

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



Dissertação

**Viabilidade do uso de dados normatizados na simulação de desempenho
higrotérmico de paredes**

Luciane Andreola Beber

Pelotas, 2024

Luciane Andreola Beber

**Viabilidade do uso de dados normatizados na simulação de desempenho
higrotérmico de paredes**

Documento de Dissertação apresentado 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. Dr^a. Angela Borges Masuero

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

B387v Beber, Luciane Andreola

Viabilidade do uso de dados normatizados na simulação de desempenho higrotérmico de paredes [recurso eletrônico] / Luciane Andreola Beber ; Eduardo Grala da Cunha, orientador ; Angela Borges Masuero, coorientadora. — Pelotas, 2024.

76 f. : il.

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

1. Propriedades higrotérmicas. 2. Tijolo cerâmico e concreto. 3. Umidade em paredes. 4. Simulação computacional. 5. Crescimento biológico. I. Cunha, Eduardo Grala da, orient. II. Masuero, Angela Borges, coorient. III. Título.

CDD 720.105

Elaborada por Michele Lavadouro da Silva CRB: 10/2502

Luciane Andreola Beber

**Viabilidade do uso de dados normatizados na simulação de desempenho
higrotérmico de paredes**

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

Data da defesa: 15 de março de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (Orientador)

Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a. Dr^a. Celina Maria Britto Correa

Doutora em Arquitetura pela Universidade Politécnica de Madrid

Prof^a. Dr^a. Lais Zucchetti

Doutora em Engenharia Civil na PPGEC-UFRGS

Prof. Dr^a. Gabriela Meller

Doutora em Engenharia Civil UFSM

Dedico este trabalho a minha filha.

Agradecimentos

Após a conclusão deste trabalho, é com imensa gratidão que expresso meu reconhecimento a todos que contribuíram para tornar este momento possível.

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha filha, por compreender todos os momentos em que não pude estar ao seu lado durante esses dois anos de dedicação ao mestrado.

Às mulheres extraordinárias que me fortaleceram e inspiraram, nunca desistindo diante das adversidades, sou eternamente grata pelo apoio incondicional. Às minhas queridas colegas do LABCEE e GES3E, Carolina Mesquita Duarte e Luiza Bernardes, agradeço por serem meu suporte diário, tanto pessoalmente quanto durante as etapas de desenvolvimento do meu trabalho, tornando todo o processo mais leve.

À minha irmã, que sempre me apoiou e incentivou, especialmente nos estudos de inglês, meu sincero agradecimento.

Ao Professor Dr. Eduardo Grala da Cunha, meu orientador, expresso minha profunda gratidão pela disponibilidade e sabedoria, que desempenharam um papel fundamental na realização deste trabalho.

Também desejo expressar minha gratidão à Professora Dra. Angela Masuero por sua orientação e pela oportunidade de trabalhar com a equipe de Engenharia da UFRGS.

À UFPel, à FAUrb, ao PROGRAU e a todos os educadores e funcionários que fizeram parte da minha jornada, expresso meu profundo agradecimento.

A todos que desempenharam papéis cruciais para que eu estivesse aqui hoje, incluindo a CAPES pela bolsa de estudos, minha sincera gratidão.

Por fim, um agradecimento especial ao meu pai, Valmor Costa Beber, e à minha mãe, Ana Andreola Beber, que sempre estiveram ao meu lado, orientando-me e guiando o meu caminho, acompanhando o meu crescimento.

Resumo

BEBER, Luciane Andreola. **Viabilidade do uso de dados normatizados na simulação de desempenho higrotérmico de paredes**. 2024. 80f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

A degradação dos elementos da construção é um processo natural, cuja velocidade varia conforme as condições ambientais, podendo ser ativo ou lento. A umidade desempenha um papel crucial no surgimento de problemas patológicos nos edifícios, tornando vital a seleção de materiais de construção com base em suas características higrotérmicas. As simulações computacionais possibilitam prever o comportamento desses materiais sob diversas condições, enfatizando a importância das propriedades higrotérmicas na modelagem precisa. Entretanto, no Brasil, a escassez de estudos sobre essas propriedades pode comprometer as simulações. Este trabalho conduziu ensaios das propriedades higrotérmicas do tijolo cerâmico de vedação e de concreto autoadensável Fck 25 Mpa, moldado "in loco", no laboratório LAMTAC/NORIE / UFRGS, visando obter variáveis para uso em simulações computacionais no software *WUFI Pro 6.7*. As simulações compararam os resultados dos ensaios com os valores padrão do software, avaliando o impacto dessas diferenças nos resultados. Notou-se que, para o tijolo, não houve grande impacto nas simulações com dados dos ensaios em relação ao padrão do programa, enquanto o concreto apresentou diferenças mais expressivas. Para o crescimento de fungos filamentosos, por exemplo, houve uma diferença de 5% nos valores do tijolo cerâmico e cerca de 20% a mais no concreto, considerando os dados dos ensaios. Esses resultados destacam a importância de um banco de dados nacional das variáveis higrotérmicas, adaptadas às características de cada zona bioclimática brasileira, visando simulações mais realistas e compreensão do impacto da umidade e temperatura na durabilidade dos materiais de construção. Palavras-chave: ensaios; propriedades higrotérmicas; umidade em paredes; simulação computacional.

Palavras-chave: propriedades higrotérmicas; tijolo cerâmico; concreto; umidade em paredes; simulação computacional; crescimento biológico.

Abstract

BEBER, Luciane Andreola. Analysis of the Impact of Using European Databases on the Results of Hygrothermal Behavior of Walls. 2024. 00f. Dissertation (Master's in Architecture and Urbanism) – Graduate Program in Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2024.

The degradation of building elements is a natural process, with its speed varying according to environmental conditions, and it can be either active or slow. Humidity plays a crucial role in the emergence of pathological problems in buildings, making the selection of construction materials based on their hygrothermal characteristics vital. Computational simulations enable the prediction of the behavior of these materials under various conditions, emphasizing the importance of hygrothermal properties in accurate modeling. However, in Brazil, the scarcity of studies on these properties may compromise simulations. This study conducted tests on the hygrothermal properties of ceramic masonry bricks and self-compacting concrete with an Fck of 25 MPa, molded "in loco" at the LAMTAC/NORIE/UFRGS laboratory, aiming to obtain variables for use in computational simulations with the WUFI Pro 6.7 software. The simulations compared the test results with the standard values of the software, evaluating the impact of these differences on the results. It was noted that for the brick, there was no significant impact on the simulations when using test data compared to the program's standard values, while the concrete showed more expressive differences. For the growth of filamentous fungi, for example, there was a 5% difference in the values for the ceramic brick and about 20% more in the concrete, considering the test data. These results highlight the importance of a national database of hygrothermal variables, adapted to the characteristics of each Brazilian bioclimatic zone, aiming for more realistic simulations and a better understanding of the impact of humidity and temperature on the durability of construction materials.

Keywords: hygrothermal properties; ceramic brick; concrete; wall moisture; computational simulation; biological growth.

Lista de Figuras

Figura 1: Tipos de fungos filamentosos.....	23
Figura 2: Fluxograma do método em 4 etapas.....	30
Figura 3: Fluxograma da 2° etapa do método: ensaios e laboratório e cálculos	33
Figura 4: Preparação da amostra do tijolo. (a) adaptação das medidas da amostra; (b) e (c) recipiente de vidro e amostra cortada; (d) teste de adequação da amostra no recipiente de vidro	34
Figura 5: Preparação da amostra do tijolo. (a) forno 100°C; (b) e (c) amostras na câmara de UR e temperatura controlada; (d) pesagem das amostras	35
Figura 6: Preparação da amostra do tijolo. (a) troca da câmara de UR e temperatura controlada; (b) colocação de 2cm de dessecante até o início da fita verde; (c) dessecante espaço de 2cm de ar e amostra; (d) e (e) processo de selagem	36
Figura 7: Início do ensaio. (a) e (b) amostras pesadas e medidas; (c) caixa de controle de UR e temperatura; (d) dataloger registrando UR e temperatura dentro da caixa fechadas com as amostras.....	36
Figura 8: Preparação das amostras do tijolo. (a) seis amostras; (b) amostras seladas; (c) amostras pesadas; (d) lâmina de água com 5mm acima da grelha e régua de alumínio.....	38
Figura 9 : Ensaio de absorção de água do tijolo, (a) e (b) amostras colocadas em um intervalo, (c) amostras no final das 8 horas.....	38
Figura 10: Preparação das amostras do tijolo. (a) amostras; (b) pesagem; (c) selagem com papel alumínio	39
Figura 11: Ensaios das Isotermas do tijolo. (a) amostras seladas com papel alumínio; (b) e (c) bandeja com água e cloreto de sódio; (d) caixa adaptada com UR e temperatura controlada pelo <i>dataloger</i>	40
Figura 12: Preparo das amostras de concreto. (a) recipiente de vidro com fita dupla face para garantir a distância de 2 cm entre o sal e a amostra; (b) amostra com cloreto de sódio; camada de ar e amostra; (d) paragem das amostras	42
Figura 13: Ensaio da resistência ao vapor de água do concreto, (a) amostras prontas dentro da câmara; (b e c) amostras dentro da câmara com a tampa fechada e UR e temperatura controlada pelo <i>dataloger</i>	43

Figura 14: Ensaio de absorção de água por capilaridade do concreto. (a) amostras sendo seladas;(b) pesagem das amostras;(c) início da colocação das amostras na grelha;(d) teste realizados com três amostras.....	44
Figura 15:Ensaio das Isotermas do concreto. (a) amostras seladas com papel alumínio; (b e c) bandeja com água e cloreto de sódio; (d) caixa adaptada com UR e temperatura controlada pelo <i>dataloger</i>	45
Figura 16: Temperatura do vapor de água em função da pressão barométrica hPa	47
Figura 17: Fluxograma das equações e sequências dos cálculos numéricos para variável higrotérmica: resistência ao vapor de água	48
Figura 18: Fluxograma das fórmulas dos cálculos numéricos para a variável higrotérmica: absorção de água por capilaridade.....	49
Figura 19: Fluxograma das equações e sequência dos cálculos numéricos para variável higrotérmica: Isotermas de adsorção e dessorção.....	50
Figura 20:Fluxograma da sequência do processo da simulação nos dois programas: <i>EnergyPlus 9.0</i> e <i>WUFI- Pro 6.7</i>	51
Figura 21: Planta baixa do modelo da simulação	52
Figura 22: Infográfico dos materiais para as simulações.	53
Figura 23: Resultados dos cálculos numéricos para simulação	59
Figura 24: Gráfico do risco de condensação superficial na superfície interna, ao longo de um ano, na orientação Sul, nos dois cenários.....	61
Figura 25:Gráfico do risco de condensação superficial interna, no período de inverno, na orientação Sul, nos dois cenários.....	62
Figura 26: Gráfico das Isopletras - dados das variáveis higrotérmicas nos dois cenários	62
Figura 27: Gráfico do risco de condensação superficial, ao longo do ano, na orientação Sul em ambos os cenários	64
Figura 28: Gráfico do risco de condensação superficial, no período de inverno, na orientação Sul em ambos os cenários	65
Figura 29: Gráfico das Isopletras – ambos cenários, Orientação Sul.....	66

Lista de Tabelas

Tabela I: Condições do ensaio	47
Tabela II : Dados de entrada e parâmetros de simulação do EnergyPlus.....	54
Tabela III: Propriedades térmicas e higrotérmicas utilizadas na simulação	55
Tabela IV: Resultados dos dados das variáveis higrotérmicas e dados do default do programa WUFI Pro 6.7	60
Tabela V: Avaliação do WUFI- Bio	63
Tabela VI: Avaliação do WUFI- Bio	67

Lista de Abreviaturas e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standards</i>
CP's	Corpo de prova
EN	<i>European Standard</i>
F _{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
INMET	Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial
HAMT	<i>Combined Heat and Moisture Transfer Model</i>
Mpa	Resistência em mega Pascal Kg/cm ²
NBR	Normas Brasileiras de Regularização
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
SiNAT	Sistema Nacional de Avaliações Técnicas
ZB	Zona Bioclimática
WUFI	<i>Wärme und Feuchte instationär – Transient Heat and Moisture</i>

Sumário

1	Introdução	15
1.2	Justificativa	17
1.3	Delimitação do problema de pesquisa	18
1.4	Objetivo.....	19
1.4.1	Objetivos Específicos.....	19
2	Revisão da literatura.....	20
2.1	Desempenho higrotérmico de edificações	20
2.2	Conceitos de umidade	21
2.3	Umidade em edificações.....	22
2.4	Propriedades higrotérmicas dos materiais	24
3	Metodologia.....	27
3.1	Primeira Etapa: Normas, Referências e Estado da arte	30
3.2	Segunda Etapa: Ensaio em laboratório das variáveis higrotérmicas e cálculos numéricos	31
3.2.1	Ensaio em laboratório das variáveis higrotérmicas do tijolo cerâmico de vedação.	33
3.2.1.1	Variável higrotérmica: Resistência ao vapor de água [μ]	34
3.2.1.2	Variável higrotérmica: Absorção de água por capilaridade	37
3.2.1.3	Variável higrotérmica: Isotermas de Adsorção e Dessorção	39
3.2.2	Ensaio em laboratório das variáveis higrotérmicas do Concreto Autoadensável – F_{ck} 25MPa.....	41
3.2.2.1	Variável higrotérmica: Resistência ao vapor de água [μ]	41
3.2.2.2	Variável higrotérmica: Absorção de água por capilaridade	43
3.2.2.3	Variável higrotérmica: Isotermas de Adsorção e Dessorção	44
3.2.3	Cálculos numéricos.....	46
3.2.3.1	Cálculo e equações da resistência ao vapor de água [μ .]	46

3.2.3.2	Cálculo e equações da absorção de água por capilaridade	48
3.2.3.3	Cálculo e equações das Isotermas de Adsorção e Dessorção	49
3.3	Terceira Etapa: Simulações	50
3.3.1	<i>EnergyPlus 9.0</i> – Simulação do ambiente interno	51
3.3.2	<i>WUFI Pro 6.7</i> , configurações	55
3.3.3	<i>WUFI Bio</i> , alerta de formação de fungos filamentosos	56
3.4	Resultados, quarta etapa	57
4.	Análise e discussão dos resultados	59
4.1	Risco de condensação superficial – Tijolo cerâmico de vedação	60
4.2	Risco de formação de fungos filamentosos no tijolo cerâmico de vedação	62
4.3	Risco de condensação superficial, concreto autoadensável de Fck 25 Mpa ..	64
4.4	Risco de formação de fungos filamentosos - concreto autoadensável Fck 25 MPa.	66
5.	Considerações finais	68
	Referências	70

1 Introdução

Na busca por prédios mais eficientes que atendam aos requisitos mínimos de desempenho, os estudos sobre umidade ganharam a atenção dos pesquisadores, pois a umidade é uma das manifestações patológicas presente nas construções, e pode afetar a habitabilidade, criando um ambiente propício para o crescimento de fungos filamentosos e outros agentes de biodeterioração prejudiciais ao bem-estar do usuário (ZANONI, 2015).

Segundo González (2013), as manifestações patológicas que têm como origem a umidade surgem com mais evidência em construções de baixa qualidade e com sistemas construtivos mal resolvidos. Por isso é de suma importância entender o comportamento do transporte de umidade nas construções e como esse mecanismo pode originar manifestações patológicas como o mofo e degradação, como também, sensação de desconforto térmico (MENDES, 1997).

Segundo Morishita (2020), condições climatológicas também influenciam diretamente na condensação das superfícies e nas características dos sistemas construtivos, e conseqüentemente no desempenho higrotérmico das edificações. A condensação está vinculada à umidade que pode ser superficial – na superfície do material e intersticial - quando ocorre no interior do material.

Para isso, Cabrera, Samuelson e Kurth (2019) entendem a importância de progredir na simulação higrotérmica e investigaram estudos de sensibilidade dos resultados, focalizando na capacidade de adaptação das soluções construtivas às mudanças climáticas.

No Brasil, a norma NBR 13281 – 2: 2023, apresenta requisitos e métodos de ensaios e a NBR 15575 (ABNT, 2021), apresenta requisitos mínimos quanto ao desempenho térmico, mas não menciona sobre o comportamento higrotérmico. Por isso, as simulações higrotérmicas em nosso país são prejudicadas, pois não se tem uma base de dados referentes às propriedades higrotérmicas dos materiais (ZANONI, 2015). Essa ausência de informações normativas, mostra a importância de realizar-se estudos sobre a influência e o risco da umidade nas edificações, em todo país, para compreender melhor o desempenho higrotérmico (MORISHITA, 2020). Trabalhos que abordam a natureza multidimensional desses fenômenos em elementos de edificações ainda são escassos (GOFFART; RABOUILLE; MENDES, 2015).

Por isso que apenas com o avanço na modelagem higrotérmica é que os estudos simultâneos de calor e umidade em edifícios se tornaram sistemáticos (RAMOS *et al.*,2009).

Segundo HENSEN; LAMBERTS, 2011; KIRIMTAT e outros,2016, simulações computacionais têm sido amplamente utilizadas para apoiar as tomadas de decisões em projetos de edifícios energeticamente eficientes.

A simulação higrotérmica representa uma ferramenta valiosa na compreensão dos fenômenos de transporte de calor e massa. Ela pode se estabelecer como um meio crucial para fundamentar soluções confiáveis destinadas a projetistas, gestores e usuários finais. Esse crescente interesse na avaliação integrada destaca sua importância na otimização de decisões de projeto, *retrofit* e manutenção, abrangendo eficiência energética, custos de ciclo de vida e durabilidade (HAGENTOFT; BEDNAR, 2015; AMERICAN, 2016).

Contudo, apesar de reconhecer a relevância do desempenho dos sistemas construtivos, as normas brasileiras não definem parâmetros, métodos ou procedimentos sistemáticos para o monitoramento e a avaliação *in loco* dos elementos construtivos e sua resposta às variações higrotérmicas. Isto é, existem diretrizes para a temperatura, mas não para a umidade (ZANONI *et al.*,2020).

Uma pesquisa sobre o estado da arte dos programas de simulação numérica, permitiu identificar as diferenças de cada software ao nível de propriedades higrotérmicas, como também as técnicas laboratoriais utilizadas para a medição dessas características (NOVO,2011).

Segundo Zeng *et al.*, (2023) há duas abordagens primárias para analisar o desempenho higrotérmico: por meio de métodos experimentais e através de simulações numéricas. Métodos numéricos baseados em modelos acoplados de transferência de calor, ar e umidade (HAMT) apresentam uma complementação eficaz a essas limitações, permitindo avaliações de desempenho higrotérmico de longo prazo na fase de projeto, considerando tanto os climas quanto as propriedades dos materiais. Dentre esses métodos, destaca-se o WUFI, validado pelo teste de benchmark da EN 15026 e amplamente utilizado em simulações higrotérmicas, sendo reconhecido como um dos softwares mais confiáveis. Em contrapartida, o método

experimental enfrenta limitações ao analisar os efeitos de múltiplos fatores, como condições climáticas e propriedades dos materiais.

Neste contexto relacionado a métodos experimentais através de simulações, essa dissertação tem como objetivo analisar os dados higrotérmicos: resistência ao vapor de água (μ), absorção de água por capilaridade e isotermas (adsorção e dessorção) do programa de simulação *WU-FI Pro 6.7* em relação aos dados coletados em laboratório através de ensaios de dois materiais amplamente utilizados na região Sul do Rio Grande do Sul: tijolo cerâmico de vedação e concreto autoadensável Fck 25Mpa moldado "in loco".

