SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE DEGRADAÇÃO DE UMA FACHADA DE CONCRETO

Cinthia Cavalcante (1); Thiago Montenegro Góes (2);
Adriano Lopes (3); Caio Frederico e Silva (4); Vanda Zanoni (5)
(1) Discente de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, cinthia103alca@gmail.com
(2) Doutorando, Professor da Universidade Federal de Goiás (UFG), thiago.montenegro@aluno.unb.br
(3) Me. Professor da Instituo Federal da Bahia (IFBA), adriano.lopes@ifba.edu.br
(4) Dr. Professor do PPGFAU-UnB, Universidade de Brasília, caiosilva@unb.br
(5) Dra. Professora do PPGFAU-UnB, Universidade de Brasília, vandazanoni@unb.br

RESUMO
Este artigo apresenta os resultados da simulação computacional do comportamento higrotérmico da parede de concreto aparente da Biblioteca Central da Universidade de Brasília. A pesquisa avaliou dois tipos de concreto, diferenciando as propriedades higrotérmicas e o tipo de acabamento externo (com e sem pintura), para duas orientações de fachada (Norte e Nordeste). O programa de simulação higrotérmica WUFI Pro foi utilizado para avaliar o conteúdo de umidade dos sistemas modelados no EnergyPlus e no OpenStudio. Para avaliar o potencial de crescimento de fungos emboloradores foi aplicado o WUFI Bio, considerando seus critérios e representações em isopletas (modelo gráfico). O estudo envolveu a análise do potencial de degradação da fachada relacionado às condições de exposição da edificação e às características dos elementos construtivos. Os resultados apresentaram maiores variações nos teores de umidade no sistema de parede de concreto pintado com tinta acrílica na fachada Norte, indicando maior potencial para o desenvolvimento de bolor que compromete a qualidade ambiental e os atributos arquitetônicos do edifício.

Palavras-chave: Simulação Higrotérmica. WUFI. Concreto Aparente. Teor de umidade. Mofo.

ABSTRACT
This article presents the computer simulation results of the hygrothermal performance of the exposed concrete wall of the Central Library of the University of Brasília. The research evaluated two types of concrete, differentiating the hygrothermal properties and the type of external finishing (with and without painting), for two facade orientations (North and Northeast). The hygrothermal simulation program WUFI Pro was used to evaluate the moisture content of the systems modeled in EnergyPlus and OpenStudio. WUFI Bio was applied to evaluate the growth potential of mold fungi, considering its criteria and representations in isopleths (graphic model). The study involved the analysis of the facade degradation potential related to the exposure conditions of the building and the characteristics of the constructive elements. The results showed greater variations in moisture content in the concrete wall system painted with acrylic paint on the north facade, indicating a greater potential for mold development that compromises both the environmental quality and the architectural attributes of the building.

Keywords: Hygrothermal Simulation. WUFI. Exposed Concrete. Moisture content. Mold.

1. INTRODUÇÃO

O teor de umidade presente nos componentes construtivos é um indicador determinante na avaliação do risco de condensação e pode induzir ao crescimento de mofo. As condições de exposição da envoltória, as condições ambientais internas e as características dos sistemas construtivos são as condicionantes que afetam o transporte de calor e massa (umidade na forma líquida e vapor) e, consequentemente, o desempenho higrotérmico dos componentes ou elementos da edificação.

O aparecimento de fungos emboloradores está relacionado às condições de exposição que envolvem diversos fatores, tais como, baixa incidência de radiação solar, ventilação insuficiente ou ausente, qualidade do ar interno e do ar externo, temperaturas, propriedades dos materiais, ações de manutenção, tipo de uso e ocupação, entre outros. O crescimento desses microrganismos afeta negativamente a habitabilidade do ambiente e a durabilidade dos materiais (GRADECI et al., 2020; SANTOS, 2019; CABRERA et al., 2019; VIITANEN et al.; 2015; TRECHSEL; BOMBERG, 2015).

