

# Estudo higrotérmico na autoconstrução: simulação computacional e medições em campo

*Hygrothermal study in a self-built house: computer simulation and field monitoring*

Vanda Alice Garcia Zanoni 

André Luís de Faria Dantas 

Layane Soares Nunes 

Rafael Barbosa Rios 

## Resumo

**A**s moradias autoconstruídas com baixos recursos geralmente são precárias, principalmente quanto à habitabilidade. Apesar de essa realidade ser frequenteno Brasil, são escassos os dados medidos em campo sobre o desempenho higrotérmico dos sistemas construtivos adotados. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é analisar o comportamento higrotérmico da parede de alvenaria de vedação externa de uma moradia autoconstruída com bloco cerâmico revestido com argamassa em ambas as faces. A pesquisa envolveu medições em campo de umidade e temperatura e simulação computacional higrotérmica com o software Wufi Pro. No monitoramento foram obtidos dados por meio de sensores conectados a um microcontrolador Arduino Uno. Quando comparados os resultados, constatou-se que o sistema construtivo é suscetível às variações higrotérmicas superiores aos parâmetros referenciais normativos desejado para o ambiente interno. Os resultados quantificam o comportamento higrotérmico da parede externa, explicando a presença ostensiva de umidade e bolor na autoconstrução. As medições de campo, quando associadas à avaliação higrotérmica do sistema simulado, mostram que é possível experimentar soluções construtivas para embasar as decisões de planejamento e projeto no âmbito das ações de melhoria habitacional e assistência técnica.

**Palavras-chave:** Desempenho higrotérmico. Simulação computacional. Monitoramento. Autoconstrução.

## Abstract

*Low cost self-built dwellings are usually precarious, especially in terms of habitability. Despite the fact that this type of dwelling is frequently found in Brazil, there are few data measured in field monitoring on the hygrothermal behaviour of self-constructed building systems. Hence, the aim of this study is to analyse the hygrothermal behaviour of the external masonry wall of a self-built dwelling, constructed with clay bricks and covered with mortar on both faces. This investigation was based on a methodological approach involving hygrothermal computational simulation with the WUFI Pro software and humidity and temperature field measurements. The data collected during the monitoring were obtained through sensors connected to an Arduino Uno microcontroller, positioned inside and outside the dwelling. The result showed that the constructive system adopted in self-built dwellings is susceptible to hygrothermal variations higher than the normative parameters. The results quantify the hygrothermal behaviour of the self-construction building system, explaining the overt moisture and mold present. The methodology adopted for the measurements associated with the computational simulation shows that it is possible to experiment with constructive solutions based on the hygrothermal evaluation of the facade system, supporting planning and design decisions within the scope of housing improvement and technical assistance actions.*

<sup>1</sup>Vanda Alice Garcia Zanoni

<sup>1</sup>Universidade de Brasília  
Brasília-DF - Brasil

<sup>2</sup>André Luís de Faria Dantas

<sup>2</sup>Universidade de Brasília  
Brasília-DF - Brasil

<sup>3</sup>Layane Soares Nunes

<sup>3</sup>Universidade de Brasília  
Brasília-DF - Brasil

<sup>4</sup>Rafael Barbosa Rios

<sup>4</sup>Universidade de Brasília  
Brasília-DF - Brasil

Recebido em 04/12/19  
Aceito em 18/03/20

**Keywords:** *Hygrothermal performance. Computer simulation. Field monitoring. Self-constructed dwelling.*

## Introdução

A prática da autoconstrução faz parte da realidade brasileira. Segundo o Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil, uma pesquisa realizada com 2.419 pessoas em todo o país detectou que 54% da população economicamente ativa já construíram ou reformaram imóvel residencial ou comercial. Desse grupo, 85,4% fizeram o serviço por conta própria ou com pedreiros, mestres de obras, amigos e parentes. Apenas 14,6% contrataram arquitetos ou engenheiros (CONSELHO..., 2015).

A autoconstrução da casa própria, no contexto deste artigo, refere-se à habitação construída com baixos recursos, gerida pela família e sem atuação de profissionais arquitetos ou engenheiros responsáveis pelo projeto e execução (SÁ, 2009; LEITE; FARIA, 2017). Uma vez que a autoconstrução carece de suporte profissional especializado ou assistência técnica no âmbito da Lei nº 11.888 (BRASIL, 2008), a segurança e a qualidade construtivas podem ficar comprometidas (MINISTÉRIO..., 2010), resultando em habitações com muitas manifestações patológicas, principalmente presença de umidade, que gera insalubridade e bolor. Além disso, o não atendimento aos requisitos e critérios previstos no conjunto de normas brasileiras de desempenho (ABNT, 2013) pode afetar a qualidade do ambiente interior e a vida útil dos sistemas construtivos da edificação.

Patino e Siegel (2018) demonstraram que existem correlações estabelecidas entre residir em habitação social precária e o desenvolvimento ou exacerbação dos efeitos negativos para a saúde, em particular com alta prevalência de problemas respiratórios. Os autores destacam a importância de se manterem ambientes saudáveis para os usuários dessas habitações, considerando a crescente importância das moradias para a população de baixa renda presentes na maioria das áreas urbanas e o potencial de vulnerabilidade de seus habitantes devido à condição socioeconômica.

Os agentes climáticos afetam a durabilidade e o desempenho dos sistemas construtivos, conforme suas condições de exposição. As mudanças climáticas estão despertando a atenção dos pesquisadores quanto à possibilidade de agravamento das condições de habitabilidade das moradias informais e dos danos físicos e sociais consequentes (LOCHE; FONSECA; CARLO, 2018). Para Cabrera, Samuelson e Kurth (2019), aumentar a capacidade resistente dos envelopes das edificações a climas futuros exige uma análise mais abrangente das condições de umidade e temperatura dos materiais ao longo do tempo.