Os ensaios desses materiais foram realizados no laboratório LAMTAC/NORIE /UFRGS. Com a análise dos resultados comparativos através da simulação, foi possível comparar os valores para concluir a importância do levantamento de dados higrotérmicos dos materiais em diferentes zonas bioclimáticas. Essa análise foi realizada apenas para a zona bioclimática 2.

1.2 Justificativa

A umidade exerce uma influência significativa no conforto térmico interno e na demanda energética das edificações. Entretanto, a transferência de calor e umidade nos sistemas construtivos é frequentemente desconsiderada nos cálculos de desempenho do edifício (XIA *et al.*, 2023).

Assim, o processo de construção está atualmente em meio a um período de mudanças significativas. Diante da crescente preocupação com as mudanças climáticas, a diminuição dos recursos de combustíveis fósseis e a maior atenção dedicada à relação entre o ambiente interno e a saúde dos ocupantes, os projetos de edifícios e as técnicas de construção estão se esforçando para reduzir o consumo de energia e assegurar ambientes internos confortáveis para aqueles que os utilizam (BRAGANÇA; MATEUS; KOUKKARI, 2010; ÔMER, 2011; AKADIRI; CHINYIO; OLOMOLAIYE, 2012).

No contexto nacional, faltam critérios e métodos para análise do desempenho higrotérmico das edificações, assim como informações referentes às propriedades higrotérmicas dos materiais.

Sendo assim, se faz necessário abordar a importância da caracterização higrotérmica dos materiais de construção nacionais e o desempenho higrotérmico dos sistemas construtivos para o contexto brasileiro, permitindo a realização de simulações computacionais mais realistas e contribuindo para tomada de decisões na escolha de materiais mais eficientes para cada região do país.

1.3 Delimitação do problema de pesquisa

Considerando a importância crescente dos estudos sobre umidade em edificações desde a década de 1980, de acordo com Mendes (2001), os resultados obtidos por softwares de simulação higrotérmica têm a capacidade de serem aplicados diretamente na compreensão do desempenho dos edifícios. Esses resultados fornecem informações essenciais, como temperatura ambiente, velocidade do ar e campos de pressão, umidade e iluminação, fundamentais para a análise do conforto nas edificações.

Compreender os dados higrotérmicos dos materiais no desempenho das construções brasileiras é fundamental para proporcionar modelos adequados para nossas regiões. A utilização da simulação computacional possibilita essa análise e viabiliza sua aplicabilidade em estudos quanto ao risco de condensação superficial e formação de fungos filamentosos. Assim, esta pesquisa busca fornecer informações sobre as variáveis higrotérmicas de dois materiais distintos para a Zona Bioclimática 2 e realizar ensaios em laboratório, levantando as variáveis higrotérmicas: resistência ao vapor de água, absorção de água por capilaridade e isothermas de adsorção e dessorção. Essas variáveis irão fornecer subsídios para uma análise comparativa dos dados do programa de simulação em relação aos dados coletados nos ensaios, verificando a importância de ensaios com materiais da região.

Neste contexto, este trabalho pretende preencher a lacuna da falta de dados higrotérmicos de materiais da nossa região e relacionar o uso de dados higrotérmicos locais e dados do *default* do programa de simulação *WUFI Pro 6.7* para atender aos quesitos mínimos de desempenho higrotérmico para a Zona Bioclimática 2. As simulações com os dados higrotérmicos do *default* do programa retratam a realidade da zona bioclimática 2?

1.4 Objetivo

O objetivo desta pesquisa é conduzir uma análise para determinar a viabilidade da utilização dos dados higrotérmicos padrão do programa de simulação *WUFI Pro 6.7* em dois materiais diferentes, em comparação com dados coletados em ensaios de laboratório o comportamento desses materiais em relação ao desempenho higrotérmico na Zona Bioclimática 2. Isso implica em avaliar os dados fornecidos pelo software em relação aos resultados obtidos em experimentos laboratoriais. Essa análise permitirá uma melhor compreensão da confiabilidade dos dados simulados pelo *WUFI Pro 6.7* e sua aplicabilidade prática na avaliação do desempenho higrotérmico de materiais em condições específicas da Zona Bioclimática 2.

1.4.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) verificar o cenário atual com relação aos critérios de análise referentes aos ensaios de materiais de construção;
- b) analisar por meio de simulação computacional a importância dos dados higrotérmicos em relação ao espaço geográfico;
- c) caracterizar os materiais e componentes construtivos de uma região brasileira;
- d) comparar as características higrotérmicas dos ensaios de dois materiais com o banco de dados do *software*;
- e) avaliar a compatibilidade destes dados dos ensaios em laboratório e verificar o impacto na simulação higrotérmica.

2 Revisão de literatura

2.1 Desempenho higrotérmico de edificações

O comportamento higrotérmico é uma área da física das construções que investiga o transporte simultâneo de calor e umidade nos elementos construtivos das edificações, conforme afirmado pela CIB W040 em 2012. É fundamental compreender os mecanismos de transporte de calor e umidade, bem como as propriedades higrotérmicas dos materiais utilizados na construção (ZANONI, 2015).

Desse modo, a análise do desempenho higrotérmico de edificações busca compreender como essas construções e seus componentes reagem em diferentes condições climáticas de temperatura e umidade do ar (NASCIMENTO, 2016).

Segundo Novo (2011), o desempenho higrotérmico dos edifícios tem se tornado uma demanda crescente nas últimas décadas, tanto no contexto da construção de novos edifícios quanto na reabilitação de estruturas existentes.

O conceito de conforto higrotérmico em edificações, proposto por Nascimento (2016), refere-se à análise das condições internas dos espaços, visando garantir que atendam aos requisitos e critérios desejados pelos usuários em relação ao conforto térmico. Conforme estabelecido pela norma NBR 15.575 (2021), um ambiente projetado de maneira apropriada deve promover a qualidade da saúde física e psicológica dos seus ocupantes.

Dentro desse contexto a Norma Brasileira NBR 15220-3, intitulada "Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Estratégias de Condicionamento Térmico Passivo para Habitações de Interesse Social" (ABNT, 1998 e 2005), desempenha um papel crucial ao dividir o Brasil em oito zonas bioclimáticas. Essa divisão é fundamentada em uma análise detalhada do desempenho térmico de edificações de interesse social, levando em consideração variáveis como temperatura e umidade. O principal objetivo dessa norma é oferecer diretrizes arquitetônicas que otimizem a adequação dos projetos às condições climáticas específicas de cada região.

Por isso que um projeto que respeite as características climáticas da região em que será implementado, deve apresentar várias estratégias projetuais que contribuem para a otimização do ambiente construído e seu conforto, sendo uma delas implantar a edificação no lote respeitando a zona bioclimática em que ele pertence. (DE CONTO *et al.*,2020)

2.2 Conceitos de umidade

O ar é composto por gases e vapor de água, sendo que o limite de saturação representa a quantidade máxima de vapor de água que pode ser contida pelo ar. Esse limite está diretamente relacionado à variação de temperatura, e a pressão que o vapor de água exerce é conhecida como pressão parcial, enquanto a pressão de saturação ocorre quando o ar atinge seu limite de saturação em relação ao vapor de água (HENRIQUES, 1994; RIBEIRO, 2013).

A umidade relativa é a relação entre a quantidade de vapor de água presente no ar (umidade absoluta) e a quantidade máxima que o ar pode conter em determinada temperatura (limite de saturação) (HENRIQUES, 1994; RIBEIRO, 2013).

A variação da umidade relativa está intrinsecamente ligada à temperatura do ar, mantendo-se constante a quantidade de vapor de água. Quando a temperatura aumenta, a umidade relativa diminui devido ao aumento do limite de saturação. Em contrapartida, uma redução na temperatura resulta em uma diminuição do limite de saturação, ocasionando um aumento na umidade relativa (HENRIQUES, 1994).

O fenômeno de condensação ocorre quando o ar atinge seu limite de saturação de vapor de água em determinada temperatura, levando à condensação das quantidades de vapor de água em excesso (HENRIQUES, 1994; PINHEIRO, 2013; PIRES, 2020). A presença de umidade em edificações pode ter diversas origens, e a solução para problemas causados pela umidade pode ser de difícil identificação e solução devido à grande quantidade de mecanismos de transporte envolvidos. Existem diversas formas de manifestação de umidade, incluindo umidade de construção, umidade ascendente do solo, umidade por precipitação, umidade de condensação, umidade causada por propriedades higroscópicas dos materiais e umidade gerada por atividades humanas (HENRIQUES, 1994). Esses fenômenos podem ocorrer em conjunto, sendo que uns podem ser consequência de outros.

A umidade inicial da construção pode ser causada pela quantidade de água presente nos materiais utilizados, bem como pelo clima externo, incluindo chuvas e umidade relativa do ar durante a etapa de construção. A umidade também pode ser causada por chuvas, que em condições de vento forte podem molhar as paredes, representando um fator de risco para a umidade, que pode diminuir a resistência

térmica dos materiais e aumentar sua condutibilidade térmica, favorecendo a condensação (HENRIQUES, 1994).

A complexidade dos fenômenos envolvidos na origem, transporte e armazenamento da umidade em edificações torna importante o conhecimento das diversas formas de manifestação de umidade a fim de identificar suas causas (HENRIQUES, 1994; NASCIMENTO, 2016).

2.3 Umidade em edificações

Conforme apontado por Mendes (1997), a umidade pode acarretar não só em aumento no consumo de energia elétrica e desconforto térmico, mas também na degradação e deterioração dos elementos construtivos. É comum que edifícios de baixa qualidade ou com sistemas construtivos mal projetados apresentem problemas relacionados à umidade (GONZÁLEZ; OLIVEIRA; AMARANTE; 2020).

A umidade é amplamente reconhecida como uma fonte significativa de problemas em edificações, prejudicando sua durabilidade, qualidade do ar interno e impactando negativamente na saúde dos ocupantes (HENS, 2015). Além disso, a umidade pode propiciar o crescimento de fungos, que podem ser prejudiciais à saúde dos ocupantes das edificações (ZANONI, 2015). Segundo Guerra (2012), esses fungos podem causar problemas de saúde aos ocupantes como: micoses de pele, micotoxicoses pela ingestão de alimentos contaminados ou inalação de poeira e esporos contaminados e várias doenças respiratórias e degradação dos materiais construtivos da edificação.

A técnica construtiva mais utilizada no Brasil é a alvenaria de bloco cerâmico, que apresenta risco potencial de umidade, principalmente em regiões com altos valores de pressão de vapor externo, altas taxas de chuva com ação do vento e regiões densamente povoadas (MORISHITA *et al.*, 2016). A condensação superficial é o terceiro principal problema relacionado à umidade nas edificações, ficando atrás apenas das infiltrações e da umidade ascensional, ocorrendo quando a face interna da parede externa do envelope da edificação está com temperatura mais baixa do que a temperatura do ar do ambiente interno. A presença de condensação superficial pode ser reduzida melhorando o isolamento térmico do edifício, aumentando a temperatura

do ambiente ou melhorando a ventilação para transportar o excesso de umidade para o exterior da edificação (HENRIQUES,1994).

Portanto, é fundamental considerar o desempenho higrotérmico das edificações, avaliando tanto a condensação superficial quanto a formação de fungos filamentosos, a fim de prevenir problemas de degradação dos materiais construtivos e problemas de saúde dos ocupantes.

Segundo Sedlbauer (2001), um modo decisivo para o crescimento de fungos é a umidade relativa, que deve ser mantida abaixo de 60% para prevenir a proliferação de fungos. No entanto, alguns fungos podem crescer em umidades relativas mais baixas, e outros precisam de uma umidade mais alta para proliferarem.

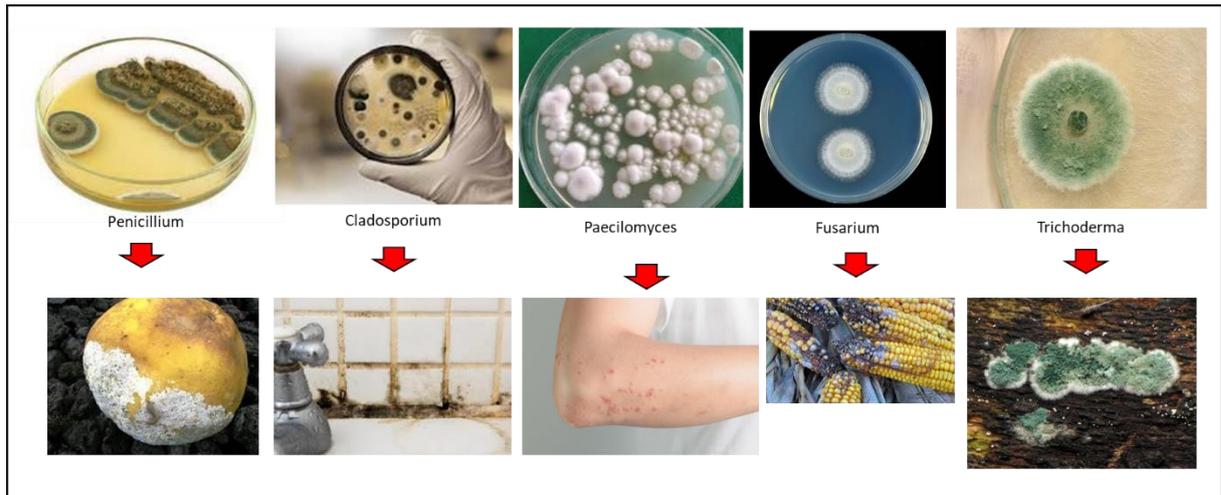
Assim como a umidade relativa, a temperatura, o tipo de substrato, o pH da superfície, a disponibilidade de nutrientes, a quantidade de oxigênio e o tempo para que todas as condições favoráveis ocorram simultaneamente podem proporcionar um ambiente para o crescimento dos fungos (SEDLBAUER, 2001; GUERRA *et al.*, 2012)

Segundo Guerra (2012), na cidade de Pelotas/RS, onde foi realizado o estudo, os principais gêneros de fungos filamentosos encontrados são: *Penicillium*, *Paecilomyces*, *Cladosporium*, *Fusarium* e *Trichoderma*.

Esses fungos podem germinar a uma temperatura mínima de 0°C e crescer a uma temperatura mínima de -5°C. A germinação do esporo ocorre com uma umidade relativa a partir de 78% e o crescimento do micélio de um dos gêneros de fungo ocorre com uma umidade relativa a partir de 75%. A média das umidades relativas mínimas para a ocorrência dos fungos analisados é de 80%, o que confirma o limite estabelecido por Sedlbauer (2001).

Na figura 1, ilustra-se os tipos de fungos filamentosos encontrados no estudo de Guerra (2012).

Figura 1: Tipos de fungos filamentosos



Fonte: elaborada pelo autor.

É importante ressaltar a necessidade de medidas preventivas para minimizar esses riscos, como a melhoria do isolamento térmico das edificações, o controle da umidade relativa do ar interno, a adequação das técnicas construtivas à região e o uso de materiais com propriedades higroscópicas adequadas. Além disso, é fundamental que as edificações passem por avaliações periódicas para identificação de possíveis problemas relacionados à umidade e adotem medidas corretivas adequadas.

2.4 Propriedades higrotérmicas dos materiais

No cenário brasileiro, diversos autores têm se dedicado a estudar o desempenho higrotérmico de sistemas construtivos. Em estudos realizados, foi possível avaliar o desempenho higrotérmico de sistemas construtivos através de diversas metodologias, como medições em campo (DANTAS *et al.*, 2020; ZANONI *et al.*, 2020), avaliação de condensação superficial em edificações (BULIGO, 2021; PIRES, 2020), ocorrência de bolores (AFONSO, 2018), influência dos agentes climáticos na degradação de fachadas (ZANONI, 2015; NASCIMENTO, 2016; VON EYE *et al.*, 2017), bem como investigação dos riscos de umidade em diferentes climas do Brasil (MORISHITA *et al.*, 2016; MORISHITA, 2020). Tais estudos evidenciam a importância de se considerar o desempenho higrotérmico das edificações no país e a necessidade de se adotar medidas preventivas para minimizar os riscos de problemas relacionados à umidade.

Segundo Zaroni (2015), as propriedades higrotérmicas: fator de resistência ao vapor de água, coeficiente de absorção de água líquida e isotermas de Equilíbrio (Curvas Higroscópicas) são de suma importância para entender o processo de transferência de calor e massa, dentro de uma situação de simulação computacional.

Para avaliar a permeabilidade ao vapor de água é utilizado o fator de resistência à difusão do vapor de água, μ , que representa a razão entre o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do ar e o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material.

Esse fator indica quantas vezes a resistência à difusão do vapor de água do material é maior do que a resistência à difusão do vapor de água de uma camada de ar em repouso, de igual espessura e sob as mesmas condições ambientais (FREITAS; PINTO, 1999).

O Coeficiente de absorção de água líquida de acordo com a NBR 13281 (2023), caracteriza a capilaridade do material quando em contato com a água na fase líquida; é a propriedade de um material em absorver água líquida por sucção em função do tempo.

As isotermas de equilíbrio, as curvas higroscópicas segundo Salomão (2016) são representações gráficas que demonstram a relação entre o teor de umidade e a umidade relativa. As curvas de adsorção e dessorção do material são conhecidas como isotermas de sorção, as quais apresentam uma diferença conhecida como histerese, que evidencia a variação no comportamento dos fenômenos de adsorção e dessorção. Quando a umidade relativa aumenta, os materiais higroscópicos absorvem umidade (adsorção) e, quando a umidade relativa diminui, eles perdem umidade (dessorção). No entanto, é importante destacar que o processo de dessorção é mais lento que o processo de adsorção.

Programas computacionais desenvolvidos em diferentes países nos últimos anos permitem a avaliação dos fenômenos de transporte higrotérmico (HOLM; KUENZEL; SEDLBAUER, 2003). Nesse sentido, a simulação computacional se mostra como uma alternativa viável para o estudo higrotérmico dos sistemas construtivos (KARAGIOZIS; SALONVAARA, 2001). Além disso, os programas de simulação são úteis na verificação da ocorrência de condensações superficiais ou

intersticiais, que são importantes para a análise do desempenho higrotérmico (PINHEIRO, 2013).

Devido à escassez de dados higrotérmicos específicos para o Brasil, visto que os bancos de dados disponíveis em programas de simulação são baseados em informações internacionais, torna-se necessário realizar ensaios em laboratório para obter dados mais realistas e garantir uma análise do desempenho higrotérmico satisfatório dos materiais de construção dentro de cada zona bioclimática do Brasil.

3 Metodologia

O estudo analisa materiais amplamente utilizados na construção civil em Pelotas, RS, especificamente o tijolo cerâmico furado de vedação e o concreto autoadensável moldado "in loco". A escolha do tijolo cerâmico se deve à sua relevância nas construções na região Sul, onde métodos tradicionais ainda são predominantes. Sua utilização é observada em cerca de 82% das edificações no Brasil, conforme dados da Pesquisa Nacional por Amostras de Domicílio (PNAD Contínua), justificando sua escolha como objeto de pesquisa (MORISHITA, 2020; IBGE, 2023). Optou-se por tijolos cerâmicos de 6 furos, com dimensões (cm): 9 x 14 x 19, provenientes de uma olaria local certificada para comercialização.

