do material (w)	Condutividade térmica do material (λ)	ABNT NBR 15220-4

NOTA 1: O traçado da isoterma de sorção requer que o material entre em equilíbrio com a umidade relativa do ar, para diferentes níveis de umidade relativa, o que pode levar meses. É possível realizar uma aproximação com duas retas: a primeira entre os pontos (0,0) e (80%, w80) e a segunda entre os pontos (80%, w80) e (100%;wf), onde w80 é o teor de umidade do material para umidade relativa de 80% e wf é o teor de saturação de água livre (por imersão).

As isotermas de sucção e de redistribuição podem ser aproximadas a partir do coeficiente de absorção d'água por capilaridade, considerando as seguintes equações [5]:

$$D_{WS}(w) = 3{,}8 \times \left(\frac{A_w}{w_f}\right)^2 \times 1000^{\left(\frac{w}{w_f}\right)-1}$$ Equação 05

$$D_{WW}(w) = \frac{D_{WS}(w)}{10}$$ Equação 06

Onde:

D_{WS}: coeficiente de transporte líquido de sucção do material;

w: teor de umidade do material;

A_w: coeficiente de absorção d'água por capilaridade do material;

w_f: teor de saturação de água livre;

D_{WW}: coeficiente de transporte líquido de redistribuição do material.

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

Algumas ferramentas de simulação higrotérmica possuem bancos de dados com características e funções higrotérmicas de materiais. Antes de utilizá-los, convém verificar se os dados são adequados para representar os materiais efetivamente utilizados nas diferentes camadas que compõem as paredes. Deve-se dar preferência a dados determinados experimentalmente, conforme as normas técnicas pertinentes.

5.5. Teor de umidade e temperatura inicial dos materiais

O teor de umidade inicial dos materiais deve ser igual ao teor de umidade de equilíbrio na condição da umidade relativa média anual do ano típico considerado para a simulação computacional. A temperatura inicial dos materiais deve ser igual a temperatura média do ano típico considerado para a simulação computacional.

6. Critérios mínimos para o modelo analítico

Esta seção estabelece critérios mínimos para o modelo analítico para simulação computacional do comportamento higrotérmico de elementos construtivos. Como requisito mínimo, o modelo analítico deve considerar os seguintes itens:

− Armazenamento de calor em materiais secos e na água absorvida pelos materiais;

− Condução de calor por condução térmica dependente da umidade;

− Troca de calor latente por difusão de vapor d’água;

− Troca de calor por convecção no interior de cavidades;

− Radiação entre faces de cavidades;

− Armazenamento de umidade nos materiais por sorção de vapor e capilaridade;

−Difusão de vapor d´água;

− Transporte capilar de água;

− Variação da capacidade de armazenamento e redistribuição da umidade no interior dos materiais em função do teor de umidade.

DRAFT DO PASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

O modelo analítico deve ser transiente, com um intervalo máximo de tempo de 1h. O modelo analítico deve considerar, no mínimo, as seguintes variáveis:

− Temperatura interna e externa;

− Umidade interna e externa;

− Radiação solar e de ondas longas;

− Precipitação;

− Velocidade e direção do vento.

O modelo analítico deve estar em conformidade com a EN 15026.

7. Relatório

7.1. Informações sobre a simulação computacional

Devem ser fornecidas as seguintes informações sobre o procedimento de simulação computacional:

a) Identificação da ferramenta de simulação computacional utilizada, incluindo versão;

b) Identificação do arquivo de dados climáticos utilizado;

c) Descrição do procedimento para obtenção dos dados de temperatura e umidade relativa internos do edifício;

d) Tempo total considerado na simulação, com as datas de início e término (recomenda-se um período mínimo de 03 anos);

e) Intervalo de tempo (*time step*) da simulação;

f) Discretização (*grid*) da simulação;

g) Condições iniciais:

1. Temperatura dos materiais;

2. Umidade dos materiais.

h) Explicitação do critério de convergência utilizado na simulação computacional;

i) Identificação da(s) ferramenta(s) de pós processamento (caso utilizadas).

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

7.2. Informações sobre o edifício

Devem ser fornecidas as seguintes informações sobre o edifício:

a) Projeto do edifício:

1. Plantas baixas (com orientação);
2. Cortes;
3. Área de piso de cada ambiente;
4. Área envidraçada na fachada de cada ambiente.

b) Características das esquadrias

1. Área de cada esquadria;
2. Condutância térmica;
3. Propriedades térmicas e óticas dos vidros.

c) Ocupação:

1. Tipo de ocupação (por exemplo, residencial);
2. Número de ocupantes por unidade;
3. Fontes internas de calor e umidade.

d) Modelo de renovação de ar do edifício

1. Ventilação natural;
2. Ar-condicionado.

7.3. Descrição da parede e dos materiais que a compõem

Devem ser fornecidas as seguintes informações sobre as paredes:

a) Identificação da parede;

b) Orientação solar da parede;

c) Composição da parede por camada:

1. Espessura;
2. Densidade aparente;

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

3. Condutividade térmica em função do teor de umidade;

4. Calor específico;

5. Permeância ou permeabilidade ao vapor d’água;

6. Coeficiente de absorção d’água por capilaridade;

7. Porosidade;

8. Isoterma de sorção;

9. Isoterma de sucção;

10. Isoterma de redistribuição;

11. Absortância à radiação solar da superfície externa;

12. Emissividade de onda longa;

13. Fator de exposição FE;

14. Fator de deposição FD.

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

7.4 Resultados da simulação computacional

Devem ser fornecidos, no mínimo, os seguintes resultados da simulação computacional do comportamento higrotérmico da parede:

a) Teor de umidade de cada camada da parede ao longo do tempo;

b) Umidade relativa da superfície interna da parede ao longo do tempo;

c) Umidade relativa nas superfícies de interface entre camadas ao longo do tempo;

d) Temperatura da superfície interna da parede ao longo do tempo;

e) Temperatura de cada camada ao longo do tempo;

Critério de convergência atingido (avaliação da qualidade numérica da simulação).

Anexo A

(informativo)

Análise dos resultados da simulação higrotérmica

A análise dos resultados da simulação higrotérmica depende do contexto de cada simulação e do uso pretendido desses resultados. Convém realizar, no mínimo, as seguintes análises:

a) Teor de umidade de cada material ao longo do tempo:

1. Avaliar se o teor de umidade entra em regime de equilíbrio ao longo do tempo;
2. Avaliar se o teor de umidade atinge ou ultrapassa valores críticos para o material, e por quanto tempo. Por exemplo, no caso da madeira, teores de umidade em massa acima de 20% (massa de água dividida pela massa de madeira seca em estufa) aumentam o risco de ocorrência de biodeterioração [6].

b) Umidade relativa da superfície interna da parede ao longo do tempo:

1. Avaliar se a umidade relativa da superfície interna atinge o valor de 100% (e por quanto tempo), o que indica a ocorrência de condensação superficial;
2. Avaliar se umidade relativa da superfície interna atinge ou ultrapassa valores críticos para a proliferação de fungos filamentosos: 80% para média móvel de 30 dias, 98% para média móvel de 7 dias e 100% para média móvel de 24 h (valores válidos para temperatura entre 5°C e 40°C) [7].

c) Umidade relativa nas interfaces entre camadas e no interior da parede:

1. Avaliar se a umidade relativa interna à parede atinge o valor de 100% (e por quanto tempo), o que indica a ocorrência de condensação intersticial;
2. Avaliar se a umidade relativa interna atinge ou ultrapassa valores críticos para corrosão, no caso de elementos metálicos. Umidade relativa média ao longo de 30 dias maior ou igual a 80% indica alto risco de corrosão [1];
3. Avaliar se umidade relativa da superfície interna ultrapassa valores críticos para a proliferação de fungos filamentosos: 80% para média móvel de 30

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

dias, 98% para média móvel de 7 dias e 100% para média móvel de 24 h (valores válidos para temperatura entre 5°C e 40°C) [7].

Os resultados da simulação higrotérmica podem ser utilizados em ferramentas de pós-processamento específicas, por exemplo, para avaliação do risco de desenvolvimento de fungos filamentosos em superfícies internas ou do risco de ocorrência de corrosão em metais. Os modelos analíticos utilizados em tais ferramentas de pós-processamento devem ser cientificamente comprovados e considerados aplicáveis ao contexto brasileiro. O detalhamento de tais ferramentas foge ao escopo da presente norma técnica.

DRAFT DO RASCUNHO INICIAL DO PROJETO DE NORMA ABNT

8. Bibliografia

[1] ANSI/ASHRAE 160. *Criteria for moisture-control design analysis in buildings. Atlanta*: ASHRAE, 2016.

[2] EN 15026. *Hygrothermal performance of building components and building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation.* Bruxelas: CEN, 2007.

[3] ISO 15927-4. *Hygrothermal performance of buildings — Calculation and presentation of climatic data — Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling*. Genebra: ISO, 2005.

[4] SANDERS, C. H. *Environmental conditions. IEA Annex 24 Final Report*, Vol. 2. Leuven: KU, 1996.

[5] KÜNZEL, H. *Simultaneous heat and moisture transport in Building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Tese (Doutorado). *Fraunhofer Institute for Building Physics*, Holzkirchen, 1995.

[6] CLAUSEN, C. A. *Biodeterioration of Wood.* In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. *Wood handbook – Wood as an engineering material. General Technical Report* FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. *Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory*, 2010.

[7] ANSI/ASHRAE 160: *Criteria for moisture-control design analysis in buildings.* Atlanta: ASHRAE, 2009.