Os fenômenos de transporte de calor e umidade (massa) ocorrem simultaneamente e são altamente interdependentes. Os mecanismos de transporte de umidade em meios porosos são bastante complexos. Essa complexidade está relacionada à dificuldade em se definirem modelos que representem a estrutura de poros dos materiais e os mecanismos simultâneos de transporte de calor e massa. Trabalhos que abordam a natureza multidimensional desses fenômenos em elementos de edificações ainda são escassos (GOFFART; RABOUILLE; MENDES, 2015). Apesar do interesse crescente pelos problemas de umidade, somente com o avanço no desenvolvimento da modelagem higrotérmica, os estudos sobre o transporte simultâneo de calor e massa em edifícios tornaram-se sistemáticos (RAMOS *et al.*, 2009).

A simulação higrotérmica pode contribuir para a compreensão dos fenômenos de transporte de calor e massa e constituir-se como meio para embasar soluções confiáveis para os projetistas, gestores e usuários finais, justificando o crescente interesse pela avaliação integrada na otimização de decisões de projeto, retrofit e manutenção, incluindo eficiência energética, custos de ciclo de vida e durabilidade (HAGENTOFT; BEDNAR, 2015; AMERICAN..., 2016). Cabrera, Samuelson e Kurth (2019) consideram que é preciso avançar na simulação higrotérmica e exploraram estudos de sensibilidade dos resultados a partir da perspectiva da capacidade de adaptação das soluções construtivas às mudanças climáticas.

Para que assimulações higrotérmicas possam desempenhar um papel essencial no entendimento da suscetibilidade dos envelopes de edifícios existentes, elas devem estar associadas aos dados obtidos por meio de monitoramento em campo. Para Coelho, Silva e Henriques (2018), os dados coletados em campo são necessários para a validação e a calibração dos modelos, além de proporcionar maior confiabilidade no entendimento dos fenômenos higrotérmicos envolvidos.

Embora haja muitas pesquisas sobre as medições de campo de temperatura e umidade do ambiente interior (BARBOSA; WEILLER; LAMBERTS, 2007), poucos estudos tratam do efeito do sistema construtivo na resposta térmica da edificação. Segundo Brito *et al.* (2017, p. 37), “[...] existe dificuldade em identificar somente o efeito do sistema construtivo na resposta térmica da edificação e, conseqüentemente, não se tem informação precisa sobre sua adequação ao clima do local [...]”.

A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) apresenta procedimentos para a medição *in loco* visando à avaliação de desempenho térmico do ambiente baseada nos parâmetros de temperatura dos dias típicos de verão e

inverno. No entanto, mesmo reconhecendo a importância das medições de desempenho dos sistemas construtivos, as normas brasileiras não estabelecem parâmetros, métodos ou procedimentos sistematizados para o monitoramento e a avaliação em campo dos elementos construtivos e seu comportamento diante das variações higrotérmicas, isto é, há recomendações quanto à temperatura, mas não em relação à umidade.

Em especial, apesar do papel social da autoconstrução, são escassos os dados medidos em monitoramento de campo sobre o desempenho dos sistemas construtivos adotados no Brasil, principalmente no que diz respeito à associação com as condições de exposição, qualidade construtiva e durabilidade das edificações. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é analisar o comportamento higrotérmico da parede de alvenaria de vedação externa de uma moradia autoconstruída com bloco cerâmico revestido com argamassa em ambas as faces com base nos dados medidos em campo, nos resultados da simulação higrotérmica e nos parâmetros referenciais normativos para umidade e temperatura.

## Método

O caso selecionado para estudo é uma habitação térrea localizada na Região Administrativa de Santa Maria, em Brasília, DF, Zona Bioclimática 4 (Figura 1). O sistema construtivo consiste em paredes de alvenaria de vedação com bloco cerâmico de 9 cm de espessura, com revestimento em argamassa de 2 cm em ambas as faces (interna e externa). A casa habitada por quatro pessoas encontrava-se em uso regular. Ventilada naturalmente e sem sistema de ar condicionado instalado, as renovações de ar aconteciam somente pelas aberturas de portas e janelas.

A investigação do comportamento higrotérmico do sistema construtivo da fachada da autoconstrução foi baseada em uma pesquisa exploratória do tipo estudo de caso que envolveu monitoramento em campo para as medições de umidade e temperatura, e simulação computacional higrotérmica com o software Wufi Pro.

A amostra selecionada possui as condições de exposição (ações externas) e a materialidade necessárias para a análise do comportamento em campo do sistema construtivo em foco. Sua materialidade configura-se pelos aspectos técnicos, construtivos e projetuais:

- (a) tipologia arquitetônica e estrutural;
- (b) propriedades e características dos materiais e componentes utilizados; e
- (c) técnicas e processo construtivo.

Figura 1 - Unidade habitacional autoconstruída



(a) Localização na Região Administrativa de Santa Maria em Brasília



(b) Fachada leste da autoconstrução

As condições de exposição são configuradas pelas variáveis climáticas do arquivo climático usado na simulação higrotérmica:

- (a) temperatura do ar exterior;
- (b) temperatura do ar interior;
- (c) umidade relativa do ar exterior;
- (d) umidade relativa do ar interior;
- (e) chuva dirigida (precipitação e ventos); e
- (f) pressão atmosférica.

As variáveis dependentes foram consideradas como fatores respostas influenciadas pela orientação de fachada, condições de exposição e materialidade do sistema construtivo.