Morishita et al. (2020) elaboraram um método com indicadores de chuva dirigida baseado no clima. Os mapas plotados escalam a sobreposição de áreas densamente povoadas e áreas de alto risco climático de umidade que podem causar condensações e crescimento de fungos. O estudo aplicado no Brasil mostra a relevância da chuva dirigida como fonte de umidade, indicando alto potencial de risco aos edifícios. A chuva dirigida como fonte de umidade na fachada influencia o fluxo de calor e as temperaturas superficiais das paredes (BRITO; BELIZARIO-SILVA, 2022; ZANONI et al. 2018).

Os fenômenos de transporte de calor e massa são de natureza multidimensional. Os gradientes de temperatura e umidade, associados aos fenômenos de transferência de calor e umidade ocorrem simultaneamente nas paredes das edificações e são altamente interdependentes (SANTOS, 2009; MENDES, 1997). Nem sempre é possível estudá-los somente no ambiente controlado do laboratório de ensaios. Por isso, as simulações computacionais, assim como as medições em campo e as experimentações laboratoriais, devem ser complementares, tornando-se um conjunto de recursos necessários para que se amplie a compreensão dos fenômenos de degradação e as variáveis envolvidas (ZANONI, 2015).

A simulação computacional para análise higrotérmica é uma estratégia para a compreensão dos fenômenos de transporte de calor e massa (ZANONI et al., 2020). Considerando um cenário de mudanças climáticas, a simulação higrotérmica possibilita a avaliação das melhores soluções e a estimativa dos resultados em uma perspectiva futura para análise do comportamento da edificação e as ações de manutenção e conservação necessárias para garantir o prolongamento da vida útil.

Nesse contexto, este artigo apresenta um estudo realizado em uma parede de concreto aparente da Biblioteca Central - BCE da Universidade de Brasília - UnB (Figura 1), localizada no Campus Darcy Ribeiro em Brasília. A UnB constitui-se de um parque edificado com cerca de duas mil edificações destinadas a abrigar as atividades acadêmicas, administrativas, residenciais e comerciais. Os edifícios projetados e construídos ao longo dessas seis últimas décadas possuem características próprias, atributos relevantes, usos diversificados, distintos estados de conservação e demandam diferentes necessidades de manutenção. Parte dessas edificações construídas desde a década de 60 foram executadas em concreto aparente e demandam ações de conservação e manutenção que, nem sempre, consideram as características higrotérmicas de seus sistemas.



Figura 1 - Biblioteca Central da Universidade de Brasília no Campus Darcy Ribeiro. Fonte: Os Autores.

A escolha do edifício da Biblioteca Central da Universidade de Brasília (BCE-UnB) foi motivada pela sua relevante função e importância histórica. Passados 50 anos de vida útil, as fachadas em concreto aparente encontram-se com estado de envelhecimento natural que demandam intervenções para a sua conservação. Por isso, faz-se necessário estudos que mostrem como o comportamento higrotérmico dos sistemas em paredes de

concreto podem afetar as condições do ambiente interior e, também, como essas paredes podem ser afetadas por intervenção que não considerem os fenômenos de transporte de calor e umidade que podem afetar a sua durabilidade.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é analisar o potencial de degradação de paredes de concreto aparente, baseado nas variações do teor de umidade e dos índices de crescimento de fungos emboloradores. Dois tipos de parede de concreto, com e sem acabamento em pintura, com diferentes fatores de resistência à difusão ao vapor de água, em duas orientações do edifício, foram consideradas para as simulações computacionais higrotérmicas com o WUFI Pro 6.5 e o WUFI Bio.

3. MÉTODO

A abordagem metodológica adotada nesta pesquisa constitui-se das seguintes etapas principais:

- Modelagem 3D no programa *Sketchup*;
- Simulação no EnergyPlus, por meio da interface gráfica *OpenStudio* e seu plugin para o *SketchUp,* para obtenção das variáveis do clima interno;
- Simulação higrotérmica no programa WUFI Pro 6.5 e obtenção dos teores de umidade nos sistemas estudados;
- Obtenção dos índices de crescimentos dos fungos e potencial de degradação dos sistemas estudados, por meio de modelos gráficos fornecidos pelo WUFI Bio e VTT-*model.*

3.1. Dados climáticos de entrada - clima externo

Para a simulação computacional foi utilizado um arquivo climático representativo do local, com um ano completo de dados horários, contabilizando as 8760 horas, com a extensão epw (*energyplus Weather data*). O TMY (ano meteorológico típico) BRA_DF_Brasilia.867150_INMET.epw foi obtido no repositório de acesso gratuito do site *Climate One Building* (CRAWLEY; LAWRIE, 2020).

