

ESTANQUEIDADE DE ESQUADRIAS E QUALIDADE DO AMBIENTE INTERNO EM CLIMAS FRIOS E ÚMIDOS: AVALIAÇÃO HIGROTÉRMICA, SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E DIRETRIZES NORMATIVAS

MARTA BALTAR ALVES¹; EDUARDO GRALA DA CUNHA²

¹*Universidade Federal de Pelotas – martagb@gmail.com*

² *Universidade Federal de Pelotas – eduardogralacunha@yahoo.com.br*

1. INTRODUÇÃO

O desempenho higrotérmico das edificações em climas frios e úmidos do Sul do Brasil representa um desafio significativo para construção civil. A combinação de baixas temperaturas com elevada umidade relativa do ar favorece patologias como mofo, bolor e condensações superficiais e intersticiais, cuja análise requer ferramentas específicas de verificação (NEILA, 2013; PALLIN et al., 2017).

A estanqueidade das esquadrias, elemento essencial da envoltória, desempenha papel decisivo no controle de infiltrações de ar e água, impactando diretamente o conforto térmico, a durabilidade dos materiais e a saúde dos ocupantes (TOMBAREVIĆ et al., 2023).

Nesse contexto, as normas brasileiras NBR 10821-2:2023 (Esquadrias), NBR 15220-2:2022 (Desempenho térmico) e NBR 15575-4:2021 (Sistemas de vedações verticais) constituem marcos regulatórios fundamentais, ainda que apresentem lacunas quanto ao controle da umidade interna e à renovação do ar. Além disso, estudos recentes destacam o papel das simulações higrotérmicas com softwares como WUFI e EnergyPlus, que permitem avaliar riscos de condensação, infiltrações e estratégias de ventilação (PALLIN et al., 2017; OLAOYE et al., 2022). De acordo com o Oak Ridge National Laboratory, os algoritmos HAMT (Heat and Moisture Transfer) e EMPD (Effective Moisture Penetration Depth), incorporados no EnergyPlus, permitem avaliar de forma acoplada os fluxos de calor e umidade, ainda que com limitações quanto a infiltrações e precipitação. Já o WUFI apresenta maior robustez para prever condensações intersticiais e desempenho de materiais higroscópicos, sendo considerado referência internacional (PALLIN et al., 2017).

Pesquisas realizadas em edificações residenciais de Pelotas evidenciam que paredes de bloco cerâmico, mesmo em conformidade com a NBR 15575, podem apresentar desempenho insatisfatório frente ao risco de condensações, quando comparadas a sistemas em steel frame (BERNARDES et al., 2022). Outros estudos apontam que a ventilação natural pode contribuir para o conforto térmico, mas também pode potencializar perdas energéticas quando associada a esquadrias pouco estanques (DUARTE et al., 2021; PEREIRA, 2018).

Assim, o presente artigo, ainda em desenvolvimento, tem como objetivo avaliar a relação entre estanqueidade de esquadrias, conforto higrotérmico e desempenho normativo em climas frios e úmidos, propondo diretrizes técnicas e de projeto que conciliem eficiência energética, saúde dos ocupantes e durabilidade construtiva.

2. METODOLOGIA

A metodologia da pesquisa é composta por cinco etapas integradas, conforme figura a seguir:

Figura 1: Etapas da Pesquisa



(AUTORES, 2025)

A primeira etapa consiste em analisar o nível de estanqueidade de esquadrias, envolvendo a coleta e análise de dados de edificações localizadas em clima frio e úmido, com verificação documental em normas e relatórios, além do desenvolvimento e ensaio de protótipos em laboratório.

A segunda etapa corresponde às simulações computacionais, realizadas em softwares especializados como WUFI e EnergyPlus, com o objetivo de modelar o desempenho das esquadrias em diferentes condições climáticas, simulando a interação entre estanqueidade, transporte de umidade e qualidade do ar interno. A terceira etapa refere-se ao método de análise integrada, que busca desenvolver uma abordagem holística para correlacionar estanqueidade, conforto térmico e saúde dos ocupantes, considerando parâmetros de conforto, risco de crescimento de fungos, impactos de concentrações elevadas de CO₂ e estruturando uma metodologia robusta para avaliação conjunta do desempenho higrotérmico. A quarta etapa consiste na definição de limites de desempenho mínimo, estabelecendo critérios técnicos para orientar projetos e processos de normatização, assegurando a prevenção de patologias relacionadas à umidade e a proteção da saúde dos usuários. Finalmente, a quinta etapa consiste na elaboração de uma proposta normativa baseada nas evidências obtidas, sugerindo a inclusão de um item obrigatório na NBR 15575 para tratar da estanqueidade das esquadrias, com ênfase na eficiência energética e na qualidade do ar interno, reforçando a necessidade de aprimorar o desempenho das edificações em climas frios e úmidos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados aqui apresentados referem-se a achados preliminares da revisão bibliográfica e das análises normativas, os quais fundamentarão as próximas etapas do projeto. Estudos apontam risco elevado de condensações em paredes cerâmicas quando associadas a esquadrias com baixa estanqueidade, enquanto o uso de sistemas em steel frame tende a reduzir a formação de umidade intersticial (BERNARDES et al., 2022). Pesquisas também demonstram que materiais com