Os dados coletados pelos sensores caracterizam-se como séries temporais, cujo comportamento cíclico e sazonal deve apresentar padrões não aleatórios, isto é, comportamentos previsíveis inerentes à variável em análise. O tratamento das variáveis não se restringe somente a sua compilação e formatação. São indesejáveis dados espúrios e não condizentes com as características físicas e comportamento conhecido das variáveis analisadas (WORLD..., 2017). Esse critério norteou a seleção do mês analisado. Para análise da abrangência dos dados foram levantados os máximos e mínimos diários, assim como a distribuição e amplitude, todos visualizados em gráficos blox-plot.

Na simulação computacional, o modelo configurado corresponde às condições de exposição e materialidade apresentadas pela amostra selecionada para o estudo de campo. Esse método utilizado para o processamento da capacidade de transporte higrotérmico do sistema construtivo produziu resultados que balizaram o controle do comportamento das variáveis dependentes medidas na amostra. De forma a avaliar as relações dose-resposta no experimento proposto, a simulação computacional forneceu fatores de controle para identificar se a medição de campo apresentou padrões e escalas similares, possibilitando explicar as relações de causa e efeito (GROAT; WANG, 2013).

O monitoramento foi realizado durante os meses de outubro a março, que se caracterizam como meses do período chuvoso em Brasília (ZANONI; SABCHEZ; BAUER, 2018), e para as análises foi selecionado o mês de janeiro.

As medições de campo foram realizadas por meio de dois sensores DTH22 (Figura 2) posicionados na face interna e externa da parede da sala, na fachada leste (única parede não geminada e exposta à radiação solar direta). Os sensores de temperatura e umidade foram conectados a um microcontrolador Arduino Uno, que registrou e armazenou os dados a cada 10 min. O sensor externo foi protegido contra a chuva e a radiação solar direta por um artefato perfurado, desenvolvido para não permitir a retenção do ar quente em seu interior. Os equipamentos utilizados nas medições são sensores DHT22 do modelo AM2302 e apresentam as seguintes especificações:

- (a) faixa de medição de umidade de 0% a 100% UR;
- (b) faixa de medição de temperatura de -40 °C a +80 °C;
- (c) precisão de umidade de medição de  $\pm 2,0\%$  UR;
- (d) precisão de medição de temperatura de  $\pm 0,5$  °C;
- (e) resolução de 0,1; e
- (f) tempo de resposta de 2 s.

A simulação computacional foi feita no software de simulação higrotérmica Wufi Pro 6.2 (*Wärme- und Feuchtetransport Instationär - Transient Heat and Moisture Transport*), que é uma ferramenta de cálculos computacionais unidimensionais nas seções transversais dos componentes da envoltória da edificação para simulação do comportamento higrotérmico, desenvolvido pelo Fraunhofer Institute for Building Physics (FRAUNHOFER..., 2018). Esse programa adota um modelo unidirecional de transporte de calor e massa em regime transiente (não estacionário), governado por equações diferenciais de equilíbrio de calor e de massa, que considera, entre outras variáveis, umidade incorporada, chuva dirigida, radiação solar, radiação de ondas longas, transporte capilar e condensação de verão, possibilitando estudar o desempenho higrotérmico dos componentes do edifício em condições climáticas reais. O modelo utilizado pelo Wufi atende a todos os requisitos e critérios estabelecidos pela EN 15026 *Hygrothermal performance of building components and*

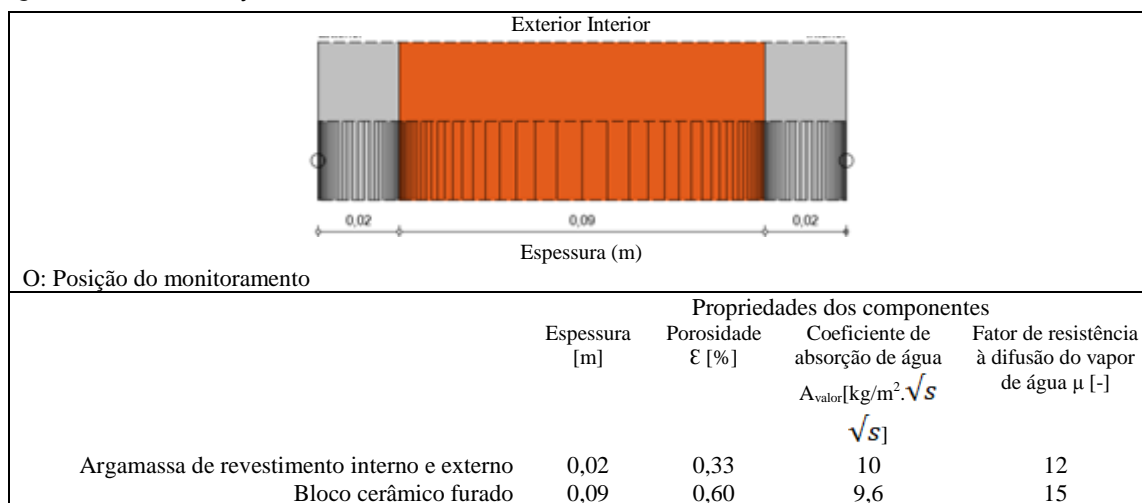
*building elements - Assessment of moisture transfer by numerical simulation* (DEUTSCHES..., 2007; DELGADO *et al.*, 2013).

Para a simulação computacional com o Wufi Pro 6.2, o clima interno deve ser predefinido. Foi utilizado o clima interior estabelecido pela EN 15026 (DEUTSCHES..., 2007) - Produção de umidificação normal. A partir do arquivo do clima exterior, o programa permite derivar a evolução horária da umidade e temperatura em cada camada do sistema construtivo ou em uma posição escolhida na seção do componente (RAMOS *et al.*, 2009; SEDLBAUER *et al.*, 2010). Para esta pesquisa foram analisadas as posições superfície interna e superfície externa da parede da fachada leste (Figura 3).