Por sua vez, o concreto autoadensável (Fck 25Mpa) moldado "in loco" foi selecionado por ser o sistema mais adotado pelas construtoras em programas habitacionais de interesse social. As amostras de concreto foram confeccionadas em fôrmas que mantiveram uma espessura de 10 cm, correspondente à utilizada em construções. Essas amostras foram produzidas através de coleta do material, no local de uma obra de habitação de interesse social, na cidade de Pelotas, RS.

De acordo com estatísticas do Sindicato da Construção Civil da região Sul nos últimos 5 anos, o tijolo cerâmico de vedação é empregado em aproximadamente 70% das construções residenciais na região de Pelotas, RS. Já o concreto autoadensável moldado "in loco" é utilizado em cerca de 90% dos projetos habitacionais de interesse social realizados pelas construtoras na cidade. Esses números refletem a predominância desses materiais no contexto construtivo local e justificam sua escolha para o estudo em questão.

Cabe ressaltar que os dois materiais selecionados não foram submetidos a acabamento nem integrados a um sistema construtivo nas simulações. Eles foram avaliados em seu estado bruto.

Para a realização dos ensaios em laboratório foi determinado que seria adotadas as seguintes normas:

- ISO 12572:2016 – Desempenho Higrotérmico de materiais e produtos de construção – Determinação de vapor de água – método do copo

Esse método de determinação de vapor de água resulta no fator de resistência à difusão de água - μ [-] (ISO, 2016).

Segundo Novo (2011), esse ensaio que determina o fator de resistência à difusão ao vapor de água, visa compreender como esse fator é importante dentro dos parâmetros dos programas de simulação computacional.

Este ensaio é mencionado na NBR 13281 (2023) e pode ser realizado de acordo com as normas da ASTM, permitindo assim uma abordagem flexível na escolha da referência utilizada (ISO, 2016).

No estudo de Kleber (2018) também foi conduzido este ensaio em laboratório com o objetivo de comparar os Sistemas de Vedação Vertical Externa (SVVE).

- BS EN ISO 15148:2002 – Desempenho higrotérmico de materiais e produtos de construção – Determinação do coeficiente de absorção de água por imersão parcial

Esse ensaio determina o coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Novo (2011), destaca em seu trabalho que o coeficiente de absorção de água por capilaridade é uma propriedade higrotérmica essencial para as simulações computacionais.

Por isso, que Kleber (2018), em seu trabalho também realiza esse ensaio em laboratório, para compreender o comportamento dos Sistemas de Vedação Vertical Externa (SVVE).

O objetivo desse ensaio é avaliar a taxa de absorção de água por capilaridade quando expostos à chuva contínua ou forte durante o armazenamento em obra ou construção (BS EN ISO, 2002).

- BS ISO 24353:2008 – Desempenho higrotérmico de materiais e produtos de construção – Determinação das propriedades de adsorção/dessorção da umidade em resposta a variação de umidade

Esse ensaio determina as propriedades de adsorção/dessorção de umidade de materiais de construção em resposta à variação de umidade, também define a eficiência de adsorção/dessorção de materiais de construção com a mudança na massa em relação a diferentes umidades relativas e temperaturas iguais (BS ISO, 2008).

Em seu trabalho, Novo (2011) cita que a curva higroscópica é uma das variáveis usadas nas simulações computacionais. Assim como Kleber (2018), utilizou em seu

experimento, a determinação da curva higroscópica para os materiais que compõem o SVVE.

Portanto, esta pesquisa adota uma abordagem exploratória com um enfoque quantitativo, englobando pesquisa bibliográfica, de campo e análise experimental. O método de pesquisa prevê a utilização de simulações computacionais nos programas *WUFI Pro 6.7*, *WUFI Bio* e *EnergyPlus 9.0*. Essa estratégia é empregada para comparar os resultados das simulações entre os dados do *default* do programa e os dados dos resultados dos ensaios, visando entender o comportamento dos materiais na Zona Bioclimática 2 do Brasil.

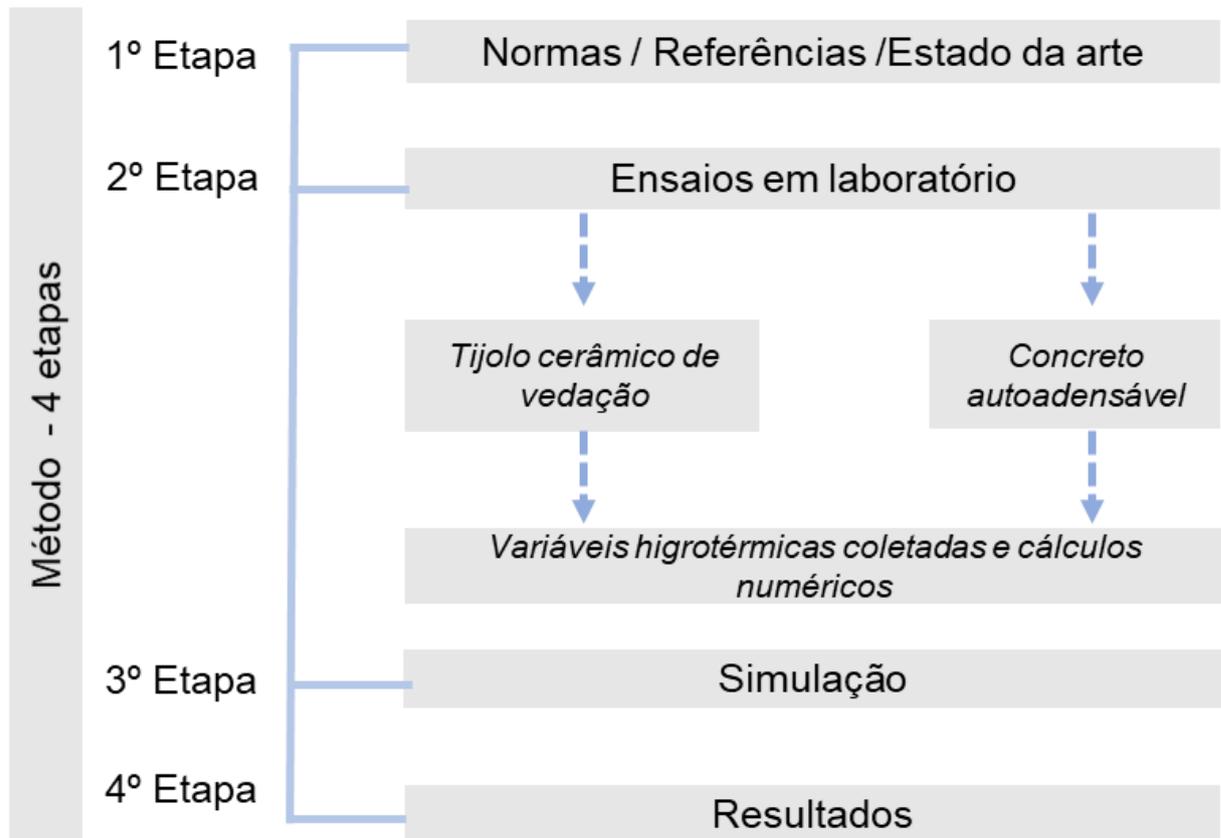
O método adotado neste estudo foi desenvolvido em quatro etapas distintas.

Na primeira etapa, realizou-se uma revisão dos estudos existentes e do estado da arte das normas e referências utilizadas para a condução dos ensaios higrotérmicos dos materiais, bem como para embasar o desenvolvimento da pesquisa.

A segunda etapa concentrou-se na caracterização dos materiais e valores numéricos através de cálculos, em relação às variáveis higrotérmicas, incluindo a avaliação da resistência ao vapor de água, absorção de água por capilaridade e isoterma, tanto para o tijolo cerâmico de vedação quanto para o concreto autoadensável com resistência nominal de F_{ck} 25MPa.

Na terceira etapa, foram realizadas as simulações computacionais pertinentes ao estudo. Por fim, a quarta etapa compreendeu a análise e discussões dos resultados obtidos nas etapas anteriores. A figura 2 mostra o fluxograma das etapas do método desenvolvido.

Figura 2: Fluxograma do método em 4 etapas



Fonte: elaborado pelo autor.

3.1 Primeira Etapa: Normas, Referências e Estado da arte

A primeira etapa consiste na definição do estudo das propriedades higrótérmicas necessárias para as simulações computacionais, bem como os ensaios em laboratório para o levantamento dos dados referentes ao fator de resistência ao vapor de água, absorção de água e Isotermas de Adsorção e Dessorção.

Com o objetivo de assegurar a qualidade e equidade dos produtos, registros e processos, foram adotadas normas ISO, conforme indicado na ABNT NBR 13281-1 (2023), para realização de ensaios laboratoriais referentes às variáveis higrótérmicas, tais como a ISO 12572 (2016), que trata do desempenho higrotérmico de materiais de construção e produtos, bem como a BS EN ISO 15148 (2002) e a BS ISO 24353 (2008) que tratam da determinação de coeficiente de absorção de água por imersão parcial e propriedades de adsorção/dessorção de umidade em resposta a variações de umidade, respectivamente.

A preparação das amostras e os ensaios foram realizados no laboratório LAMTAC-NORIE DA UFRGS (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), com os equipamentos necessários, em câmaras com temperatura e umidade controladas, conforme as normas específicas de cada variável higrotérmica analisada.

3.2 Segunda Etapa: Ensaio em laboratório das variáveis higrotérmicas e cálculos numéricos

Esta etapa abordou dois materiais distintos que são utilizados nas construções da região de Pelotas: o tijolo cerâmico de vedação e o concreto autoadensável com resistência característica à compressão (F_{ck}) 25 MPa.

O tijolo cerâmico de vedação é um material amplamente presente nas construções brasileiras, de acordo com a Pesquisa Nacional por Amostragem de Domicílio (PNAD Contínua), que revelou que a alvenaria está presente em 88,2% das construções brasileiras. Este tipo de material também é um material tradicionalmente reconhecido por sua qualidade. Nesta amostra específica, o tijolo é produzido numa olaria de Pelotas-RS e passa por diversos ensaios prescritos nas normas vigentes, como a determinação das características geométricas conforme a NBR 15270 (2017) anexo A, a determinação das características físicas conforme a NBR 15270 (2017) anexo B e a determinação da resistência à compressão conforme a NBR 15270 (2017) anexo C, antes de ser comercializado, garantindo sua qualidade.

Com o objetivo de efetuar simulações comparativas entre os dados obtidos nos ensaios e os dados gerados pelo programa de simulação, foi estabelecido um critério para a escolha de um tijolo cerâmico de vedação da base de dados do programa de simulação que possuísse características similares às estabelecidas pela norma ABNT NBR 15220 (2003). Dessa forma, procurou-se selecionar um tijolo que apresentasse a maior proximidade possível com as características normativas, visando uma análise precisa e coerente entre os resultados obtidos em ambos os testes.

O material escolhido para a amostra de concreto neste trabalho é um concreto autoadensável de F_{ck} 25MPa, utilizado na produção de paredes de concreto moldadas *in loco* na cidade de Pelotas-RS. A escolha deste material deve-se a recentes pesquisas do Núcleo Parede de Concreto, realizadas na região de Pelotas, onde observou-se um aumento substancial no uso de paredes de concreto como

componente de vedação portante em projetos de construção. Estudos acadêmicos têm documentado essa tendência crescente, destacando as vantagens técnicas e econômicas desse método construtivo (TUTIKIAN *et al.*, 2006).

Com o propósito de realizar simulações comparativas entre os resultados obtidos nos testes e os dados do *default* do programa, foi definido um critério para a seleção do concreto da base de dados do programa de simulação, conforme apontado por Brito e Silva (2022) em uma análise sobre a sensibilidade do comportamento higrotérmico de uma parede a diferentes características higrotérmicas do concreto.

Assim, com o objetivo de garantir uma comparação precisa e consistente entre os resultados dos dois testes, procurou-se selecionar um tipo de concreto que apresentasse a maior proximidade possível com as características normativas do concreto da amostra utilizada no ensaio.

Para realizar o ensaio, as amostras foram coletadas no canteiro de obras e armazenadas em recipientes que garantiram uma espessura constante de 10 cm, representando as paredes concretadas em alguns empreendimentos de Pelotas, RS.

O processo ocorreu em 18 de novembro de 2022, em Pelotas-RS. Utilizou-se concreto F_{ck} 25,0 MPa (destinado a paredes de concreto), com uma consistência de espalhamento de 670 mm x 660 mm e com resistência à compressão registrada em 7 dias e 28 dias, procedimento padrão da empresa:

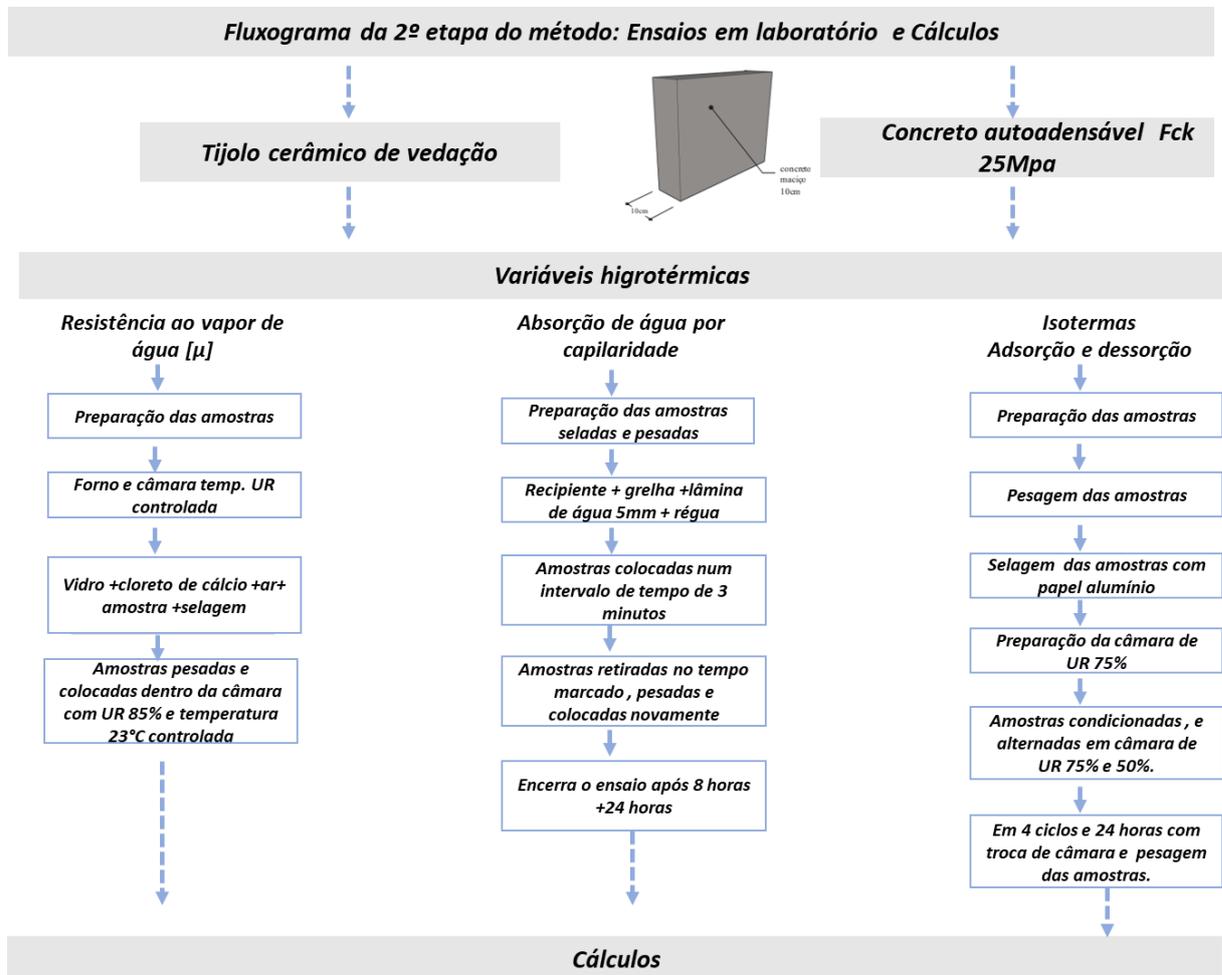
- 7 dias: 18,5 MPa
- 28 dias: 27,2 MPa.

Essas informações foram fornecidas pela empresa responsável pelo fornecimento das amostras de concreto.

Portanto, os ensaios, variáveis higrotérmicas e cálculos numéricos foram uniformes para ambos os materiais, cada um sendo tratado de forma independente. A seguir, serão apresentados os ensaios conduzidos e os cálculos numéricos realizados para ambos os materiais, e acompanhados por uma análise detalhada dos cálculos numéricos, juntamente com uma descrição dos procedimentos metodológicos adotados, ressaltando as adaptações essenciais realizadas para a condução eficaz dos ensaios. Por fim na figura 3 o fluxograma ilustra de forma visual

e organizada a ordem dos ensaios em laboratório das variáveis higrotérmicas, e cálculos para ambos os materiais.

Figura 3: Fluxograma da 2ª etapa do método: ensaios em laboratório e cálculos



Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.1 Ensaios em laboratório das variáveis higrotérmicas do tijolo cerâmico de vedação.

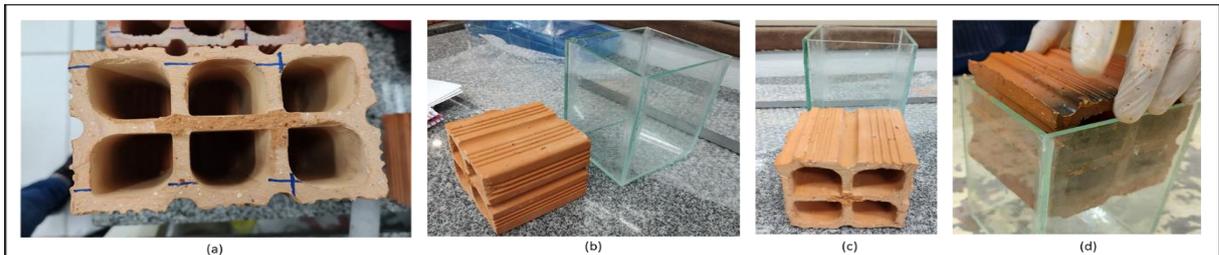
A seguir, é apresentado o método dos ensaios em laboratório das variáveis higrotérmicas, os quais foram conduzidos para avaliar diferentes aspectos relacionados ao comportamento térmico e de umidade do material em análise.

3.2.1.1 Variável higrotérmica: Resistência ao vapor de água [μ]

Os ensaios da resistência ao vapor de água, seguiram uma metodologia semelhante adotada por Salomão (2016).

A Figura 4 ilustra o processo de preparação da amostra do tijolo cerâmico de vedação. Na Figura 4a, é mostrado o corte realizado na amostra para adequá-la ao recipiente de vidro. O recipiente de vidro, confeccionado com dimensões de 10x10x15 cm de altura, mantém as medidas originais do material. As figuras 4b e 4c proporcionam uma visualização mais detalhada desse recipiente. Na Figura 4d, é realizado um teste para verificar a adequação do tamanho do recipiente em relação à amostra, garantindo uma acomodação precisa e adequada durante o ensaio.