Entre os arquivos climáticos disponíveis para Brasília, o TMY INMET 2018 - série 86170 da Estação A001 do Instituto Nacional de Meteorológica-INMET é o mais representativo quando analisadas as variáveis climáticas (ZANONI, 2015) e, principalmente, quando verificados o somatório anual e o comportamento da chuva dirigida.

3.2. Condições ambientais internas

Para avaliar as condições do ambiente interno no regime transiente e nas condições brasileiras, optou-se por obter o clima interior a partir do clima exterior, extraindo do programa EnergyPlus os dados horários das variáveis temperatura do ar e umidade relativa do ar. O algoritmo de cálculo do EnergyPlus, a partir da introdução de um arquivo climático com extensão epw, permite ao usuário simular as condições da edificação modelada em 3D no *Sketchup*, caracterizando as geometrias, os materiais, os sistemas mecânicos e de ventilação e, por fim, o ambiente climático.

Entretanto, como a interface gráfica do EnergyPlus é numérica, foi utilizada a interface gráfica *OpenStudio* e seu *plugin* para o *SketchUp*. A interface do modelo de simulação, associando os programas, fornece significados físicos, considerando portas como objetos de fenestração, janelas como fontes de iluminação, aberturas para a renovação de ar pelo modo natural e os objetos exteriores como sombreamentos – *brises soleil* e o entorno urbano.

3.3. Simulação no programa EnergyPlus – interface gráfica *OpenStudio*

Para investigar o comportamento higrotérmico de paredes de concreto na cidade de Brasília, Zona Bioclimática 4, foi modelada uma sala de trabalho da Biblioteca Central da Universidade de Brasília. Foi considerada a fachada em concreto aparente em duas orientações críticas e sem sombreamento: a orientação Norte por estar mais exposta à chuva dirigida e a orientação Nordeste por estar mais exposta às variações térmicas ao longo do ano, para o contexto climático da cidade.

Após a modelagem geométrica da edificação, foram definidos padrões de uso e ocupação por meio de um template, e o tipo de construção a ser analisada. O template utilizado contempla o esquema típico fornecido pelo programa, selecionando o *Office Conference*, por compreender a atividade funcional do projeto. A zona climática escolhida foi a CZ1-3, de acordo com os critérios da ASHRAE (2013) que apresenta dados similares

ao zonamento climático brasileiro. A sala de trabalho apresenta ventilação mecânica com um sistema de ar-condicionado, já que as janelas não permitem aberturas efetivas para as renovações de ar conforme as normativas da ASHRAE.

O sistema construtivo consiste em paredes em concreto aparente, sem revestimento interno e externo. As paredes foram simuladas com 20 cm de espessura. Os parâmetros de entrada para a simulação no *OpenStudio* foram compostos por materiais da base de referência da ABNT NBR 15220-1:2005. As propriedades físicas dos materiais do sistema em concreto aparente foram alimentadas com as informações do Anexo D da ABNT NBR 15220-1:2005 e os dados da biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus (WEBER et al., 2017). O Quadro 1 apresenta os dados dos materiais das paredes de concreto que foram configuradas no *OpenStudio*.

Quadro 1 – Sistema Construtivo para a configuração do OpenStudio.

Descrição	Material	Espessura (m)	Condutividade [W/m.K]	Calor Específico [J/kg.K]	Densidade [kg/m³]
Parede em concreto maciço	Concreto	0,20	1,75	1000	2200
Cobertura	Laje maciça de concreto	0,20	1,75	1000	2400
Piso Cerâmico	Piso cerâmico	0,15	1,05	920	2000

Fonte: Os autores, baseado em Weber et al. (2017) e no Anexo D da ABNT NBR 15220-1:2005.

Para os dados de entrada referentes às cargas térmicas, energéticas e de usuários, inclusive produção de vapor, foram utilizados os dados padrão apresentados pelo template do programa. Após a simulação no EnergyPlus, os dados horários de saída selecionados para compor o clima interior a ser inserido no WUFI Pro foram as variáveis Umidade Relativa (%) e Temperatura do Ar (°C).