Figura 2 - Sensores DTH22 nas medições de campo



Figura 3 - Caracterização do sistema construtivo simulado



Para dados de entrada do clima exterior foi utilizado o arquivo climático em formato TMY (*Typical Meteorological Year*), com dados medidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), disponibilizado pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações nas versões 2016 e 2018 (LABORATÓRIO..., 2018).

O modelo de chuva dirigida adotado para a simulação computacional higrotérmica foi o da ASHRAE 160 (AMERICAN..., 2016; ZANONI; SANCHEZ; BAUER, 2018) considerando a altura do edifício como edificação térrea (edifício pequeno de até 10 m de altura).

Com base em dados obtidos da revisão bibliográfica (RAMOS *et al.*, 2009; ZHAO *et al.*, 2015; ZANONI, 2015; SALOMÃO; BAUER; KAZMIERCZAK, 2018; SANTOS, 2019) e da base de dados do Wufi Pro 6.2, a parede de alvenaria de vedação de bloco cerâmico revestido com argamassa em ambas as faces adotada para a simulação compõe-se de materiais e componentes muito porosos, com alta capacidade de absorção de água e baixa resistência à difusão do vapor de água, o que acarreta maior transporte de massa pela parede (Figura 3).

Uma vez coletados os dados, foi feito um cruzamento das informações obtidas na simulação com as medidas em campo. Esses resultados foram comparados com os limites apresentados pelos parâmetros referenciais normativos da NBR 15575-1 (ABNT, 2013), ASHRAE 160 (AMERICAN..., 2016) e EN 15026 (DEUTSCHES..., 2007), sendo:

- (a) temperatura máxima diária de um dia típico de verão: 31,2 °C (ABNT, 2013);
- (b) umidade relativa – sem parâmetro de referência na NBR 15575-1 (ABNT, 2013);
- (c) umidade relativa do ar interior da DIN EN 15026 (DEUTSCHES..., 2007) = 60%; e
- (d) umidade relativa do ar interior da ASHRAE 160 (AMERICAN..., 2016) = 70%.

Como as normas brasileiras não estabelecem parâmetros normatizados de referência para identificar somente o efeito do sistema construtivo na resposta higrotérmica da edificação, foram adotados os limites apresentados acima, que são utilizados amplamente na área de conforto ambiental, desempenho térmico e eficiência energética para avaliar a resposta térmica do recinto e seu conforto. A escolha da umidade relativa da superfície como variável para medição e análise encontra-se fundamentada na ASHRAE 160 (AMERICAN..., 2016) – *Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings*.

Dessa forma, com foco na condição interna, considera-se que os parâmetros de desempenho do sistema construtivo a serem medidos em campo podem ser representados pela temperatura e umidade relativa superficiais, e o efeito na superfície não deve ultrapassar os limites desejados de temperatura do ar e umidade relativa do ar para o ambiente interior, cuja condição de equilíbrio corrobora o balanço higrotérmico.

## Resultados e discussões

No mês de janeiro, as medidas efetuadas pelo Inmet para a temperatura do ar ficaram entre 15,7 °C e 32,2 °C. Durante o monitoramento do sistema construtivo, as medições realizadas pelo sensor de temperatura na superfície exterior variaram entre 17,3 °C e 39,9 °C. Internamente, a temperatura da superfície variou entre 19,8 °C e 37,4 °C. Para o período, os valores de temperatura superficial exterior obtidos na simulação com o Wufi Pro 6.2 atingiram valores mínimos e máximos de 18,3 °C e 39,7 °C respectivamente, enquanto na superfície interior os valores da temperatura variaram de 24,5 °C a 25,6 °C. Os valores de temperatura obtidos na simulação para o mês de janeiro estão expostos na Figura 4, assim como as medições de temperaturas superficiais interna e externa e o limite normativo prescrito pela NBR 15575-1 para uma temperatura máxima interna do ar de um dia típico de verão.

Essa pouca variação da temperatura da superfície interior ocorre porque o Wufi Pro 6.2 segue o modelo da EN 15026 (DEUTSCHES..., 2007), estabelecendo valores próximos de 25 °C, em uma condição interna desejada de zona de conforto.

Para a Zona Bioclimática 4, a NBR 15575-1 (ABNT, 2013) estabelece que a temperatura máxima do ar interior deve ser sempre menor ou igual à temperatura do ar exterior. No entanto, em algumas horas do mês, a temperatura medida na superfície da parede interna foi maior do que a externa. Ainda com base no limite normativo da NBR 15575-1 para a temperatura máxima de um dia típico de verão para Brasília (31,2 °C), observa-se que as temperaturas medidas ultrapassam esse limite na maioria das horas ao longo do mês.

Os valores medidos no mês de janeiro pelo Inmet para a umidade relativa do ar ficaram entre 22% e 95%. Nesse período do monitoramento, os sensores mediram a umidade relativa da superfície exterior, que variaram de 24,2% a 99,9%, enquanto a umidade relativa da superfície interior variou de 27,4% a 94,5%. Na simulação, os valores de umidade relativa da superfície exterior ficaram entre 23,8% e 99,9%. Para a superfície interior, os valores variaram de 57,9% a 61,5%, visto que o Wufi Pro 6.2 segue o modelo da EN 15026 (DEUTSCHES..., 2007), próximos de 60%, uma vez que o modelo adotado pelo software estabelece uma condição estável de umidade relativa para o ambiente interno, em uma condição desejada de conforto. Esses valores para o mês de janeiro estão expostos na Figura 5.