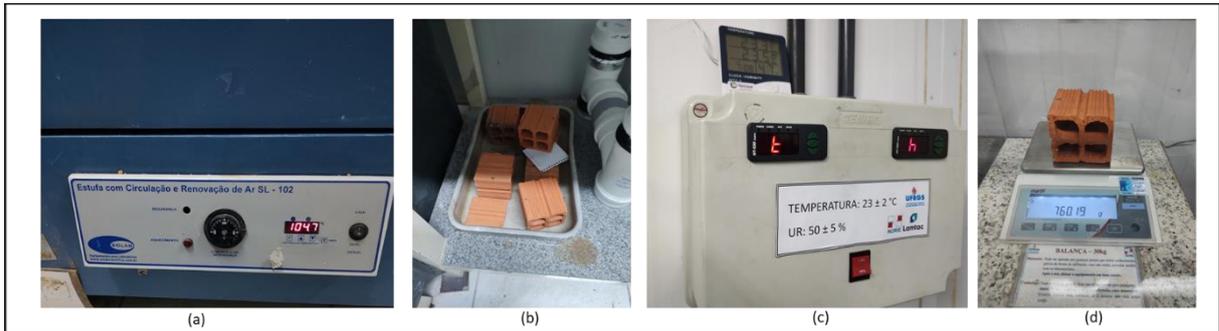
Figura 4: Preparação da amostra do tijolo. (a) adaptação das medidas da amostra; (b) e (c) recipiente de vidro e amostra cortada; (d) teste de adequação da amostra no recipiente de vidro



Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 5, o primeiro estágio do procedimento envolveu a submissão das amostras a uma temperatura de 100°C no forno do laboratório para assegurar sua completa secagem (Figura 5a). Em seguida, as amostras foram transferidas para uma câmara de temperatura e umidade controladas, mantendo uma umidade relativa de 50% \pm 5%, e temperatura de 23 \pm 2°C. Esse passo teve como objetivo estabilizar a massa das amostras dentro de um período adequado, conforme recomendado pela norma para as condições iniciais do ensaio (Figuras 5b e 5c). Posteriormente, foi realizada a pesagem das amostras após a estabilização da massa (Figura 5d).

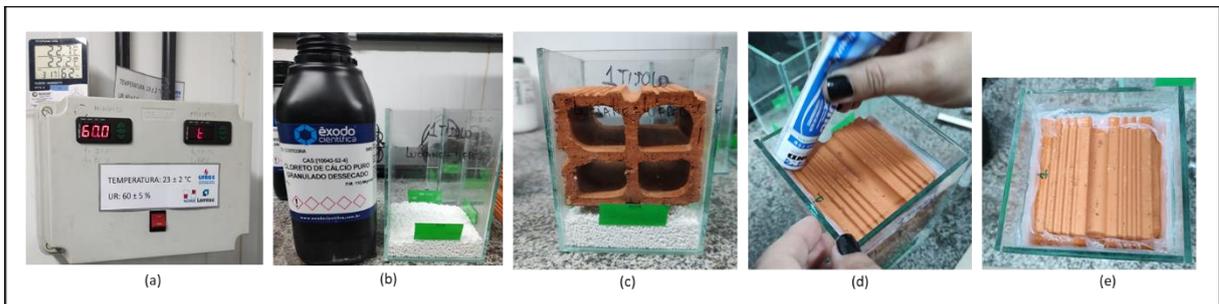
Figura 5: Preparação da amostra do tijolo. (a) forno 100°C; (b) e (c) amostras na câmara de UR e temperatura controlada; (d) pesagem das amostras.



Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 6, o processo de preparação das amostras teve continuidade em outra câmara com umidade relativa de $60\% \pm 5\%$, e temperatura mantida a $23 \pm 2^\circ\text{C}$, conforme ilustrado na Figura 6a. Em seguida, uma camada de 2 cm de cloreto de cálcio (CaCl_2), utilizado como dessecante, foi cuidadosamente disposta nos recipientes de vidro (Figura 6b). A fita dupla face verde visível nas imagens desempenhou um papel crucial, não apenas garantindo a distância entre as amostras e o cloreto de cálcio para evitar que a amostra descesse devido ao peso, mas também mantendo uma distância de 2 cm de ar entre a amostra e o cloreto de cálcio (Figura 6c). Para assegurar que apenas o vapor passe pelas faces do tijolo, um selante foi aplicado na parte superior da amostra (Figuras 6d e 6e). Esses cuidados são essenciais para garantir a precisão e a validade dos resultados no ensaio de resistência à difusão de vapor de água. Três amostras representativas do produto foram selecionadas e preparadas conforme as diretrizes da norma, assegurando que as preparações não danificam a superfície e não afetam o fluxo do vapor de água.

Figura 6: Preparação da amostra do tijolo. (a) troca da câmara de UR e temperatura controlada; (b) colocação de 2cm de dessecante até o início da fita verde; (c) dessecante espaço de 2cm de ar e amostra; (d) e (e) processo de selagem

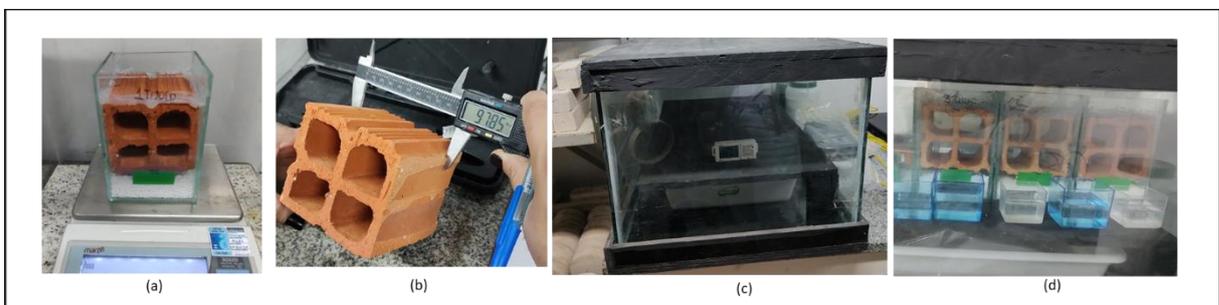


Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 7, após a preparação das amostras dentro dos recipientes de vidro selados, elas foram pesadas e medidas (Figura 7a e 7b) antes de serem colocadas em uma caixa climatizada (Figura 7c). A caixa foi ajustada com uma solução saturada de nitrato de magnésio ($\text{NO}_3)_2$ para manter a temperatura controlada a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e a umidade relativa em 85%, correspondendo à média anual da cidade de Pelotas (Figura 7c). A quantidade de nitrato de magnésio foi calculada para alcançar essa umidade relativa específica dentro da caixa.

Dentro da caixa, um *dataloger* registrou continuamente a temperatura e umidade durante todo o ensaio (Figura 7d). As amostras foram então submetidas a pesagens diárias no mesmo horário até atingirem estabilidade, seguindo o protocolo de 5 determinações sucessivas de mudança de massa por intervalo de pesagem, conforme recomendado pela norma.

Figura 7: Início do ensaio. (a) e (b) amostras pesadas e medidas; (c) caixa de controle de UR e temperatura; (d) dataloger registrando UR e temperatura dentro da caixa fechadas com as amostras



Fonte: elaborada pelo autor.

Após a finalização do ensaio, foram feitos os cálculos e as expressões de resultados para a determinação do Fator de Resistência ao vapor de água [μ], que será apresentado posteriormente.

3.2.1.2 Variável higrotérmica: Absorção de água por capilaridade

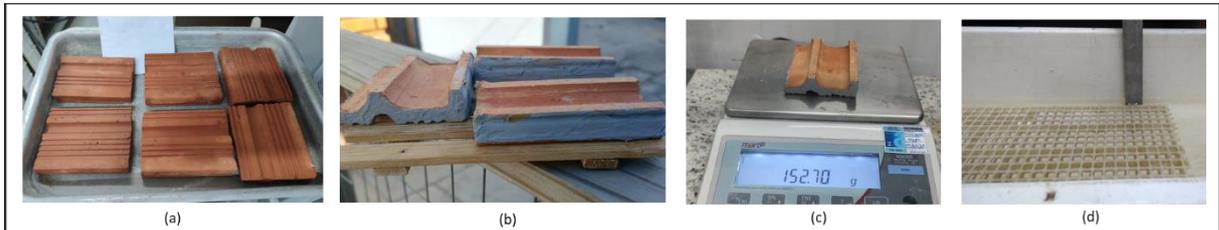
O ensaio de absorção de água foi realizado baseado na BS EN ISO 15148: 2002 – Desempenho higrotérmico de materiais e produtos de construção – Determinação do coeficiente de absorção de água por imersão parcial (BS EN ISO, 2002).

No experimento, é realizado um processo de imersão parcial em água, sem variação de temperatura, a fim de calcular o coeficiente de absorção de água líquida em um curto período.

A Figura 8 apresenta a preparação das amostras e a aparelhagem utilizada para a realização do ensaio dos corpos de prova. O ensaio foi conduzido em conformidade com a norma, BS EN ISO 15148 (2002), empregando seis corpos de prova (Figura 8a). Cada amostra foi adequadamente vedada com um selante à prova d'água, deixando apenas a face inferior em contato com a água, conforme as diretrizes estabelecidas (Figura 8b). As amostras foram previamente pesadas e condicionadas de acordo com as especificações da norma (Figura 8c).

Para garantir uma imersão adequada, uma bacia contendo água foi preparada, e uma grelha foi inserida para otimizar o contato da área do corpo de prova com o líquido. Essa disposição permitiu que as amostras ficassem suspensas, sem tocar o fundo do recipiente, assegurando que apenas a face inferior estivesse submersa em uma lâmina de água de 5 mm. Essa altura foi mantida constante ao longo de todo o ensaio, sendo monitorada por uma régua de alumínio (Figura 8d).

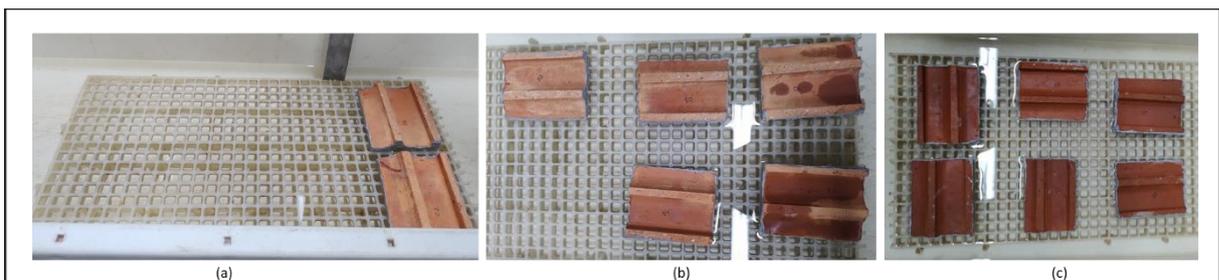
Figura 8: Preparação das amostras do tijolo. (a) seis amostras; (b) amostras seladas; (c) amostras pesadas; (d) lâmina de água com 5mm acima da grelha e régua de alumínio



Fonte: elaborada pelo autor.

A face em contato com a água foi mantida plana, seguindo as recomendações da BS EN ISO 15148 (2002), que preconiza essa prática para garantir resultados precisos e comparáveis. Na Figura 9, é possível observar a inserção dos corpos de prova no recipiente contendo água, com um intervalo de 3 minutos entre cada colocação (Figura 9a e 9b). Durante o experimento, as amostras foram pesadas e enxugadas levemente a cada intervalo de 2 horas e 50 minutos, e foi observado o surgimento gradual de água na superfície superior das amostras. Após um período de 8 horas, as amostras estavam completamente saturadas, indicando o término do ensaio de acordo com as diretrizes estabelecidas na norma (Figura 9c).

Figura 9 : Ensaio de absorção de água do tijolo, (a) e (b) amostras colocadas em um intervalo, (c) amostras no final das 8 horas.



Fonte: elaborada pelo autor.

O ensaio foi realizado em um ambiente climatizado com temperatura entre 18 e 23 °C e UR 40 a 60%, dentro da variação permitida pela norma.

Após a conclusão das pesagens e do ensaio, o gráfico resultante, de acordo com as especificações da norma, apresentou o padrão "Tipo A" com presença de água na superfície. Dessa forma, foram conduzidos os cálculos para obter-se o valor da absorção parcial de água, que será inserido no programa de simulação.

3.2.1.3 Variável higrotérmica: Isotermas de Adsorção e Dessorção

As Isotermas são a capacidade e eficiência que o material tem de absorver e de dispersar a umidade no ar ambiente. A isoterma de adsorção é obtida a partir de amostras secas, onde ocorre a migração do vapor de água presente no ar para o interior do material. Por outro lado, a isoterma de dessorção é gerada a partir de amostras saturadas, onde ocorre a evaporação da umidade presente no material.

O ensaio das Isotermas foi realizado conforme a BS ISO 24353:2008 – Desempenho higrotérmico de materiais e produtos de construção – Determinação das propriedades de adsorção/dessorção da umidade em resposta a variação de umidade (BS ISO, 2008).

Para a preparação do ensaio, conforme mostrado na Figura 10, foram seguidas as seguintes etapas:

Inicialmente, foram selecionadas duas amostras de acordo com as diretrizes de dimensões e quantidades de corpos de prova estabelecidos na norma (Figura 10a). Cada amostra possuía dimensões de 14x14x2,35 cm, mantendo a espessura original do produto.

Durante a fase de preparação dos Corpos de Prova (CPs) (Figura 10b), as amostras foram pesadas para garantir uma medição precisa da variação de massa ao longo do ensaio.

Posteriormente, as amostras foram cuidadosamente seladas com papel alumínio, deixando apenas uma face da superfície livre para permitir a exposição ao ambiente de ensaio (Figura 10c). Esses procedimentos visam garantir a consistência e a precisão dos resultados obtidos durante o ensaio.

Figura 10: Preparação das amostras do tijolo. (a) amostras; (b) pesagem; (c) selagem com papel alumínio

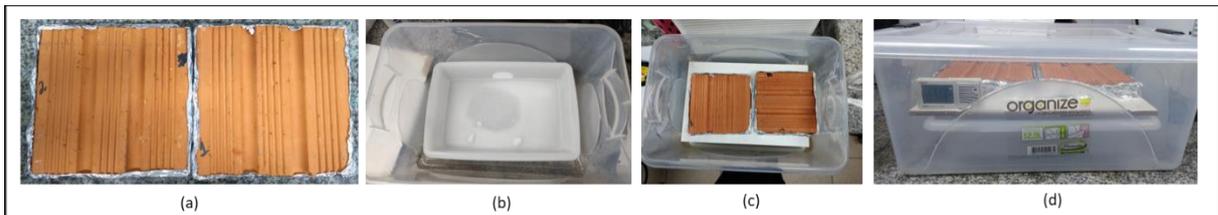


Fonte: elaborada pelo autor.

Após a preparação inicial das amostras, o ensaio foi iniciado expondo alternadamente os corpos de prova (CPs) em câmaras adaptadas para alcançar diferentes umidades relativas (URs) de 75% e 50%. Na Figura 11, pode-se observar os CPs selados com papel alumínio (Figura 11a), juntamente com a bandeja contendo água e cloreto de sódio (NaCl), utilizado para alcançar uma umidade relativa de 75% dentro da caixa selada (Figura 11b e 11c).

O ensaio teve início quando as amostras foram colocadas dentro de uma caixa com tampa, cuja umidade relativa foi controlada por um *dataloger* que registra temperatura e umidade relativa (Figura 11d). As amostras permaneceram dentro da caixa fechada, em uma câmara adaptada, com umidade relativa de $60\% \pm 5\%$ e temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, durante 24 horas. Essa etapa é crucial para estabilizar as condições iniciais das amostras antes do início do ensaio principal.

Figura 11: Ensaios das Isotermas do tijolo. (a) amostras seladas com papel alumínio; (b)e (c) bandeja com água e cloreto de sódio; (d) caixa adaptada com UR e temperatura controlada pelo *dataloger*



Fonte: elaborada pelo autor.

Após esse período, a caixa foi transferida para outra câmara com umidade relativa de $50\% \pm 5\%$ e mesma temperatura, porém com a tampa aberta. Nessa segunda câmara, a caixa também permaneceu por 24 horas. Esse ciclo de 24 horas em cada câmara foi repetido por um total de 4 vezes, conforme estabelecido pela norma no teste cíclico.

Ao término dos 4 ciclos de 24 horas, foram obtidos os valores do "Teor de umidade de adsorção" e do "Teor de umidade de dessorção", assim como suas diferenças, através das equações pertinentes. Estes valores foram então inseridos no programa WUFI Pro 6, na curva higroscópica do material, dentro das propriedades higrotérmicas.

3.2.2 Ensaio em laboratório das variáveis higrotérmicas do Concreto Autoadensável – F_{ck} 25Mpa

3.2.2.1 Variável higrotérmica: Resistência ao vapor de água [μ]

A seguir, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados no concreto autoadensável, utilizando a mesma metodologia empregada anteriormente para os ensaios do tijolo cerâmico de vedação. Esses resultados serão acompanhados por uma análise dos cálculos numéricos utilizados. Além disso, serão delineados os procedimentos metodológicos adotados, com destaque para as adaptações essenciais realizadas para a condução efetiva desses ensaios.

Assim como no ensaio do tijolo cerâmico de vedação, o experimento realizado para avaliar a resistência ao vapor de água na amostra de concreto utilizou a metodologia de Salomão (2016).

As amostras foram concretadas em moldes de plástico, seguindo as dimensões preestabelecidas pela norma correspondente ao número de amostras por metro quadrado. Após a concretagem, as amostras foram deixadas expostas ao meio ambiente durante o período de cura, que durou 24 horas. Posteriormente, foram desmoldadas e armazenadas em uma caixa, continuando expostas ao meio ambiente por mais 60 dias antes de serem utilizadas nos ensaios.

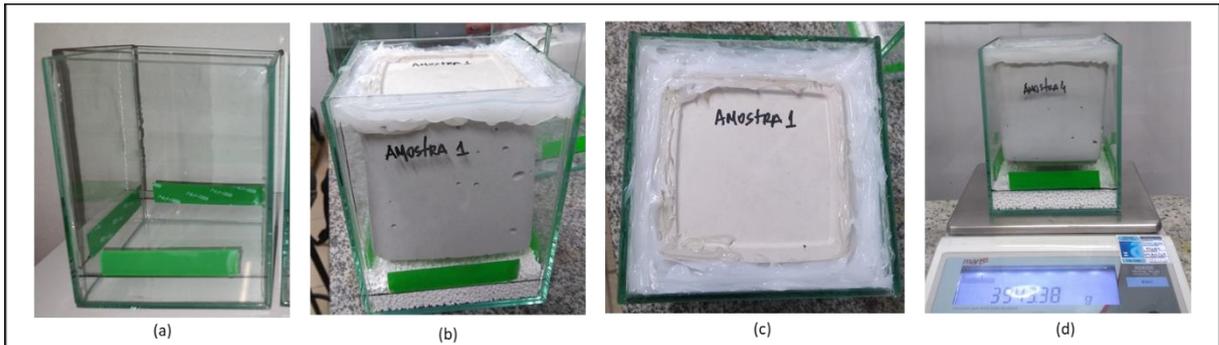
A preparação das amostras para o ensaio é detalhada na Figura 12. Inicialmente, foram confeccionados recipientes de vidro específicos para o tamanho das amostras de concreto (Figura 12a), com o propósito de manter a espessura original da amostra, representativa de uma parede de concreto.