3.4. Simulação higrotérmica no WUFI Pro – condições de contorno

O comportamento higrotérmico das paredes da fachada em concreto aparente foram analisados a partir da simulação computacional com o WUFI Pro 6.5 (*Wärme -und Feuchtetransport Instationär – Transient Heat and Moisture Transport*) que é uma ferramenta de cálculos computacionais desenvolvida pelo *Fraunhofer Institute for Building Physics* (FAUNHOFER, 2018). O WUFI Pro apresenta um modelo unidirecional para os estudos do transporte de calor e de massa. O modelo adotado segue a DIN EN-15026:2007 *Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation.* O Quadro 2 mostra as condições de contorno exigidas pelo programa WUFI Pro que foram definidas com base nas caraterísticas da edificação em estudo.

Quadro 2 – Parâmetros de entrada para a simulação higrotérmica no WUFI Pro.

	Parâmetros de Entrada	Valor	Unidade
Sistema Construtivo - SC1 Referência: Cimento C12/15	espessura	0,20	m
Sistema Construtivo – SC2 Referência: Cimento C 35/45	espessura	0,20	m
Orientação, Inclinação, Altura e Chuva Dirigida			
Orientação	Norte; Nordeste	-	-
Inclinação	i	90	º
Altura	h	≤10	m
Chuva Dirigida	Modelo da ASHRAE 160 - edifício com altura até ou menor a 10 m (Fe= 1,4) e fachada exposta sujeita ao escoamento de água (Fd= 1,0)	Condição severa: parede sujeita a escoamento de água	mm/a
Coeficiente de transferência à superfície			
Resistência Térmica-Superfície Externa	Parede Externa	0,0588	W/(m²K)
Valor de Sd	Sd para tinta acrílica	0,3	m
Absortância	α	0,6 cinza, DIN 4108-3 tonalidade média	-
Refletividade do solo	$_r$	0,2	-
Fator de redução da chuva dirigida	F_r	0,7	-
Resistência superficial interna	R_{si}	0,13	-
Condições iniciais de contorno			
Umidade inicial	-	0,8	-
Temperatura inicial	ºC	20	-
Período de simulação	3 anos	01/01/2022 a 31/12/2024	Horas
Clima			
Clima Exterior	TMY INMET 2018 – Série 867150 – Estação A001 - Brasília		
Clima Interior	Dados obtidos pela modelagem e simulação no EnergyPlus.		

Fonte: Elaborado pelos autores, baseado em dados do WUFI Pro.

Foram simulados dois tipos de parede de concreto aparente, considerando a parede interna sem acabamento e a parede externa com duas situações de acabamento: com e sem pintura acrílica. O Quadro 3 mostra os materiais aplicados na simulação e que foram obtidos na base de dados do WUFI Pro.

Quadro 3 – Caracterização dos sistemas construtivos e propriedades higrotérmicas do concreto.

Casos simulados	Caracterização	ρ	ε	μ	*Sd* (externo)	Orientação
		Kg/m³	m³/m³	[-]	[m]	[-]
SC1 Cimento 12/15	Espessura: 0,20 m Transmitância Térmica: 3,46 W/m².K	2200	0,18	92	Sem pintura	Norte Nordeste
SC2 Cimento 12/15	Espessura: 0,20 m Transmitância Térmica: 3,46 W/m².K	2200	0,18	92	0,3 para a camada de tinta acrílica	Norte Nordeste
SC3 Cimento 35/45	Espessura: 0,20 m Transmitância Térmica: 3,54 W/m².K	2200	0,18	248	Sem pintura	Norte Nordeste
SC4 Cimento 35/45	Espessura: 0,20 m Transmitância Térmica: 3,54 W/m².K	2200	0,18	248	0,3 para a camada de tinta acrílica	Norte Nordeste

Sendo: ρ = densidade; ε = porosidade; μ = fator de resistência à difusão de vapor de água; *Sd* = espessura da camada de ar de difusão equivalente. Fonte: Elaborado pelos autores, baseado em dados do WUFI Pro.