Figura 4 - Temperaturas internas e externas obtidas por medição, simulação e limite normativo de um dia típico de verão

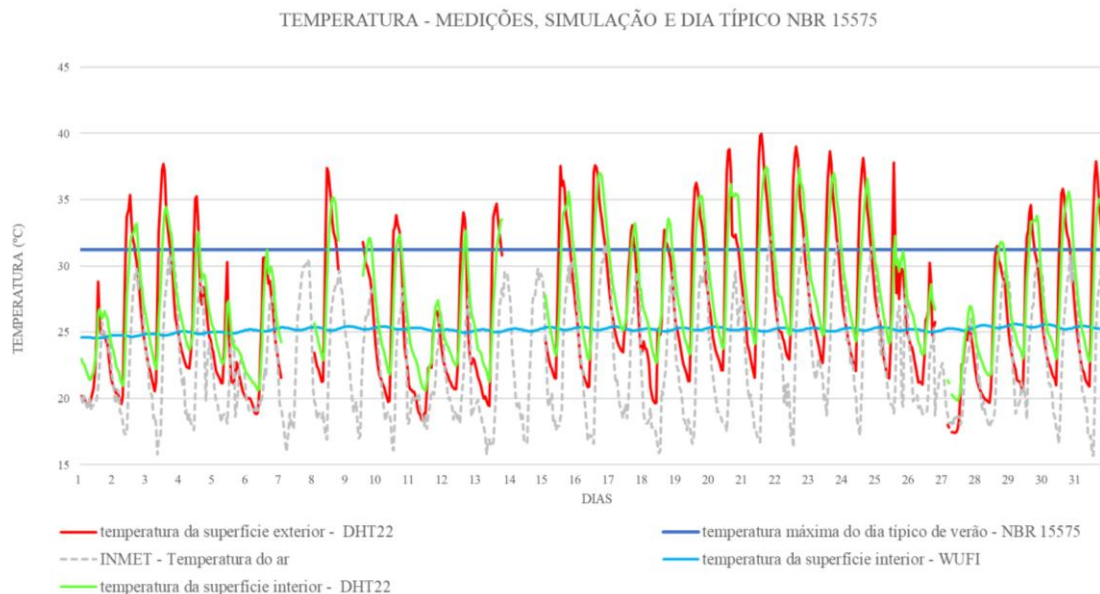
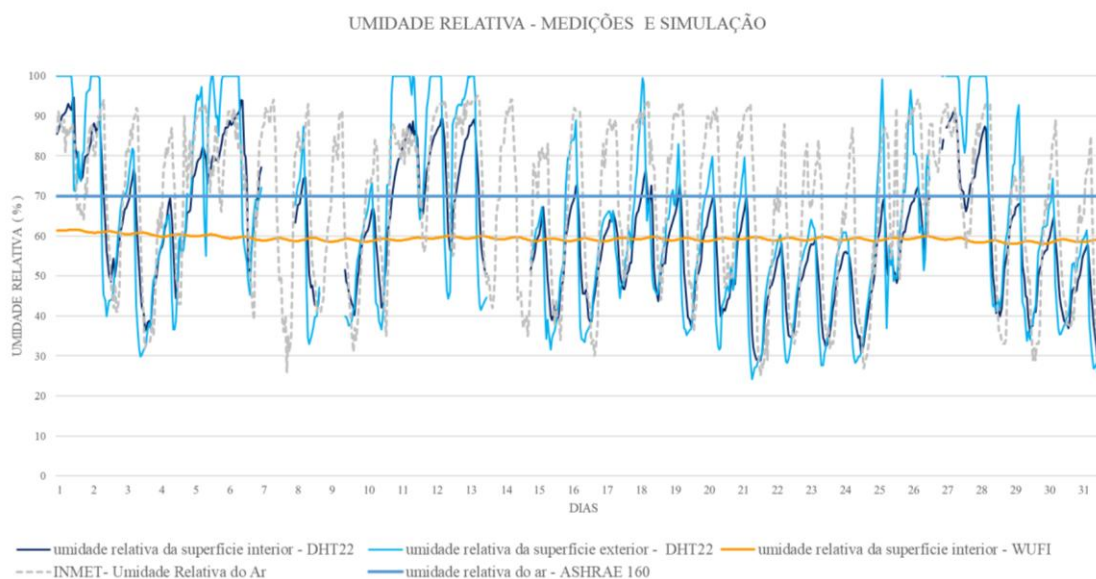


Figura 5 - Umidades relativas internas e externas obtidas por medição, simulação e limite normativo da ASHRAE 160



A NBR 15575 não estabelece valores de referência para a umidade relativa interna, tal como fazem as normas ASHRAE 160 (AMERICAN..., 2016) e DIN EN 15026 (DEUTSCHES..., 2007), que estabelecem os limites de 70% e 60% respectivamente. Observa-se que a umidade relativa superficial medida no sistema construtivo de fachada da autoconstrução ultrapassa os limites de referência estipulados em ambos os casos. Esses limites estão relacionados às condições favoráveis para a formação de bolor em paredes de vedação.