Para assegurar a distância de 2 cm entre a amostra e o cloreto de cálcio ($CaCl_2$), utilizado como dessecante, foi aplicada uma fita dupla face verde, visível nas imagens. Desta forma, a amostra de concreto foi posicionada sobre as fitas para evitar o contato direto com o sal (Figura 12a).

Dentro dos recipientes, foi colocada uma camada de 2 cm de cloreto de cálcio ($CaCl_2$) granulado, seguida por uma camada de ar de 2 cm (Figura 12b), e então a amostra de concreto. As laterais da amostra foram vedadas ao recipiente para permitir apenas a passagem de vapor pelas faces do concreto (Figura 12c).

O ensaio foi conduzido em conformidade com a norma ISO 12572 (2016), utilizando 3 amostras. Por fim, as amostras preparadas foram pesadas antes de iniciar o ensaio (Figura 12d).

Figura 12: Preparo das amostras de concreto. (a) recipiente de vidro com fita dupla face para garantir a distância de 2 cm entre o sal e a amostra; (b) amostra com cloreto de sódio; camada de ar e amostra; (c) paragem das amostras

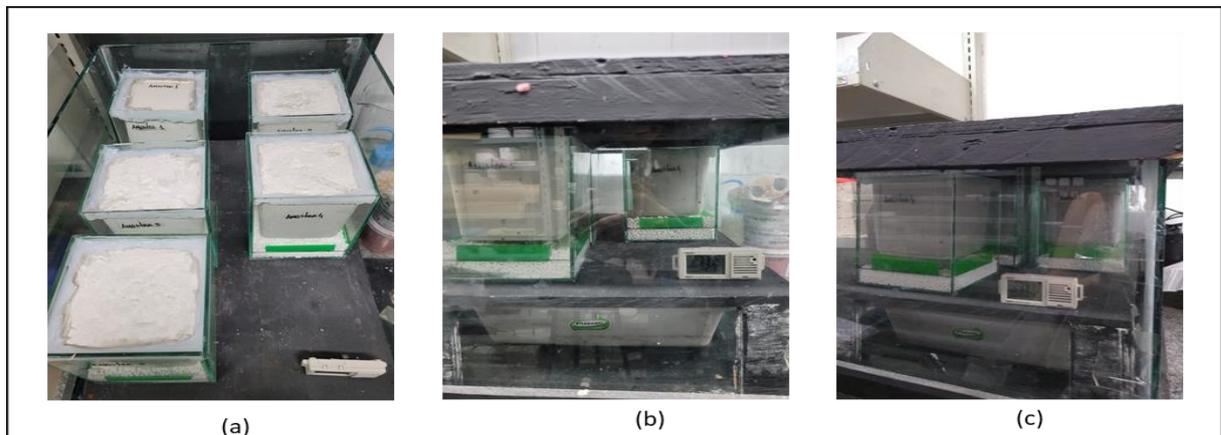


Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 13 ilustra o ensaio realizado na amostra de concreto, seguindo os mesmos critérios estabelecidos para o ensaio na amostra do tijolo cerâmico de vedação, conforme especificado pela norma. Após a preparação, as seis amostras foram colocadas em uma câmara climatizada com solução saturada de nitrato de magnésio $(NO_3)_2$ (Figura 13a), ajustando a umidade relativa para 85%, conforme a média da cidade de Pelotas-RS. O controle e registro da umidade foram realizados por meio de um dispositivo do tipo *dataloger* (Figura 13b e 13c).

As amostras foram pesadas diariamente no mesmo horário até que fosse observada a estabilização na mudança de massa.

Figura 13: Ensaio da resistência ao vapor de água do concreto, (a) amostras prontas dentro da câmara; (b e c) amostras dentro da câmara com a tampa fechada e UR e temperatura controlada pelo *dataloger*



Fonte: elaborada pelo autor.

Após a conclusão do ensaio, os cálculos e expressões de resultados foram aplicados para determinar o Fator de Resistência ao vapor de água [μ].

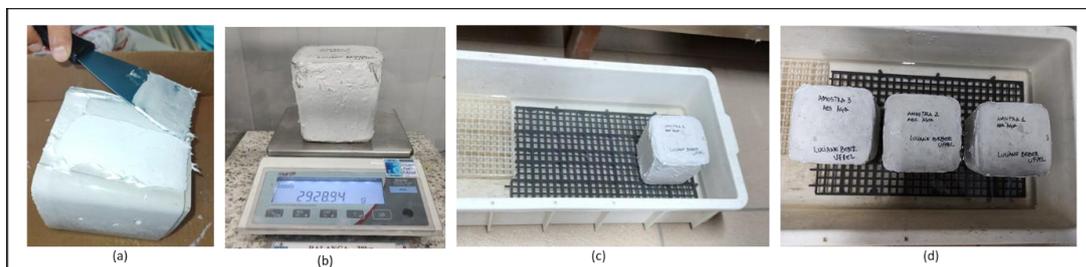
3.2.2.2 Variável higrotérmica: Absorção de água por capilaridade

A preparação para o ensaio dessa variável segue o mesmo procedimento adotado no experimento realizado com o tijolo cerâmico de vedação. No ensaio, as amostras foram submetidas a um processo de imersão parcial em água, sem variação de temperatura, com o objetivo de determinar o coeficiente de absorção de água líquida em um curto período. Esse método permite obter informações precisas sobre a capacidade de absorção de água das amostras, contribuindo para a avaliação das propriedades relacionadas à durabilidade e desempenho do material.

Na Figura 14, é demonstrada a preparação das amostras e o equipamento utilizado para conduzir o ensaio dos corpos de prova. Inicialmente, as faces das amostras foram seladas com silicone (Figura 14a), seguido pela etapa de pesagem individual das amostras (Figura 14b). Posteriormente, cada amostra foi colocada na grelha, uma por vez, com um intervalo de 3 minutos entre cada inserção, garantindo a uniformidade no processo. A grelha continha uma lâmina de água de 5 mm de espessura, controlada por uma régua metálica (Figura 14c).

Conforme especificado pela norma em relação ao número de corpos de prova, foram testados neste caso três exemplares (Figura 14d). Cada amostra foi cuidadosamente vedada lateralmente com um selante resistente à água, deixando a parte superior livre, enquanto a face inferior permaneceu em contato com a água. Além disso, as amostras foram devidamente pesadas e condicionadas de acordo com as diretrizes estabelecidas na norma, assegurando a execução adequada do ensaio.

Figura 14: Ensaio de absorção de água por capilaridade do concreto. (a) amostras sendo seladas;(b) pesagem das amostras;(c) início da colocação das amostras na grelha;(d) teste realizados com três amostras



Fonte: elaborada pelo autor.

Os corpos de prova de concreto, foram submetidos a etapas de imersão, remoção e secagem da superfície apenas retirando o excesso de água com uma esponja. Foram realizadas as pesagens em intervalos de tempo específicos: 20 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas e 8 horas, além de medições adicionais após 24 e 48 horas, a fim de obter uma série de massas correspondentes a diferentes períodos.

3.2.2.3 Variável higrotérmica: Isotermas de Adsorção e Dessorção

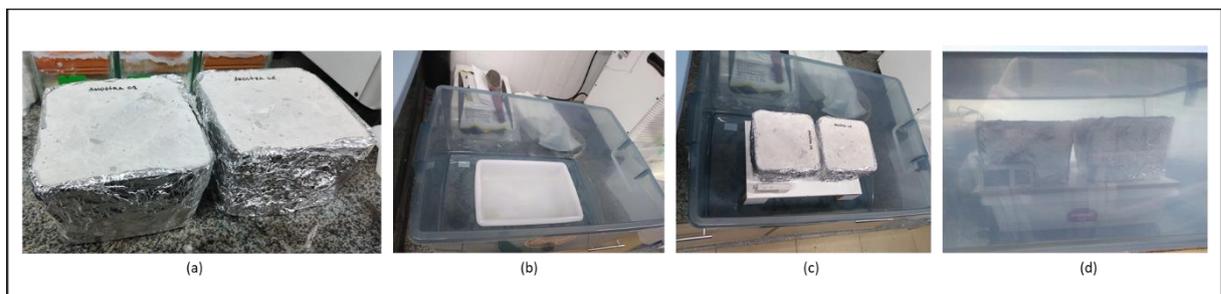
O ensaio das Isotermas foi conduzido de acordo com a norma BS ISO 24353 (2008), que trata do desempenho higrotérmico de materiais e produtos de construção, especificamente na determinação das propriedades de adsorção/dessorção de umidade em resposta a variações na umidade.

Para a preparação do ensaio, foi idêntica à do tijolo cerâmico de vedação, duas amostras foram selecionadas conforme as indicações da norma, preservando a espessura original do produto.

Na Figura 15a, pode-se observar os CPs selados com papel alumínio, juntamente com a bandeja contendo água e cloreto de sódio (NaCl), utilizado para alcançar uma umidade relativa de 75% dentro da caixa selada (Figura 15b e 15c).

O ensaio teve início quando as amostras foram colocadas dentro de uma caixa com tampa, cuja umidade relativa foi controlada por um *dataloger* que registra temperatura e umidade relativa (Figura 15d). As amostras permaneceram dentro da caixa fechada, em uma câmara adaptada, com umidade relativa de $60\% \pm 5\%$ e temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas. Essa etapa é crucial para estabilizar as condições iniciais das amostras antes do início do ensaio principal.

Figura 15:Ensaio das Isotermas do concreto. (a) amostras seladas com papel alumínio; (b e c) bandeja com água e cloreto de sódio; (d) caixa adaptada com UR e temperatura controlada pelo *dataloger*.



Fonte: elaborada pelo autor.

Conforme descrito na seção 3.2.1.3, após esse período, a caixa foi transferida para outra câmara com umidade relativa de $50\% \pm 5\%$ e mesma temperatura, porém com a tampa aberta. Nessa segunda câmara, a caixa também permaneceu por 24 horas. Esse ciclo de 24 horas em cada câmara foi repetido por um total de 4 vezes, conforme estabelecido pela norma no teste cíclico.

Ao término dos 4 ciclos de 24 horas, foram obtidos os valores do "Teor de umidade de adsorção" e do "Teor de umidade de dessorção", assim como suas diferenças, através das equações pertinentes. Estes valores foram então inseridos no programa *WUFI Pro 6.7*, na curva higroscópica do material, dentro das propriedades higrótérmicas.

3.2.3 Cálculos numéricos

Após término de todos os ensaios os valores obtidos foram usados para os cálculos numéricos de cada expressão conforme a norma. Cada variável higrotérmica tem seu procedimento de cálculo e equações.

3.2.3.1 Cálculo e equações da resistência ao vapor de água [μ .]

Para cada conjunto de sucessivas pesagens da amostra, calcular taxa de mudança de massa (Equação 1).

$$\Delta m_{12} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

Δm_{12} é a variação de massa por tempo para uma única determinação, em Kg/s;

m_1 : é a massa do conjunto no tempo t_1 em Kg.

m_2 : é massa do conjunto no tempo t_2 em kg.

t_1 e t_2 : são os sucessivos tempos de pesagem em seg.

O resultado é o “G” média de cinco sucessivas determinações de Δm_{12} .

Logo calculou-se a permeância a Vapor de água (W) conforme apresentado na equação 2.

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

W = permeância ao vapor de água (g/m·Pa·s)

G = média de cinco sucessivas determinações de Δm_{12} para cada corpo de prova

A = área exposta m^2

Δp = médias das medidas de temperatura e umidade relativa do ar durante o ensaio. (Tabela: valores para cada condição de ensaio).

Onde: Δp deve ser calculado a partir das médias das medidas de temperatura e umidade relativa do ar durante o ensaio, Tabela I.

Tabela I: Condições do ensaio.

Δp – valores para cada condição de ensaio		
Itens	Condição °C - % RH	Δp Pa
A	23 - 0/50	1404
B	23 – 0/85	2387
C	23 – 50 / 93	1207
D	38 – 0/93	6157
E	23 – 50 /100	1404

Fonte: ISO 12572 (2016), adaptado pelo Autor.

Posteriormente calcula-se através da equação 3 a permeabilidade ao vapor

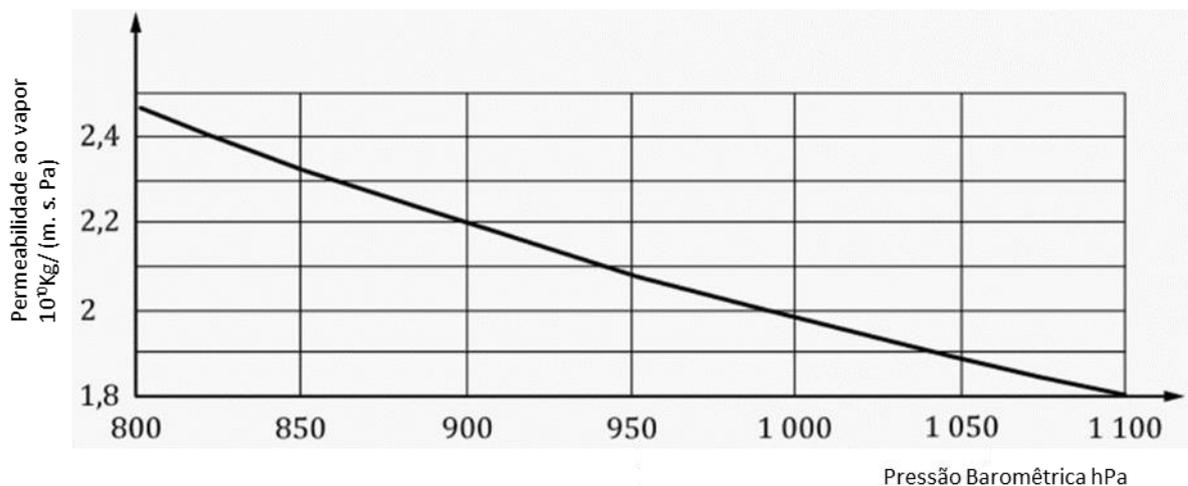
δ . E por fim o Fator de Resistência ao Vapor de água μ , equação 4.

$$\delta = W \times d \quad \text{Eq. 3}$$

$$\mu = \frac{\delta_{ar}}{\delta} \quad \text{Eq. 4}$$

A equação 4, é conhecida como equação de Schirmer, usada para calcular δ_a , (permeabilidade do ar) usando a média da pressão barométrica, durante o ensaio. Figura 16.

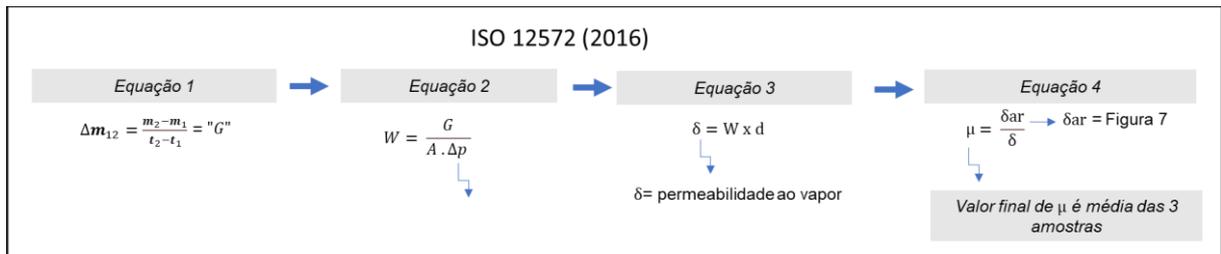
Figura 16: Temperatura do vapor de água em função da pressão barométrica hPa



Fonte: ISO 12572 (2016).

Na figura 17, ilustra-se o fluxograma dos cálculos realizados para obter o valor final de μ .

Figura 17: Fluxograma das equações e sequências dos cálculos numéricos para variável higrotérmica: resistência ao vapor de água



Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.3.2 Cálculo e equações da absorção de água por capilaridade

Após as pesagens das amostras realizou-se o cálculo da área da base do corpo de prova em m², e calculou-se a diferença entre a massa em cada pesagem e a massa inicial por área, através da equação 5.

$$\Delta m_t = (m_t - m_i) / A \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

Δm_t = variação de massa numa reta de tempo

m_t = massa de cada pesagem

m_i = massa inicial

A = área da amostra

O cálculo do Δm_t representa a variação de massa (Δ) para cada amostra ao longo do tempo durante o ensaio. Para cada amostra, o valor de μ é calculado pela equação 5.

Essa equação fornece o delta específico de cada amostra em um determinado momento, indicando a mudança na massa em relação ao valor inicial. Com o resultado de Δm_t , plotou-se um gráfico com a raiz quadrada dos tempos de pesagem, \sqrt{t} . O resultado desse gráfico foi do tipo "A" com água na superfície, conforme especificado em norma.

Assim o coeficiente de absorção de água A_w é calculado pela equação 6.

$$A_w = \frac{\Delta m_{tf} - \Delta m_0}{\sqrt{tf}} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde:

A_w = coeficiente de absorção de água - resultado considerado tf em horas

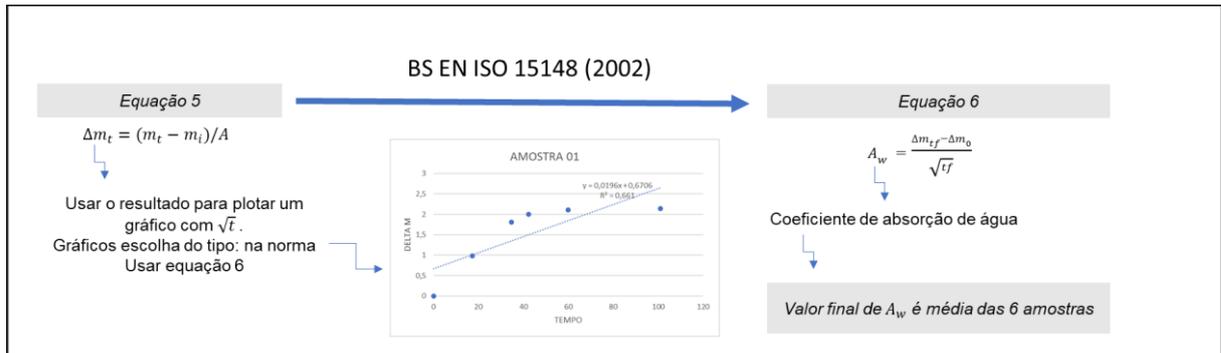
Δm_{tf} = valor da massa final numa reta de tempo

Δm_0 = valor de massa inicial no tempo zero

\sqrt{tf} = raiz quadrada do tempo de duração do ensaio.

Na figura 18, ilustra-se o fluxograma dos cálculos realizados para obter o valor final da absorção de água por capilaridade.