alta capacidade de adsorção e desorção de vapor podem estabilizar a umidade interna, contribuindo para maior conforto higrotérmico (ZHANG et al., 2021). A substituição de janelas antigas mostrou potencial de reduzir em até 90% a taxa de infiltração, resultando em ganhos energéticos significativos em climas frios (TOMBAREVIĆ et al., 2023). Quanto à ventilação natural, observou-se que, embora essencial para a renovação do ar, sua eficácia depende da interação com a estanqueidade das esquadrias: a permeabilidade excessiva compromete o balanço energético, ao passo que sistemas controlados favorecem condições de conforto e saúde (DUARTE et al., 2021; PEREIRA, 2018). Além disso, modelos internacionais sugerem que a integração entre estratégias de sombreamento, controle automatizado de aberturas e sistemas de geração fotovoltaica pode aproximar edificações do conceito NZEB (Nearly Zero Energy Buildings) (RABANI et al., 2021). Esses achados preliminares reforçam a importância de integrar estanqueidade, ventilação controlada e propriedades higrotérmicas dos materiais no processo de projeto em climas frios e úmidos, destacando a relevância de simulações computacionais e estudos de caso para validação prática.

4. CONCLUSÕES

Até o presente momento, o trabalho evidencia que a estanqueidade das esquadrias é um fator determinante para o desempenho higrotérmico em climas frios e úmidos. No entanto, trata-se de um projeto em andamento, sem conclusões definitivas. As próximas etapas incluirão a aplicação de simulações higrotérmicas e análises de desempenho comparativo em casos reais, o que permitirá formular recomendações mais consistentes.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 10821-2:2023.** Esquadrias para edificações – requisitos e classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ABNT. **NBR 15220-2:2022.** Desempenho térmico de edificações – componentes e elementos construtivos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ABNT. **NBR 15575-4:2021.** Edificações habitacionais – desempenho de sistemas de vedações verticais. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BERNARDES, L.C.; et al. Estudo comparativo de uma parede de bloco cerâmico atendendo a norma NBR 15575, ZB2, com uma parede de steel frame quanto ao desempenho higrotérmico. In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENTAC**, 19., Canela, 2022. *Anais...* Porto Alegre: ANTAC, 2022.

DUARTE, C.M.; et al. Análise do potencial de aproveitamento da ventilação natural e seus impactos nas condições de conforto térmico. In: **ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENCAC**, 15., Fortaleza, 2021. *Anais...* Porto Alegre: ANTAC, 2021.

MACARTHY, M.R.; et al. Análise comparativa do desempenho térmico em edifício histórico segundo dois algoritmos de condução térmica. In: **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO – ENTAC**, 19., Canela, 2022. *Anais...* Porto Alegre: ANTAC, 2022

NEILA, F.J. **Verificación de condensaciones**. Madrid: García-Maroto, 2013.

OLAÓYE, T.S.; DEWSBURY, M.; WALLIS, L.; KÜNZEL, H. Hygrothermal modelling of the differences between vapour diffusion properties of pliable membranes. **CivilEng**, Basel, v.3, p.687-716, 2022.

PALLIN, S.; BOUDREAUX, P.; SHRESTHA, S.; NEW, J.; ADAMS, M. **State-of-the-art for hygrothermal simulation tools**. Building Envelope & Urban Systems Research, Oak Ridge National Laboratory, 2017.

PEREIRA, F.P.F. **Avaliação do comportamento dos ocupantes no desempenho higrotérmico em edifícios residenciais**. 2018. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

RABANI, M.; et al. Achieving zero-energy building performance with thermal and visual comfort enhancement. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Amsterdam, v.44, p.1-12, 2021.

TOMBAREVIĆ, E.; VUŠANOVIĆ, I.; ŠEKULARAC, M. The impact of windows replacement on airtightness and energy consumption of a single apartment in a multi-family residential building in Montenegro: a case study. **Energies**, Basel, v.16, n.2208, p.1-18, 2023.

ZHANG, X.; et al. Recent progress on hygroscopic materials for indoor moisture buffering. **Journal of Physics: Conference Series**, Bristol, v.2069, p.012003, 2021.