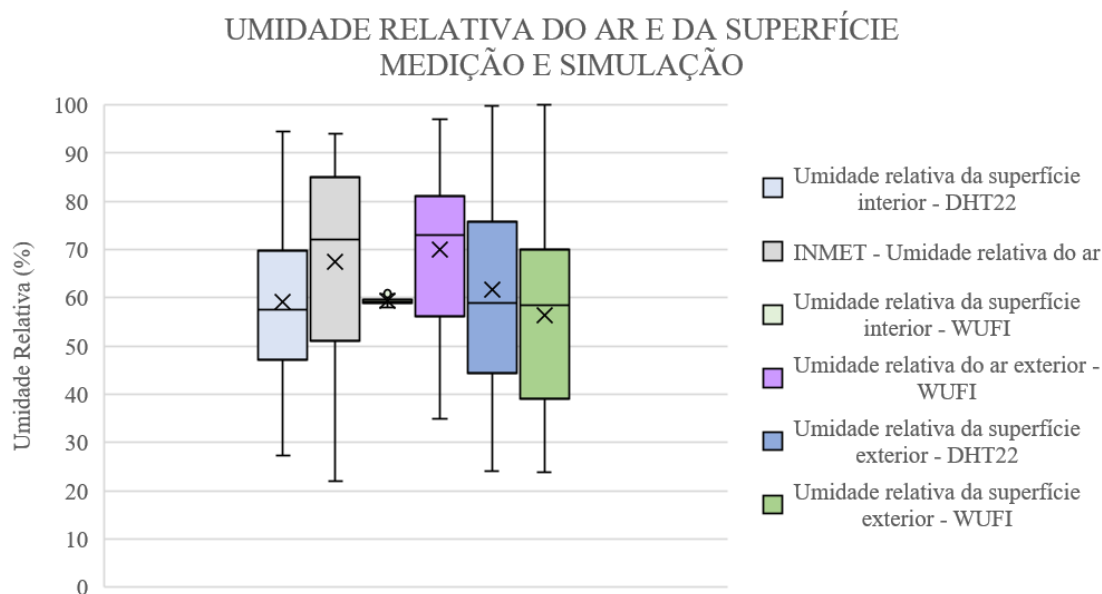
A Tabela 1 e a Figura 6 apresentam os valores médios, as medianas, os máximos e mínimos, tanto aqueles medidos pelo Inmet para a umidade relativa do ar no mês de janeiro, como os dados de entrada do arquivo climático TMY utilizado na simulação computacional para a variável umidade relativa do ar externa, e os dados coletados pelos sensores durante o monitoramento de campo, ao longo do mês de janeiro. Na Figura 6, os gráficos do tipo box-plot mostram a variabilidade dos dados obtidos, sua simetria e distribuição em torno da média e mediana.

O mês de janeiro do arquivo climático TMY adotado para a simulação é um mês médio considerado típico, obtido de uma série de 10 anos de dados coletados pelo Inmet. Ao observar os valores médio, máximo e da mediana da umidade relativa do ar medida pelo Inmet no período do monitoramento e os valores do Wufi, verifica-se similaridade. Ainda na Figura 6, observa-se que os valores da média, máxima, mínima e mediana da umidade relativa da superfície exterior obtidos pelo sensor também possuem similaridade com os valores correspondentes simulados. Tal similaridade mostra a representatividade dos resultados das simulações para os estudos de comportamento do sistema construtivo.

Tabela 1 - Medianas, médias, máximos e mínimos das umidades relativas obtidas por medição e simulação

	Inmet - Umidade Relativa do Ar (%)	Umidade relativa da superfície exterior - DHT22 (%)	Umidade relativa da superfície interior - DHT22 (%)	Umidade relativa do ar exterior - WUFI (%)	Umidade relativa da superfície exterior - WUFI (%)	Umidade relativa da superfície interior - WUFI (%)
Mediana	72,0	58,9	57,5	73,0	56,3	59,2
Média	67,5	61,6	59,2	70,1	58,5	59,3
Máxima	94,0	99,9	94,5	97,0	100,0	61,5
Mínima	22,0	24,2	27,4	35,0	23,9	57,9

Figura 6 - Variações dos valores das umidades relativas obtidos por medição e simulação, suas medianas, médias, máximos e mínimos





Quando comparados os valores das umidades relativas das superfícies exterior e interior medidos pelos sensores, verifica-se que ocorre um amortecimento do teor de umidade, o que é favorável ao ambiente interior. Mas, ao comparar os valores medidos com os resultados da simulação, constata-se que o sistema construtivo não teve o desempenho desejado para garantir que a umidade relativa da superfície interior não superasse os parâmetros referenciais normativos da EN 15026 adotado pelo Wufi.

Tanto na Figura 5 como na Figura 6 são observadas as flutuações dos valores da umidade relativa medidas na superfície da parede, mostrando grande amplitude dos dados. Por isso, alerta-se que as análises das médias não são suficientes para avaliar o comportamento do sistema construtivo, principalmente quando os dados possuem comportamento cíclico e sazonal. É preciso associar a essa análise a amplitude da flutuação, assim como as máximas.

A Figura 7 apresenta o comportamento do sistema construtivo para o dia 5 de janeiro de 2019. As medições realizadas em intervalos de 10 min em 10 min permitiram a verificação da flutuação da umidade nas superfícies analisadas. Esse dia foi precedido por, pelo menos, 5 dias sem chuva no local do monitoramento, o que permitiu um estudo mais preciso sobre o processo de transporte de massa, sem a ação direta da água líquida (chuva dirigida). Mesmo não havendo chuva dirigida nesses dias monitorados, o mês de janeiro é um mês úmido, conforme pode ser constatado na Figura 7.