Figura 18: Fluxograma das fórmulas dos cálculos numéricos para a variável higrotérmica: absorção de água por capilaridade



Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.3.3 Cálculo e equações das Isotermas de Adsorção e Dessorção

Para o resultado numérico, o valor cíclico do Teor de adsorção de umidade foi calculado com a seguinte expressão:

$$Pa_{,ac} = \frac{m_{a4} - m_{d3}}{A} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

$Pa_{,ac}$ = valor cíclico do teor de adsorção de umidade

m_{a4} = massa do quarto período de adsorção

m_{d3} = massa do terceiro período de dessorção

A = área da amostra

Para o resultado numérico, o valor cíclico do Teor de dessorção de umidade será calculado com a equação 8.

$$Pa_{,dc} = \frac{m_{a4} - m_{d4}}{A} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

$Pa_{,dc}$ = valor cíclico do teor de dessorção de umidade

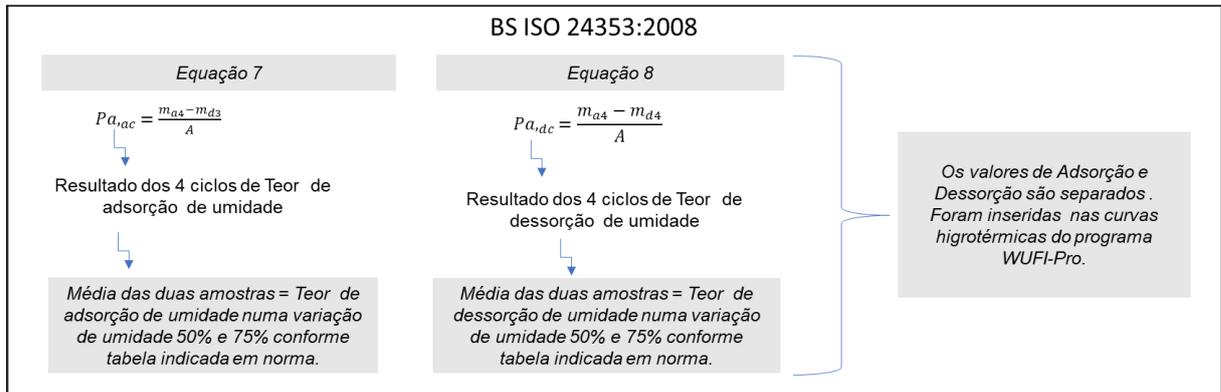
m_{a4} = massa do quarto período de adsorção

m_{d4} = massa do quarto período de dessorção

A = área da amostra

Na figura 19, ilustra-se o fluxograma dos cálculos realizados para obter o valor final das Isotermas de Adsorção e Dessorção.

Figura 19: Fluxograma das equações e sequência dos cálculos numéricos para variável higrotérmica: Isotermas de adsorção e dessorção



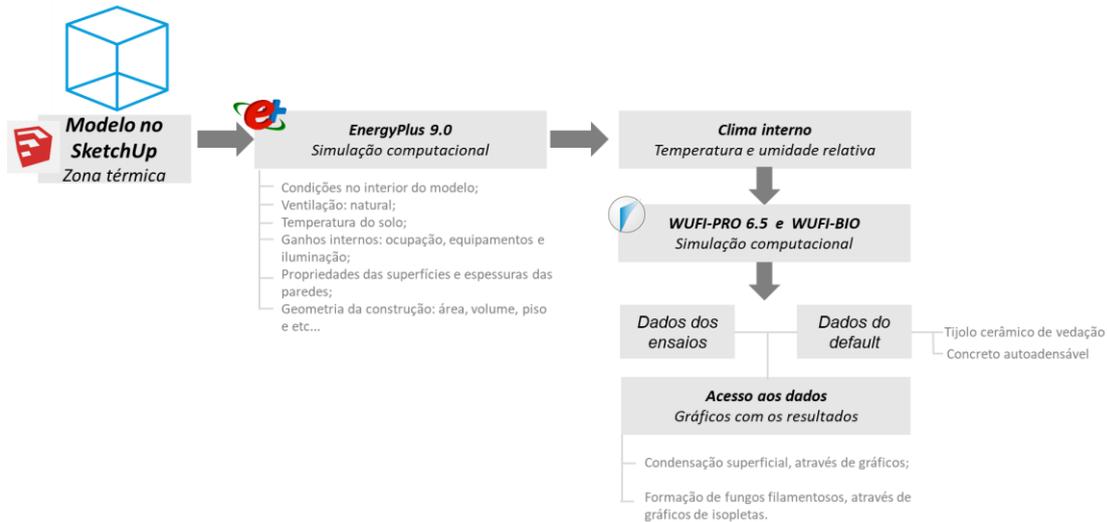
Fonte: elaborado pelo autor.

3.3 Terceira Etapa: Simulações

Desde o início do século passado, o interesse pelo estudo da umidade e suas consequentes manifestações patológicas têm sido crescentes. No entanto, apenas nas últimas décadas houve uma abordagem mais sistemática desse tema. Esse avanço foi impulsionado pelo surgimento e aprimoramento de modelos higrotérmicos, os quais são amplamente empregados para simular a transferência de umidade e calor em diversos cenários construtivos. Esses modelos possibilitam análises específicas de componentes individuais ou de zonas do edifício, bem como análises abrangentes de várias zonas simultaneamente. (ROCHA, MENDES, OLIVEIRA, 2018).

Na figura 20, pode-se observar o fluxograma do processo de simulação nos dois programas *EnergyPlus 9.0* e *WUFI-Pro 6.7*.

Figura 20: Fluxograma da sequência do processo da simulação nos programas *EnergyPlus 9.0* e *WUFI-Pro 6.7*



Fonte: elaborado pelo autor.

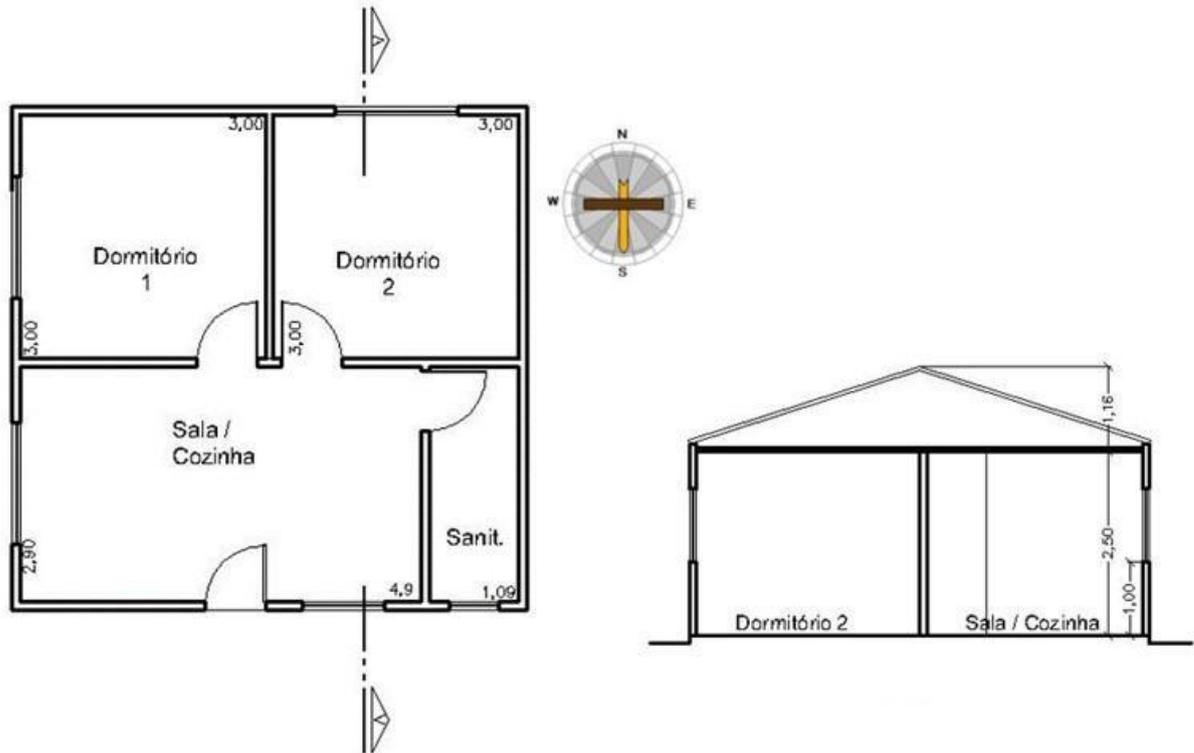
Na etapa inicial das simulações com o Energy Plus, foi adotada uma abordagem que se baseou na ventilação natural dos ambientes, empregando duas ferramentas diferentes: o *EnergyPlus 9.0* e o *WUFI Pro 6.7*. O objetivo da primeira simulação, realizada com o *EnergyPlus 9.0*, foi adquirir informações referentes à temperatura e umidade relativa interna da zona térmica 2, escolhida para este estudo de caso. Essas informações foram registradas em intervalos de horários, criando um arquivo de clima interno. Este arquivo foi posteriormente utilizado na simulação higrotérmica executada por meio do *WUFI Pro 6.7*, que utiliza dados ambientais internos e externos. Os resultados obtidos por esses programas de simulação são diretamente aplicáveis à análise proposta neste trabalho.

3.3.1 *EnergyPlus 9.0* – Simulação do ambiente interno

Foi utilizado o programa *EnergyPlus 9* para modelar a edificação, empregando o plugin *Euclid 9.3* no programa *SketchUp Make 2017*. Para garantir uma simulação precisa, foram definidas cinco zonas térmicas distintas na planta baixa do modelo, incluindo uma sala de estar conjugada com cozinha, dois dormitórios, um banheiro e o telhado. A cidade de Pelotas, localizada na Zona Bioclimática 2, foi alocada como a cidade de referência no arquivo climático TRY, desenvolvido por Leitzke *et al.* (2018).

O início da simulação foi ajustado para incluir variações de orientação solar, com foco na orientação solar sul, conforme apresentado na Figura 21, a planta do modelo utilizado na simulação.

Figura 21: Planta baixa do modelo da simulação

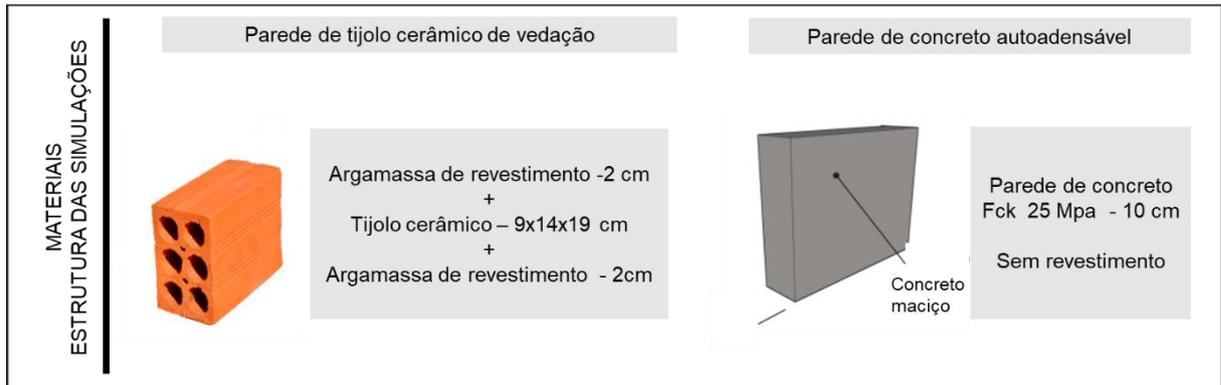


Fonte: Adaptado de CDHU (1997).

Essa tipologia abrange um edifício residencial simples, correspondente ao modelo de casa térrea da Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano de São Paulo (CDHU, 1997), que é utilizado como projeto de referência na Diretriz SiNAT N°001 (2017). Com uma área construída útil de 36,15m² e dimensões de 6,0m x 5,9m, o edifício apresenta uma configuração que inclui sala e cozinha integradas, 2 quartos e um banheiro.

A Figura 22 ilustra a estrutura da utilização dos materiais na simulação, sendo cada um deles representado de forma distinta.

Figura 22: Infográfico dos materiais para as simulações.



Fonte: elaborada pelo autor.

As propriedades térmicas dos materiais utilizados nas paredes foram configuradas de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005), assim como a cobertura, o piso e as esquadrias que serão idênticos nas duas opções de paredes simuladas, seguindo também as diretrizes da NBR 15575 (ABNT, 2021).

Foram considerados para o modelo uma agenda de ocupação, iluminação e equipamentos conforme a 1ª versão do projeto de norma ABNT Simulação Computacional do Comportamento Higrotérmico de Paredes - Procedimento, do Grupo de Trabalho (GT) sobre Umidade da Comissão de Eficiência Energética da ABNT, como também alguns parâmetros da Diretriz SiNAT N°001 (SiNAT, 2017).

Na tabela II são apresentados os dados de entrada do modelo para a simulação no *EnergyPlus 9.0*, levando em consideração as normativas da NBR 15575 (2021) Rascunho Inicial do Projeto de Norma ABNT de Simulação de Transporte de Umidade (2023).

Tabela II: Dados de entrada e parâmetros de simulação do *EnergyPlus 9.0*

Aspecto	Configuração
Ocupação dos ambientes	- Dois ocupantes por dormitório; - Quatro ocupantes na sala e cozinha integradas; - Horários específicos de ocupação para cada cômodo; - Valores válidos para todos os dias do ano.
Uso da iluminação e equipamentos	- Ativado apenas quando o ambiente estiver ocupado; - Horários determinados de acordo com a ocupação dos ambientes.
Taxa metabólica	- Variável conforme as atividades realizadas em cada ambiente.
Fontes adicionais de umidade	- Consideração do vapor de água gerado por equipamentos de aquecimento de água, painéis e chuveiro elétrico.
Temperatura do solo	- Utilização do programa Slab vinculado ao EnergyPlus para calcular a temperatura média do solo durante todos os meses do ano.
Ventilação natural	- Estabelecida através do recurso AirFlowNetwork; - Simulação de fluxos de ar em diferentes zonas; - Consideração dos coeficientes de pressão do vento, geometria da edificação e das aberturas, controle de abertura de portas e janelas.
Configuração específica de abertura de janelas	- Todas as janelas configuradas com abertura de 50% do vão durante os períodos de ocupação; - Portas permanecem abertas, exceto a do banheiro e a de acesso à habitação; - Janela do banheiro permanece sempre aberta, mesmo durante períodos desocupados, com setpoint de 19°C para ventilação natural, conforme NBR 15575 (2021).

Fonte: elaborada pelo autor.

A configuração da temperatura do solo se faz relevante pois considera as temperaturas internas e externas referentes ao clima escolhido, tipologia da edificação, cálculos das propriedades dos materiais e outras configurações do modelo (DOE, 2018; INMETRO, 2012).

E por último, as configurações dos dados de saída são os seguintes: temperatura interna e umidade relativa do ar, utilizando o programa *EnergyPlus 9.0*.

Com base nos dados de entrada e na configuração dos dados de saída, foi criado um arquivo representando as condições climáticas internas da zona térmica específica do modelo de estudo. Esse arquivo foi utilizado posteriormente como entrada nas simulações higrotérmicas no programa *WUFI Pro 6.7*. Essas simulações foram conduzidas para realizar análises, considerando a condição de ventilação natural.

3.3.2 WUFI Pro 6.7, configurações

Para investigar o comportamento higrotérmico dos materiais, foi empregado o software *WUFI Pro 6.7*. As simulações foram conduzidas ao longo de um período de três anos, sendo os resultados do último ano considerados para análise, uma vez que é nesse ponto que os materiais atingem um equilíbrio de teor de umidade.

Os elementos construtivos foram configurados de acordo com as propriedades térmicas de cada material, fornecidas pelo *Wufi Pro*. Já as propriedades higrotérmicas foram determinadas a partir do banco de dados *default* do programa, bem como dos resultados dos ensaios realizados em laboratório. A Tabela III, apresenta os dados de entrada, incluindo as propriedades higrotérmicas obtidas nos ensaios, em conjunto com os dados disponíveis no próprio programa de simulação.

Tabela III: Propriedades térmicas e higrotérmicas utilizadas na simulação

Propriedade	Tijolo Cerâmico de Vedação (Ensaio)	Tijolo Cerâmico de Vedação (Default)	Concreto Autoadensável (Ensaio)	Concreto Autoadensável (Default)
Densidade Aparente (kg/m ³)	1138	1138	2220	2220
Porosidade (m ³ /m ³)	0.6	0.6	0.18	0.18
Calor Específico (J/kgK)	920	920	850	850
Condutividade Térmica (W/mK)	0.9	0.9	1.6	1.6
Espessura da Camada (m)	0.02	0.02	0.10	0.10
Fator de Resistência ao Vapor	ensaio	38.86	ensaio	248
Absorção de Água por Capilaridade	ensaio	0.11	ensaio	0.009
Teor de Umidade Referência (kg/m ³)	ensaio	18	ensaio	75
Teor de Umidade de Saturação (kg/m ³)	ensaio	190	ensaio	147

Fonte: elaborada pelo autor.

A chuva dirigida também será considerada. Segundo Zanoni *et al.* (2018) o modelo mais rigoroso de chuva é o da norma ASHRAE Standard 160 (ASHRAE, 2021) no qual apresenta maior volume de água projetada na parede.

A análise será feita apenas no último ano simulado com um intervalo de tempo de uma hora, igual ao do arquivo climático. As condições numerais de controle

consideram o transporte de umidade e calor simultaneamente para o aumento da precisão e adaptação das convergências.

E por fim, para a configuração da condição de contorno do clima exterior, foi utilizado o arquivo climático de Pelotas/RS, criado por Leitzke *et al.* (2018).

3.3.3 WUFI Bio, alerta de formação de fungos filamentosos

Locais críticos em residências ocupadas podem apresentar condições propícias para o desenvolvimento de mofo, dependendo das características predominantes de temperatura e umidade. Além das preocupações estéticas e de higiene, é importante ressaltar que as substâncias nocivas produzidas e liberadas pelo mofo podem representar um risco à saúde dos moradores. Para prevenir o crescimento de mofo, é crucial adotar uma estratégia que leve em consideração as condições de temperatura e umidade desses locais, comparando-as com os parâmetros ideais para o crescimento do mofo.

Os principais fatores que influenciam o desenvolvimento do mofo incluem a temperatura, a umidade relativa e a qualidade do substrato. Com o intuito de avaliar o risco de crescimento de mofo em condições ambientais variáveis, foi desenvolvido um método bio-higrotérmico. Esse método se baseia na comparação das condições ambientais medidas ou simuladas com os requisitos de crescimento dos fungos comumente encontrados em ambientes internos.

Através da simulação do teor de umidade dos esporos de mofo e sua comparação com o nível crítico de umidade necessário para a germinação, é possível estimar o potencial de propagação da infestação. Esse método de simulação simples oferece uma maneira eficaz de avaliar o risco de crescimento de mofo com base em dados climáticos medidos ou computacionais.