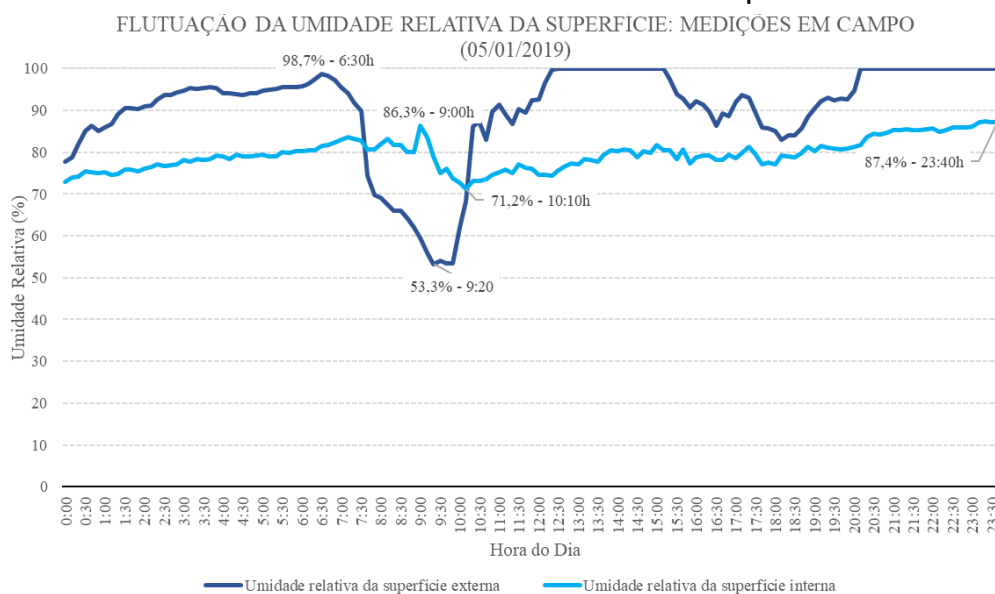
Ao amanhecer, e durante o período de incidência solar direta (fachada leste), entre 7h00 e 10h00, há redução da umidade relativa na superfície externa (53,3%), enquanto no mesmo período a superfície interna ainda é abastecida pela sorção da umidade pelo sistema ao longo da noite, alcançando 86,3%. Após as 10h00, ocorre elevação da umidade relativa na superfície externa, por vezes flutuando o nível até a saturação, enquanto o sistema construtivo continua sorvendo gradualmente esse aumento de umidade, atingindo a máxima diária na superfície interna às 23h40.

Nota-se que os picos de umidade relativa na superfície interior apresentam atrasos e amortecimentos em relação aos picos na superfície exterior, mas não são significativos para os níveis desejados de desempenho de um sistema construtivo de fachada. O caso estudado sugere que a parede da autoconstrução permite alto fluxo de umidade para o interior da edificação ao longo de todo o dia.

Na avaliação do desempenho quanto à umidade, os critérios da ASHRAE 160 (AMERICAN..., 2016) alertam para o risco de proliferação de fungo para as temperaturas da superfície interior ( $T_{SI}$ ) entre 5 °C e 40 °C quando associadas a uma das seguintes condições de umidade relativa na superfície interior ( $UR_{SI}$ ):

- 80% de  $UR_{SI}$  por 30 dias corridos;
- 98% de  $UR_{SI}$  por 7 dias corridos; ou
- 100% de  $RH_{SI}$  por 24 h (pior condição).

Figura 7 - Atraso e amortecimento dos valores de umidade relativa da superfície em um dia de medição



Pondera-se que tais critérios são para minimizar os efeitos indesejáveis quanto à presença de mofo. No entanto, os resultados das medições e simulações realizadas na habitação autoconstruída mostram que as condições de umidade encontradas, mesmo quando não são suficientes para o desenvolvimento de fungos, podem afetar o conforto do ambiente interior. Nesse caso, em decorrência do equilíbrio higroscópico do sistema construtivo, os níveis de umidade relativa da superfície interior podem contribuir com o aumento da umidade do ar no recinto, aumentando o desconforto do usuário no período quente e chuvoso de Brasília.

O que se espera do sistema construtivo é que a parede e seus materiais constituintes apresentem suficiente estanqueidade à água líquida e baixa permeabilidade. Além disso, devem ser capazes de reter baixos teores de umidade, pois, estando saturados, dificultam o fluxo de umidade de dentro para fora do recinto.

## Conclusão

Na análise do comportamento higrotérmico da parede de fachada da habitação autoconstruída, as variáveis temperaturas e umidades relativas das superfícies interna e externa apresentaram potencial para a representação da resposta do sistema construtivo mediante as condições de exposição e o conjunto de atributos que caracterizam sua materialidade.

Quais variáveis higrotérmicas são mais representativas para avaliar o desempenho do sistema construtivo em campo ainda é uma questão aberta, assim como os parâmetros de referência para umidade a serem adotados pelas normas brasileiras. Este trabalho contribui para ampliar a discussão ao quantificar a resposta do sistema construtivo. Ao avaliar o desempenho higrotérmico, não se deve absolutamente negligenciar as condições de conforto e condicionamento passivo do recinto. Por isso, a resposta da superfície não deve ultrapassar os limites desejados para o ambiente interior, cuja condição de equilíbrio higrotérmico deve fundamentar a parametrização dos limites de referência a serem adotados.

Os valores medidos sugerem que a parede da autoconstrução permite alto fluxo de umidade para o interior da edificação. Os resultados são relevantes porque quantificam o comportamento higrotérmico do sistema construtivo e contribuem para a compreensão do fenômeno de transferência de calor e umidade na autoconstrução, explicando a presença ostensiva de umidade, responsável pelo desenvolvimento do bolor encontrado na habitação.

As diferenças encontradas entre os resultados simulados e medidos, ainda que indesejáveis, não são divergentes ou discrepantes, visto que correspondem aos padrões esperados de intensidade, distribuição e amplitude das variáveis resposta no sistema construtivo, considerando suas condições de exposição e materialidade. Nos estudos experimentais associados aos estudos por simulação, interessa exatamente a investigação dessas diferenças, que ainda são insuficientemente conhecidas para estabelecer parâmetros de referência, baseados nas relações causais (causa e efeito) e também nas relações dose-resposta.