O objetivo do uso o *WUFI – Bio* é a análise da possibilidade de crescimentos de fungos nas superfícies internas da edificação, as quais estejam em contato com o ar interno. Para isso ocorrer é necessário inserir a classe de exposição do ocupante como “superfície interna ou posição em contato com o ar Interno”, assim se tem uma correta avaliação da face interna da parede que está em contato com o ar interno da

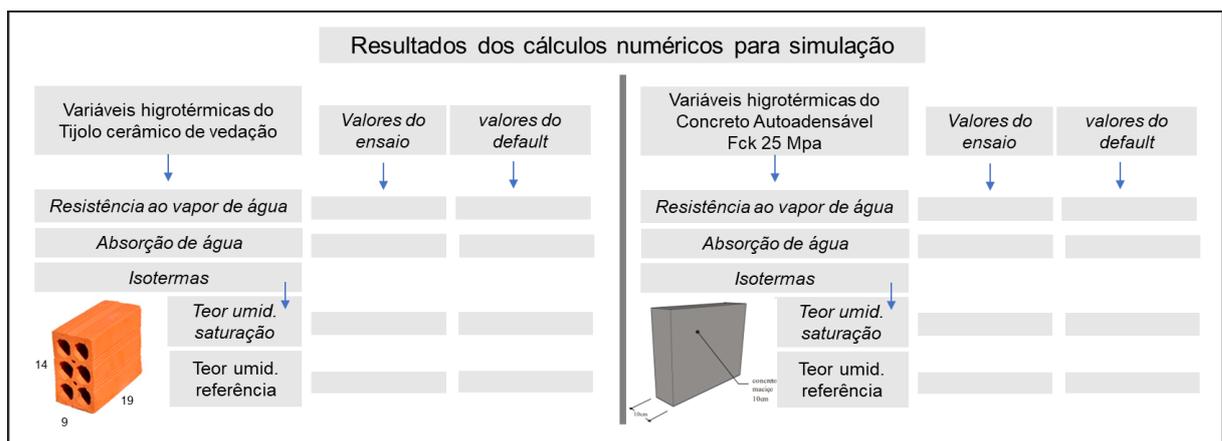
construção e com a presença do ser humano. Também é necessário nos dados de entrada a umidade inicial do esporo e o tipo de substrato para avaliar o crescimento dos fungos no interior da edificação.

Assim os resultados de saída podem ser considerados em relação a dois critérios: *Mould Growth* e *Mould Index*. Portanto, para estabelecer a relação entre a previsão de "crescimento de mofo" pelo modelo bio-higrotérmico e o "índice de mofo" previsto pelo modelo de VTT, foram realizadas simulações das temperaturas e umidades horárias na superfície interna utilizando o software WUFI para diversos cenários. Os dados climáticos locais resultantes foram então avaliados quanto ao risco de crescimento de mofo, utilizando tanto o modelo bio-higrotérmico quanto o modelo de Viitanen (VTT). (SCHMIDT, 2019).

3.4 Resultados, quarta etapa

Na quarta etapa do método, foram apresentados os resultados dos cálculos numéricos das equações das variáveis higrotérmicas, junto com os valores do default do programa de simulação conforme ilustra-se na figura 22.

Figura 22: Apresentação de fluxograma para resultados.



Fonte: elaborada pelo autor.

Os valores numéricos utilizados na simulação têm como objetivo avaliar as diferentes variações dos dados higrotérmicas obtidos a partir de vários testes, comparando-as com os valores padrão do programa. Além disso, procuramos identificar possíveis sinais do risco de ocorrência de condensação superficial,

analisando a umidade e temperatura nas interfaces entre camadas ao longo do tempo. Em relação à formação de fungos filamentosos, buscamos detectar seu aparecimento na superfície interna da parede dentro da estrutura da edificação por meio da interpretação dos gráficos de Isopletas.

4. Análise e discussão dos resultados

Os resultados deste estudo incluem a apresentação dos valores das variáveis higrotérmicas, bem como as simulações realizadas no software *WUFI Pro 6.7*. Essas simulações são ilustradas através de gráficos, destacando as diferenças entre os dados simulados e indicando áreas suscetíveis à condensação superficial e ao desenvolvimento de fungos filamentosos.

Na figura 23, são apresentados os resultados dos ensaios do tijolo cerâmico de vedação e do concreto autoadensável, para as variáveis higrotérmicas, tais como: resistência ao vapor de água, absorção de água por capilaridade e isoterms de adsorção e dessorção para determinação do “teor de umidade referência” e o “Teor de umidade de saturação”.

Figura 23: Resultados dos cálculos numéricos para simulação

Resultados dos cálculos numéricos para simulação					
Variáveis higrotérmicas do Tijolo cerâmico de vedação		Valores do ensaio	valores do default	Variáveis higrotérmicas do Concreto Autoadensável Fck 25 Mpa	
Resistência ao vapor de água		3,66	38,86	Resistência ao vapor de água	
Absorção de água		0,01915	0,11	Absorção de água	
Isoterms				Isoterms	
Teor umid. saturação		94,21	190	Teor umid. saturação	
Teor umid. referência		20,46	18	Teor umid. referência	

Fonte: elaborado pelo auto.

Na Tabela IV, são apresentados os resultados dos cálculos numéricos dos ensaios das propriedades higrotérmicas tanto do tijolo cerâmico de vedação quanto do concreto autoadensável Fck 25Mpa. Adicionalmente, são fornecidos os valores utilizados para as simulações computacionais, os quais foram obtidos a partir do banco de dados do programa *WUFI Pro 6.7*. Destaca-se em amarelo os dados experimentais, facilitando a identificação das diferenças de valores de referência utilizados no software.

Tabela IV:: Resultados dos dados das variáveis higrotérmicas e dados do default do programa *WUFI Pro 6.7*

Propriedade	Tijolo Cerâmico de Vedação (Ensaio)	Tijolo Cerâmico de Vedação (Default)	Concreto Autoadensável (Ensaio)	Concreto Autoadensável (Default)
Densidade Aparente (kg/m ³)	1138	1138	2220	2220
Porosidade (m ³ /m ³)	0.6	0.6	0.18	0.18
Calor Específico (J/kgK)	920	920	850	850
Condutividade Térmica (W/mK)	0.9	0.9	1.6	1.6
Espessura da Camada (m)	0.02	0.02	0.10	0.10
Fator de Resistência ao Vapor	3.66	38.86	6.25	248
Absorção de Água por Capilaridade	0.019	0.11	0.0000466	0.009
Teor de Umidade Referência (kg/m ³)	20.46	18	17.06	75
Teor de Umidade de Saturação (kg/m ³)	94.21	190	78.62	147

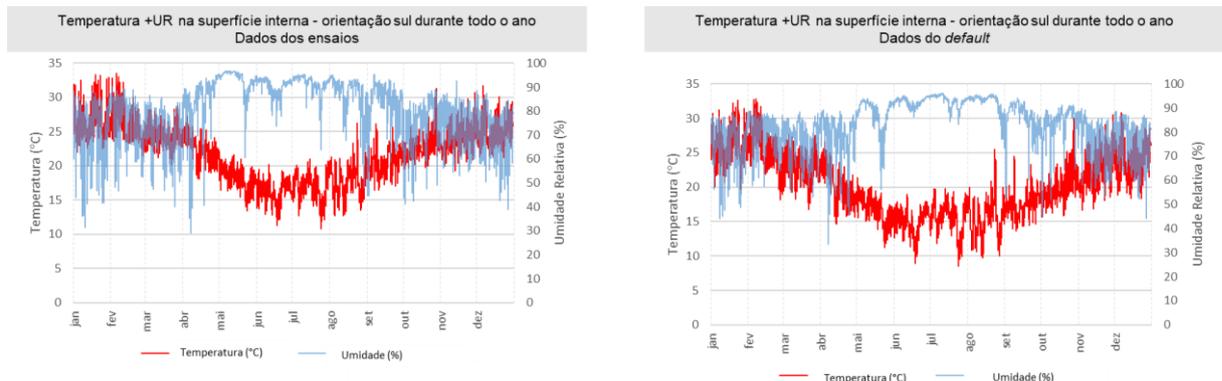
Fonte: elaborada pelo autor.

A seguir, como resultados das simulações serão apresentados gráficos que demonstram o risco de condensação superficial e risco de formação de fungos filamentosos, especialmente na orientação sul, que representa a situação mais crítica. Esses gráficos são resultados das simulações realizadas individualmente tanto para o tijolo cerâmico de vedação quanto para o concreto autoadensável Fck 25 Mpa.

4.1 Risco de condensação superficial – Tijolo cerâmico de vedação

Na Figura 24, é apresentada uma análise do risco de condensação superficial para ambos os cenários, considerando as simulações baseadas nas variáveis higrotérmicas obtidas nos ensaios e aquelas que utilizam os dados *default* do programa.

Figura 24: Gráfico do risco de condensação superficial na superfície interna, ao longo de um ano, na orientação Sul, nos dois cenários



Fonte: elaborada pelo autor.

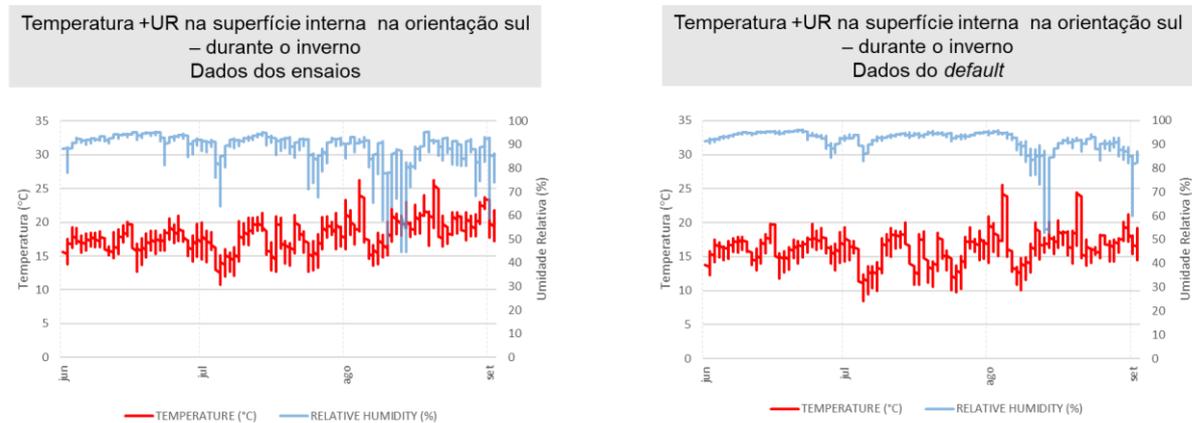
Os gráficos exemplificam as flutuações da temperatura na camada interna das paredes simuladas (representada em vermelho) e da umidade relativa (indicada em azul) ao longo de um ciclo de simulação de doze meses, levando em conta o material sob análise. Observa-se que a umidade relativa permaneceu consistentemente acima de 80% ao longo da maior parte do ano, sugerindo a possibilidade de condensação, conforme observado por Schmidt (2019).

Ao comparar os dois cenários, é evidente uma semelhança no padrão observado ao longo de toda a simulação. Ambas as simulações registram níveis de umidade relativa superiores a 90%, especialmente durante os meses de temperatura mais baixa: maio a setembro.

No entanto, de maneira geral, as paredes apresentam um risco significativo de condensação de vapor, com a formação de pontos críticos onde os valores de umidade relativa se aproximaram de 100% na superfície interna.

Na Figura 25, o gráfico da simulação utilizando os dados das variáveis higrótérmicas obtidos nos ensaios representam o risco de condensação superficial na superfície interna durante o período de inverno, especificamente na orientação Sul.

Figura 25: Gráfico do risco de condensação superficial interna, no período de inverno, na orientação Sul, nos dois cenários



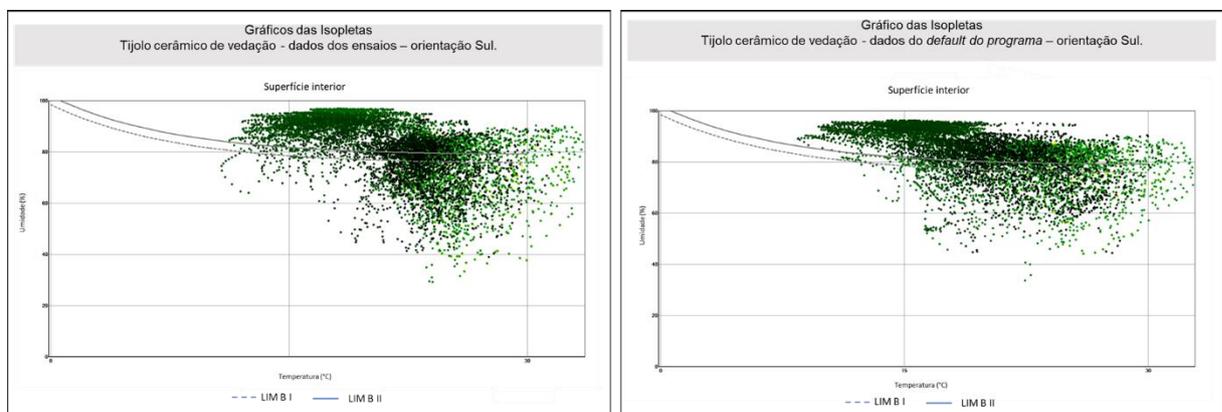
Fonte: elaborada pelo autor.

Evidencia-se que em ambos os casos, a umidade relativa mais problemática, com níveis elevados, persiste em grande parte do sistema, especialmente durante a estação de inverno, coincidindo com os meses de temperaturas mais baixas. Isso cria condições mais propícias para o desenvolvimento de fungos filamentosos.

4.2 Risco de formação de fungos filamentosos no tijolo cerâmico de vedação

A Figura 26, representa o risco de formação de fungos filamentosos para o cenário que utiliza as variáveis higrotérmicas dos ensaios e default do programa.

Figura 26: Gráfico das Isopletas - dados das variáveis higrotérmicas nos dois cenários



Fonte: elaborada pelo autor.

A nuvem de pontos representa as condições higrotérmicas nas superfícies externa e interna do componente construtivo em um determinado momento. As curvas limitantes (LIM B I e LIM B II) representam os limites aceitáveis para cada tipo de material de construção e a indicação de cor mostra o momento em que cada ponto ocorreu durante a simulação, sendo os amarelos correspondentes ao início do cálculo higrotérmico, seguidos pelos tons de verde e, por fim, pelos pontos de cor preta, que representam o final do cálculo (SCHMIDT, 2019).

Em ambos os casos, é evidente que ocorreu uma maior concentração da nuvem de pontos, predominantemente entre 80% e 100% de umidade relativa (UR), indicando condições propícias para o crescimento de fungos. Essa tendência é mais evidente nos estágios intermediários e finais do cálculo higrotérmico, quando os pontos estão localizados acima da curva de limite (LIM B II), com umidade relativa superior a 80% e temperatura interna acima de 20°C. Condições para formação de fungos filamentosos.

Os dois cenários foram analisados utilizando o modelo bio-higrotérmico (WUFI Bio 4.0), resultando em uma classificação de alerta vermelho, indicando uma avaliação inaceitável para o uso, conforme mostrado na Tabela V.

Tabela V: Avaliação do WUFI- Bio

Modelos	Mould Growth (mm/ano)	Mould Index (MI)	Avaliação WUFI Bio
Ensaio	399	4,565	Vermelho: Não aceitável
Default	424	4,775	Vermelho: Não aceitável

Fonte: elaborada pelo autor.

De acordo com Schmidt (2019), para ser considerada **inaceitável**, a superfície da camada mais interna do sistema em contato com o ar deve apresentar um crescimento de fungos (Mould Growth) superior a 176 mm/ano e um Índice de Crescimento de Fungos (Mould Index - MI) superior a 2, conforme especificado no manual do WUFI Pro 6.5.

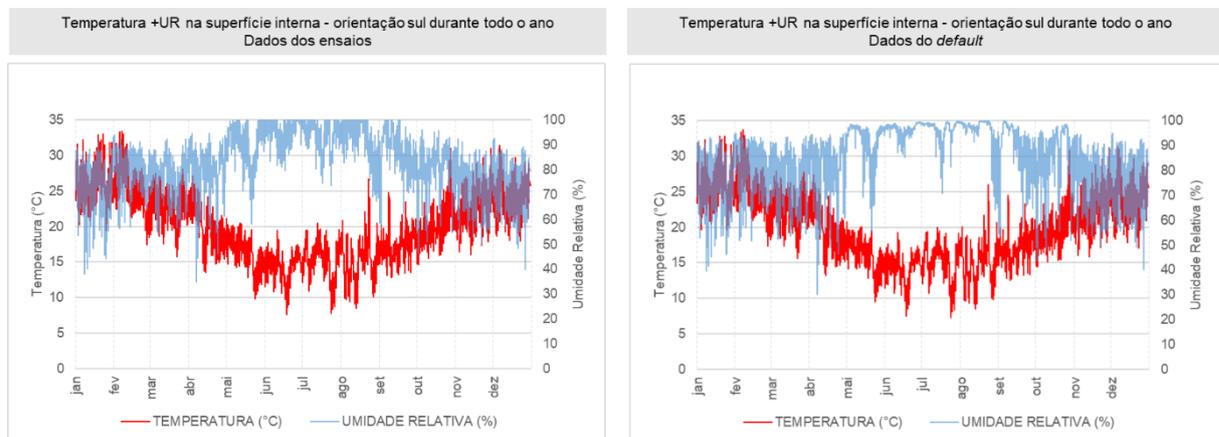
A análise pelo modelo bio-higrotérmico confirmou uma alta formação de fungos em ambos os sistemas avaliados, como já havia sido constatado anteriormente pelo método das isopletas (figura 26). Notavelmente, o uso de dados internacionais nesta análise resultou em um aumento na formação de fungos filamentosos.

Concluiu-se que para esse material, tijolo cerâmico de vedação, o default do programa superestimou em 5 % a formação de fungos filamentosos, como também o risco de condensação superficial e UR na superfície.

4.3 Risco de condensação superficial, concreto autoadensável de Fck 25 Mpa

Na Figura 27, é apresentada a análise do risco de condensação superficial para o cenário das simulações utilizando as variáveis higrotérmicas obtidas nos ensaios.

Figura 27: Gráfico do risco de condensação superficial, ao longo do ano, na orientação Sul em ambos os cenários



Fonte: elaborada pelo autor.

Na figura 27, no cenário onde os dados higrotérmicos dos ensaios foram utilizados, é notável uma maior incidência de condensação superficial, evidenciada pelo fato de a umidade relativa atingir 100%. Isso ocorre porque, quando a umidade relativa atinge 100%, ela está saturada e a condensação ocorre.

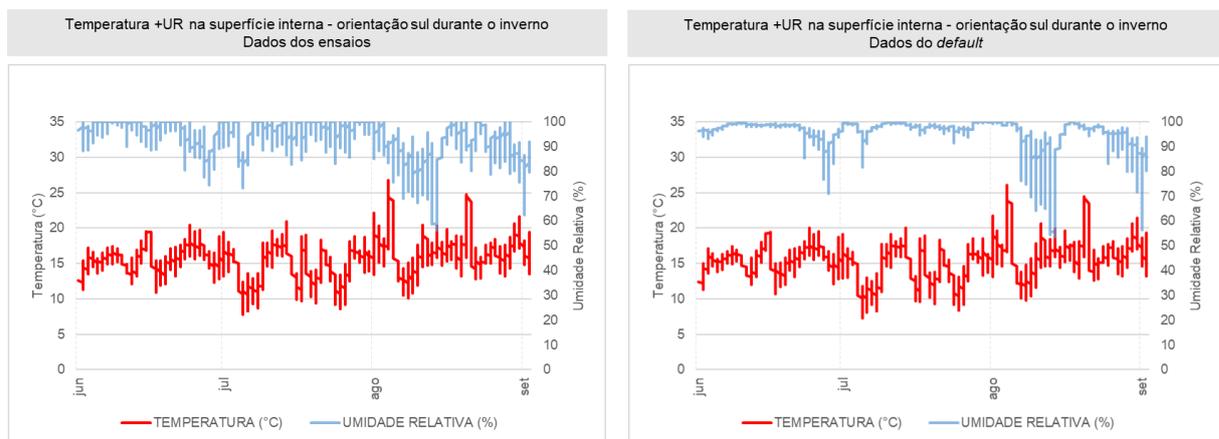
Entre os dois cenários, existem diferenças significativas, pois observamos que há muitos períodos em que a condensação superficial ocorre no cenário dos dados do ensaio em comparação com o cenário dos dados padrão do programa. Assim, a utilização dos dados padrão do programa tende a mascarar as situações de condensação superficial que podem ocorrer.