Dessa forma, a estratégia metodológica associando medições e simulação computacional viabilizou a operacionalização do experimento em campo e sua futura replicação. O modelo simulado nas condições apresentadas neste estudo de caso mostrou-se satisfatoriamente representativo da realidade investigada. Por isso, é possível testar várias situações sem os custos que envolvem ensaios laboratoriais, além de permitir experimentar diversas soluções construtivas que auxiliem nas decisões de planejamento e projeto, no âmbito das ações de melhoria habitacional.

## Referências

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **160**: criteria for moisture-control design analysis in buildings. Atlanta, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: edificações habitacionais: desempenho: parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

BARBOSA, M. J.; WEILLER, G. C. B.; LAMBERTS, R. Disposição dos equipamentos para medição da temperatura do ar em edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 89-108, jul./set. 2007.

BRASIL. **Lei nº 11.888**, de 24 de dezembro de 2008, que assegura às famílias de baixa renda assistência técnica pública e gratuita para o projeto e a construção de habitação de interesse social. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2008/Lei/L11888.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2008/Lei/L11888.htm). Acesso em: 12 jan. 2019.

- BRITO, A. C. *et al.* Necessidade de revisão dos métodos de avaliação do desempenho térmico de edificações no âmbito da Norma NBR 15575 e do SiNAT. In: FABRICIO, M. M.; BRITO, A. C. de; VITORINO, F. (org.). **Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: conforto ambiental, durabilidade e pós-ocupação.** Porto Alegre: ANTAC, 2017.
- CABRERA, P.; SAMUELSON, H.; KURTH, M. Simulating Mold Risks under Future Climate Conditions. In: BUILDING SIMULATION, 2019, Rome, 2019. **Proceedings [...]** Rome, 2019.
- COELHO, G.; SILVA, H. E.; HENRIQUES, F. Calibrated hygrothermal simulation models for historical buildings. **Building and Environment**, v.142, p. 439-450, 2018.
- CONSELHO DE ARQUITETURA E URBANISMO DO BRASIL. **Pesquisa CAU/BR Datafolha.** 2015. Disponível em: <https://www.caubr.gov.br/pesquisa2015/>. Acesso em: 10 out. 2018.
- DELGADO, J. *et al.* **Hygrothermal numerical simulation tools applied to building physics.** London: Springer, 2013.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN 15026:** Hygrothermal performance of building components and building elements: assessment of moisture transfer by numerical simulation. Berlin, 2007.
- FRAUNHOFER INSTITUTE FOR BUILDING PHYSICS. WUFI® Pro 6.2. Holzkirchen, 2018.
- 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.
- GROAT, L. N.; WANG, D. **Architectural research methods.** 2<sup>nd</sup> ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- 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.
- LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos.** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>. Acesso em: 10 out. 2018.
- LEITE, R. V.; FARIA, T. C. A. Autoconstrução e paisagem: cidade informal e sujeitos urbanos de periferia de Viçosa (MG). **Revista Espaço e Geografia**, v. 20, n. 2, p.299-336, 2017.
- LOCHE, I.; FONSECA, L.; CARLO, J. Proposta de inserção de estratégias bioclimáticas em habitações autoconstruídas, com o uso da gramática da forma. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., Foz do Iguacu, 2018. **Anais [...]** Porto Alegre: ANTAC, 2018.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Habitação. **Plano Nacional de Habitação.** Versão para debates. Brasília, 2010.
- PATINO, E. D. L.; SIEGEL, J. A. Indoor environmental quality in social housing: a literature review. **Building and Environment**, v. 131, p. 231-241, 2018.
- RAMOS, N.M. M. *et al.* Hygrothermal properties applied in numerical simulation: interstitial condensation analysis. **Journal of Building Appraisal**, v. 5, n. 2, p. 161-170, 2009.
- SÁ, W.L.F. **Autoconstrução na cidade informal:** relações com a política habitacional e formas de financiamento. Recife, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Urbano, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- SALOMÃO, M. C. de F.; BAUER, E.; KAZMIERCZAK, C. de S. Drying parameters of rendering mortars. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 7-19, abr./jun. 2018.
- SANTOS, A. C. **Avaliação do desempenho potencial de duas soluções de revestimentos argamassados em função do risco de formação de fungos emboloradores no interior de edificações na cidade de São Paulo.** São Paulo, 2019. 193 f. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2019.
- SEDLBAUER, K. *et al.* **Flat roof construction manual:** materials, design, applications. Basel: Birkhäuser, 2010.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to the Global Observing System**: n. 488. 10. ed. Geneva, 2017.

ZANONI, V. A. G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília**. Brasília, 2015. 313 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

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**, Campinas, v. 9, n. 2, p. 122-132, jun. 2018.

ZHAO, J. *et al.* Concept for development of stochastic databases for building performance simulation: a material database pilot project. **Building and Environment**, v.84, p.189-203, 2015.

**Vanda Alice Garcia Zanoni**

Departamento de Tecnologia, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de Brasília | Campus Universitário Darcy Ribeiro | Brasília-DF - Brasil | CEP 70910-900 | Tel.: (61) 3107-7430 | E-mail: vandazanoni@unb.br

**André Luís de Faria Dantas**

Departamento de Tecnologia | Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de Brasília | E-mail: andreldants@gmail.com

**Layane Soares Nunes**

Departamento de Tecnologia | Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de Brasília | E-mail: layanecute@gmail.com

**Rafael Barbosa Rios**

Departamento de Tecnologia | Faculdade de Arquitetura e Urbanismo | Universidade de Brasília | E-mail: rafaelb.rios@gmail.com

***Ambiente Construído***

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

Fax: +55 (51) 3308-4054

[www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido](http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido)

E-mail: [ambienteconstruido@ufrgs.br](mailto:ambienteconstruido@ufrgs.br)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.