Observa-se que no cenário que foi utilizado os dados das variáveis higrotérmicas dos ensaios, temos diferenças consideráveis pelo fato de termos mais

períodos de condensação superficial, do que no cenário das variáveis higrótérmicas do default do programa.

Na Figura 28, o gráfico da simulação utilizando os dados das variáveis higrótérmicas obtidos nos ensaios representa o risco de condensação superficial na superfície interna durante o período de inverno, especificamente na orientação Sul.

Figura 28: Gráfico do risco de condensação superficial, no período de inverno, na orientação Sul em ambos os cenários



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 28 ilustra claramente que durante o inverno, os sinais de condensação superficial são mais pronunciados no cenário dos dados de ensaios, como evidenciado pela frequência maior de picos de 100% de umidade relativa (UR). Por outro lado, o uso dos dados padrão minimiza os períodos de condensação superficial, como observado no gráfico. Essa constatação destaca a importância da criação de um banco de dados nacional.

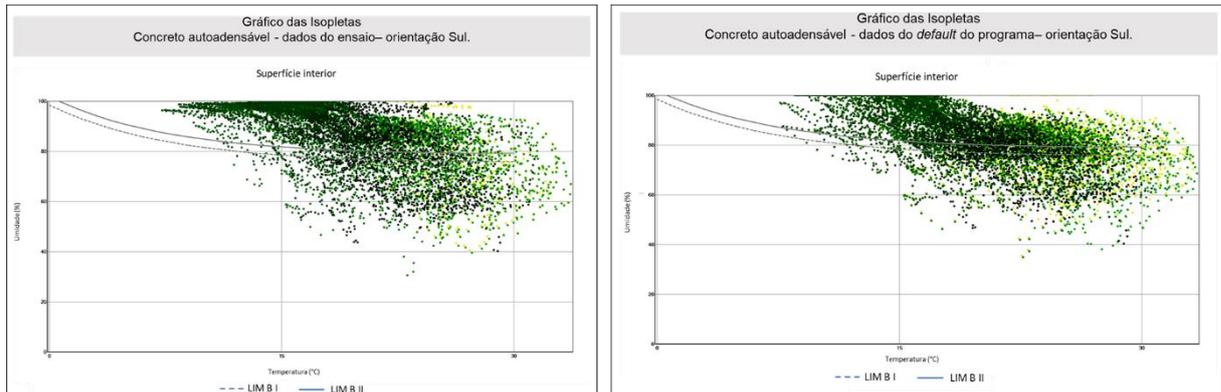
Embora seja observado que a temperatura da superfície no cenário com dados de ensaio seja ligeiramente mais alta do que os picos de temperatura nos cenários com configurações padrão do programa, a condensação superficial é mais prevalente durante os períodos frios nos cenários com dados locais.

Entretanto, é importante ressaltar que o gráfico da Figura 28 não proporciona uma compreensão completa do fenômeno físico, pois a maior temperatura na superfície está relacionada a níveis menores de UR. Isso sugere que pode haver um bloqueio pelo próprio material da parede, devido a um coeficiente de permeabilidade ao vapor menor, resultando em uma UR mais baixa na parede.

4.4 Risco de formação de fungos filamentosos - concreto autoadensável Fck 25 Mpa.

A Figura 29, representa o risco de formação de fungos filamentosos para ambos os cenários.

Figura 29: Gráfico das Isopletas – ambos cenários, Orientação Sul



Fonte: elaborada pelo autor.

Como colocado anteriormente no item 4.2 a nuvem de pontos representa as condições higrotérmicas nas superfícies externa e interna do componente construtivo em um determinado momento. As curvas limitantes (LIM B I e LIM B II) representam os limites aceitáveis para cada tipo de material de construção e a indicação de cor mostra o momento em que cada ponto ocorreu durante a simulação, sendo os amarelos correspondentes ao início do cálculo higrotérmico, seguidos pelos tons de verde e, por fim, pelos pontos de cor preta, que representam o final do cálculo (SCHMIDT, 2019).

Na figura 29 demonstra-se o que foi visto anteriormente nas figuras 27 e 28 no risco de condensação superficial. Embora as temperaturas sejam mais altas, o nível da UR foi alto, conseqüentemente tivemos maior condensação, isso aumenta o risco de formação de fungos filamentosos, repercutindo no gráfico das isopletas com uma concentração de pontos próximos a 100% UR e um pequena concentração de pontos no gráfico das isopletas com os dados do *default*.

Como no item 4.2 do tijolo cerâmico de vedação, o concreto autoadensável foi analisado os dois cenários utilizando o modelo bio-higrotérmico (*WUFI Bio 4.0*), que teve um resultado de alerta vermelho para ambos os casos, conforme mostrado na Tabela VI.

Tabela VI: Avaliação do WUFI- Bio

Modelos	Mould Growth (mm/ano)	Mould Index (MI)	Avaliação WUFI Bio
Ensaio	980	5,90	Vermelho: Não aceitável
Default	730	5,2	Vermelho: Não aceitável

Fonte: elaborada pelo autor.

De acordo com Schmidt (2019), a análise pelo modelo bio-higrotérmico confirma a alta formação de fungos em ambos os cenários, como mostra a figura do gráfico das Isopletas (figura 29).

Concluiu-se que para esse material, concreto autoadensável Fck 25Mpa, o default do programa subestimou em quase 20% a formação de fungos filamentosos, como também o risco de condensação superficial e UR na superfície.

5. Considerações finais

Ao analisar os resultados do risco de condensação superficial e a formação de fungos filamentosos do tijolo cerâmico de vedação, notou-se que não houve um impacto nas simulações onde foi utilizado os dados dos ensaios em relação aos dados do default do programa. Já o concreto autoadensável Fck 25Mpa, teve resultados mais expressivos. No caso do tijolo, para o crescimento de fungos filamentosos, houve uma diferença de 5% nos valores relacionados aos dados do default do programa. No caso do concreto, para a mesma variável, as diferenças foram em torno de 20% a mais considerando os dados oriundos dos ensaios.

Uma limitação importante que pode influenciar na simulação do tijolo cerâmico de vedação é a homogeneidade do material e a presença de ar na camada, o que pode afetar o transporte de umidade, pois os valores do default do programa superestimaram em 5 % o crescimento dos fungos filamentosos, assim como o risco de condensação superficial e UR na superfície interna, como foi verificado nas simulações computacionais.

Por outro lado, os números mais relevantes em relação à condensação superficial foram observados no concreto autoadensável, evidenciando uma grande diferença na aplicação dos dados dos ensaios em comparação com os dados padrão do programa. No concreto, a contrário do tijolo, o default do programa subestimou o risco de formação de fungos filamentosos em quase 20%, assim como o risco de condensação superficial e UR na superfície interna.

Como sugestão de futuros trabalhos destaca-se a melhor compreensão do fenômeno físico observando as diferenças quanto ao transporte de umidade, entre a configuração default e os dados ensaiados.

Além disso, é importante considerar que as diferenças entre as simulações, tanto para o tijolo quanto para o concreto, podem ser atribuídas ao levantamento dos dados térmicos do material, que não foram realizados nas condições específicas da ZB2.

Assim os resultados apresentados reforçam a importância de estudar o comportamento higrotérmico dos materiais em relação ao contexto das condições climáticas do Brasil. Isso inclui o desenvolvimento de ensaios e pesquisas sobre as propriedades higrotérmicas dos materiais, bem como a criação de um banco de dados

nacional. Essas ações são fundamentais para compreender o desempenho higrotérmico das construções brasileiras e prevenir problemas relacionados à umidade e patologias associadas. Essa análise permitirá uma melhor compreensão da confiabilidade dos dados simulados pelo *WUFI-Pro 6.7* e sua aplicabilidade prática na avaliação do desempenho higrotérmico de materiais em diferentes condições ambientais.

Por fim, os estudos relacionados aos aspectos de transporte de umidade e comportamento higrotérmico têm ganhado relevância significativa no cenário atual. Muitas dessas investigações se baseiam em simulações computacionais, desempenhando um papel fundamental ao fornecer informações cruciais para o aprimoramento das características higrotérmicas dos materiais de construção. Além disso, tais pesquisas servem de incentivo para outros pesquisadores realizarem ensaios em laboratório, visando à construção de um banco de dados nacional com materiais distintos adequados às diversas zonas bioclimáticas brasileiras. Essa iniciativa também visa estabelecer critérios mínimos de desempenho higrotérmico, contribuindo para o aprimoramento das técnicas construtivas e a busca por edificações mais eficientes.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

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**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 2018. Disponível em: https://sapiens.ipt.br/Teses/2018_HAB_Thiago_Afonso.pdf.

AKADIRI, P. O.; CHINYIO, E. A.; OLOMOLAIYE, P. O. Design of a Sustainable Building: a conceptual framework for implementing sustainability in the building sector. **Buildings**, v. 2, n. 4, p. 126-152, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/buildings2020126>.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE Standard 160: Criteria for moisture - control design analysis in buildings. Atlanta, 2016-. ISSN 1041-2336. Versão *online*. Disponível em: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/160_2009_e_201601209.pdf.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE Standard 160: Criteria for moisture - control design analysis in buildings. 2021-.

BRAGANÇA, L.; MATEUS, R.; KOUKKARI, H. Building Sustainability Assessment. **Sustainability**, v. 2, n. 7, p. 2010-2023. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su2072010>.

BRITO, A. C.; BELIZARIO-SILVA, F. Análise de sensibilidade do comportamento higrotérmico de paredes com diferentes tipos de concreto. In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 19., 2022, Canela. Anais. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-14. Versão *online*. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2038/1952>.

BS EN – European Committee for Standardization. **EN ISO 15148**: Thermal performance of buildings materials and products — Determination of water absorption coefficient by partial immersion. Bruxelas, 2002.

BS ISO – The British Standard Institution. **ISO 24353**: Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of moisture adsorption/desorption properties in response to humidity variation. Bruxelas, 2008.

BULIGON, L. B. **Comportamento higrotérmico e energético de painéis de vedação vertical externa em madeira para zona bioclimática 2**. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, RS, 2021. Versão online. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/23381>.

CABRERA, P.; SAMUELSON, H.; KURTH, M. Simulating Mold Risks under Future Climate Conditions. In: **INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION 2019: 16th CONFERENCE OF IBPSA**, Rome, Italy. 2019. Versão *online*. Disponível em: <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211130>.

CDHU – Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano. **Caderno de tipologias**. São Paulo, 1997.

CIB W040. Heat, air and moisture transfer terminology: Parameters and concepts. **Cib - W040**, p. 50, 2012.

DANTAS, A. L. DE F.; ZANONI, V. A. G. Simulação Computacional e Medições in loco: um Estudo do Desempenho Higrotérmico em um Edifício Alto em Brasília. **CBPAT - Congresso Brasileiro de Patologia das Construções**. p. 3143–3150, 2020. Versão *online*. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300420>.

DE CONTO, V; JUNIOR, R.B; RUPPENTHAL, J.E; SOUTO, A.E. Análise do conforto higrotérmico em um edifício vertical a partir da certificação AQUA-HQE. In ENCONTRO INTERNACIONAL DE GESTÃO, DESENVOLVIMENTO E INOVAÇÃO, 3 e 4, edição on-line, anais 2020. Versão *online*. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/EIGEDIN/article/view/10551>.

DOE – U. S. Department of Energy's. **Getting startedEnergyPlus™** Version 8.9.0 Documentation, 2018.

FREITAS, P., PINTO, P. **Permeabilidade ao vapor de água de materiais de construção - condensações internas**. Porto: Laboratório de Física das Construções. (1999).

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.1, p.1-21, 2015. Versão *online*. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1112430>.

GONZÁLEZ, F. JAVIER NEILA. Verificación de Condensaciones. Acondicionamiento Ambiental y Habitabilidad en Arquitectura. Madri, 2013.

GONZÁLEZ, F. D.; OLIVEIRA, D. L.; AMARANTE, M. S. Patologias na construção civil. **Pesquisa e Ação**, v. 6., n. 1, 2020. ISSN 2317-3793. Versão *online*. Disponível em: <https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/view/910/901>.

GUERRA, F. L.; CUNHA, E.; SILVA, A. C.; 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. Versão *online*. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000400002>.

GUERRA, F. L. **Biodeterioração de conjunto histórico do século XIX em Pelotas/RS: fungos filamentosos**. Universidade Federal de Pelotas, 2012.

HAGENTOFT, C.; BEDNAR, T. **Annex 55: risk management by probabilistic assessment. Development of guidelines for practice**. Gothenburg:RAP-RETRO, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, 2015.

HENRIQUES, F. **Humidade em paredes**. 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. Versão *online*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.009>.

HENSEN, J.; LAMBERTS, R. **Building Performance Simulation for Design and Operation** London: Spon Press, 2011.

HOLM, A.; KUENZEL, H. M.; SEDLBAUER, K. The hygrothermal behaviour of rooms: combining thermal building simulation and hygrothermal envelope calculation. **Eighth International IBPSA Conference**, n. February, p. 499–506, 2003. Versão *online*. Disponível em: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bs2003_0499_506.

IBGE, 2023. **PNAD Contínua - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/9171-pesquisa-nacional-por-amostra-de-domicilios-continua-mensal.html>>. Acesso: dia 26 de março de 2023.

INMETRO – Instituto Nacional de Meteorologia, Qualidade e Tecnologia. **RTQ-R: Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.** Rio de Janeiro, 2012.

NBR 15220-3: Zoneamento bioclimático, Rio de Janeiro, 2003.

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

NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho térmico de Edificações. Rio de Janeiro, 2021.

NBR 13281-1: Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaio de Edificações. Rio de Janeiro, 2021.

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

NOVO, I.M.P.A. **Propriedades Higrotérmicas de materiais – Construção de base de dados estocásticos para simulação numérica.** Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011. Versão *online*. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61445/1/000149536.pdf>.

ISO – International Standard. **ISO 12572:** Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of water vapour transmission properties — Cup method. Geneva, 2016.

KARAGIOZIS, A.; SALONVAARA, M. Hygrothermal system-performance of a whole building. **Building and Environment.** v. 36. 2001. Versão *online*. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00063-9](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00063-9).

KLEBER, H, D. **Análise do Desempenho de sistemas de vedação vertical externo com diferentes tipos de argamassa, através da simulação higrotérmica para a**

cidade de Porto Alegre. Escola de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2018. Versão *online*. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/234096>.

KIRIMTAT, A. *et al*/Review of Simulation Modeling For Shading Devices in Buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 23-49. 2016. Versão *online*. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.020>.

LABEEE – Laboratório De Eficiência Energética Em Edificações. PROJETEEE. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/componentes-construtivos/>. Acesso em abril de 2023.

LEITZKE, R. K.; BELTRAME, C.; FREITAS, J.; SEIXAS, J.; MACIEL, T.; CUNHA, E.; Rheingantz, P. 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. Versão *online*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17265/1934-7359/2018.10.006>.

MENDES, N. Modelos para Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações. p. 1–219, 1997.

MENDES, N; LAMBERTS, R; NETO, J, A, B, C; **Simulação de Construção no Brasil**.In Sétima Conferência Internacional IBPSA. Rio de Janeiro,2001.

MORISHITA, C.; BERGER, J.; CARNEIRO, A.; MENDES, N. Issues about moisture in residential buildings of Brazil. **CIB World Building Congress 2016**, n. September, 2016.

MORISHITA, C. **On the assessment of potential moisture risks in residential buildings across Brazil**. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2020. Versão *online*. Disponível em: <https://archivum.grupomarista.org.br/pergamumweb/vinculos/00009a/00009a35.pdf>.

NASCIMENTO, M. L. M. **Aplicação da simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios**. Universidade de Brasília, 2016. Versão *online*. Disponível em: <http://repositorio2.unb.br/jspui/handle/10482/22199>.

OMER, A. M. Energy and Environment: applications and sustainable development. **British Journal of Environment and Climate Change**, v. 1, n. 4, p.

118-158. 2011. Versão *online*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.9734/BJECC/2011/480>.

PINHEIRO, J. A. **Importância Do Clima Exterior E Interior Na Quantificação Do Desempenho Higrotérmico Dos Edifícios**. Universidade do Porto, 2013. Versão *online*. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10216/68976>.

PIRES, J. R. **Estimativa da condensação em edificações unifamiliares em território brasileiro: Simulação higrotérmica computacional**. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2020. Versão *online*. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/9454>.

Ramos, N.M.M., Delgado, J.M.P.Q., Barreira, E., Freitas, V.P., (2009). **Propriedades Higrotérmicas utilizadas em Simulação Numérica**. PATORREB 2009, Actas do 3º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Vol. I, 18 a 20 de março de 2009, pp. 429 e 430, FEUP, Porto.

RIBEIRO, P. J. T. **Análise comparativa de diferentes modelos de simulação numérica na avaliação da ocorrência de condensações internas**. Universidade Nova de Lisboa, 2013. Versão *online*. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/9924>.

SALOMÃO, Ana Claudia de Freitas. **Estudo da Estrutura das Argamassas de Revestimento e sua Influência nas Propriedades de Transporte de Água**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

SCHMIDT, T. **WUFI ® Pro 6 Manual**. Fraunhofer IBP, Fraunhofer Institute for Building Physics, 2019.

SEDLBAUER, K. **Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components**. Universität Stuttgart, 2001. Versão *online*. Disponível em: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/5b6ffb23-5c2c-47fd-8940-939ec9d3534f/content>.

SINAT, Sistema Nacional de Avaliações Técnicas. **Diretriz SiNAT n°001 – Revisão 03 – Diretriz para Avaliação Técnica de paredes estruturais de concreto moldadas no local**. Ministério das Cidades – Secretaria Nacional da Habitação. Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat – PBQP-H. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas – SINAT, 2017.

TUTIKIAN, B. F. et al. Viabilidade Técnica e Econômica do Concreto Autoadensável em Empresas de Pré-Moldado. **Concreto & Construções**, v. 34, n. 43, p. 30-35, jun./ago. 2006.

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. **SBTA - XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas**, 2017.

XIA,D; HONG,Z;HUANG,Y;ZOU,Y;LOU,S;ZHAN,Q;GUO,J;YANG,J;GUO,T. **Impacto da transferência acoplada de calor e umidade no conforto interno e na demanda energética de edifícios residenciais em regiões quentes e úmidas**. Escola de Engenharia mecânica, Universidade Tongji, Xangai, China,2023.

ZANONI, V. A. G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília**. Universidade de Brasília, 2015. Versão *online*. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.26512/2015.12.T.19579>.

ZANONI, V. A. G. DANTAS, A.; NUNES, L. S.; RIOS, R. B. Estudo higrotérmico na autoconstrução: simulação computacional e medições em campo. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 109–120, 2020. Versão *online*. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300420>.

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. Versão *online*. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/parc.v9i2.8650260>.

ZENG, L; CHEN, Y.Q; CAO, C; LV, L; GAO, J; LI, J; ZHANG, C. **Influência das propriedades hídricas dos materiais no desempenho higrotérmico de sistemas compostos de isolamento térmico interno**. Escola de Engenharia mecânica, Universidade Tongji, Xangai, China,2023.