O fator de resistência à difusão de vapor de água (μ) é um valor adimensional inerente à propriedade do material. Se comparado dois materiais, quanto menor o valor de μ mais alta é a difusão ao vapor. Para caracterizar a camada de material (e), o valor da espessura da camada de ar de difusão equivalente é dado por $Sd = \mu . e$. As normas brasileiras não apresentam os valores para as propriedades higrotérmicas. Baseado na literatura e na base de dados do WUFI, foi adotado para a camada de tinta acrílica Sd = 0,3 m.

3.5. Simulação higrotérmica no WUFI Bio

Para mensurar os níveis de desenvolvimento dos fungos, a simulação foi realizada no WUFI Bio (extensão do WUFI Pro). Foram utilizados os critérios da ANSI ASHRAE 160:2013. A classe dos materiais utilizados para a parede com pintura recebeu a classificação mais sensível. Os modelos gráficos do tipo isopletas foram gerados por meio dos limites I e II, baseados na temperatura e umidade relativa. O primeiro limite indica substratos biodegradáveis, que são materiais mais sensíveis às ações de microrganismos e o segundo limite indica os substratos porosos - menos sensíveis (SEDLBAUER, 2001).

Os gráficos isopletas apresentam os trechos com os respectivos pontos de temperatura e umidade relativa, onde é possível identificar se os limites foram ultrapassados e qual a porcentagem com início de desenvolvimento dos fungos. A coloração é relacionada ao tempo de simulação, o amarelo marca o início do período simulado e o gradiente em verde vai escurecendo até chegar ao ano final simulado. O Quadro 4 mostra os critérios adotados pelo WUFI Bio para a classificação da taxa de crescimento de fungos.

Quadro 4 – Critérios para a classificação da taxa de crescimento de fungos.

Índice de crescimento de fungo (MGI)	Descrição da taxa de crescimento de fungos
0	Não há crescimento de fungos
1	Pequena quantidade de fungos na superfície visíveis ao microscópico, estágios iniciais de crescimento local
2	Várias colônias de fungos visíveis ao microscópico, em até 10% da superfície
3	Identificação visual de crescimento de fungos na superfície < 10% de cobertura, ou > 50 % de cobertura de fungos visíveis ao microscópio
4	Identificação visual do crescimento de fungos na superfície em 10 - 50 % de cobrimento, ou >50% de cobertura de fungos visíveis ao microscópio
5	Muito crescimento de fungos na superfície, > 50% de cobrimento visíveis a olho nu
6	Fungos visíveis a olho nu em 100% da superfície

Fonte: WUFI Bio

O índice de crescimento de fungos (Mould Growth Index - MGI) indica que valores inferiores a 1 não são preocupantes, entre 1 e 2 indicam possibilidade de desenvolvimento de fungos e acima de 2 indica potencial de degradação do sistema construtivo em relação ao crescimento de fungos (ANSI ASHRAE 160:2013; VIITANEN; OJANEN, 2007; SEDLBAUER, 2001).

4. RESULTADOS

A Tabela 1 e a Figura 2 mostram os resultados do comportamento higrotérmico dos sistemas e suas variações entre o teor de umidade em relação à resistência de difusão a vapor, obtidos nas simulações no WUFI Pro.

Tabela 1 – Valores do teor de umidade em relação ao fator de resistência a difusão a vapor.

	Norte com tinta	Nordeste com tinta	Norte sem tinta	Nordeste sem tinta	Norte com tinta	Nordeste com tinta	Norte sem tinta	Nordeste sem tinta
	SC2	SC2	SC1	SC1	SC4	SC4	SC3	SC3
	C12/15	C12/15	C12/15	C12/15	C35/45	C35/45	C35/45	C35/45
Fator de Resistência à Difusão de Vapor de Água [-]	92	92	92	92	248	248	248	248
Teor de Umidade Total Inicial [kg/m^3]	53	53	53	53	75	75	75	75
Teor de Umidade Total Máximo [kg/m³]	147,99	142,91	123,18	116,44	133,82	131,03	122,35	119,33
Teor de Umidade Total Final [kg/m³]	147,00	140,00	118,43	92,69	133,09	129,45	119,02	107,41

Fonte: Elaborado pelos autores, baseado em dados de saída do WUFI Pro.

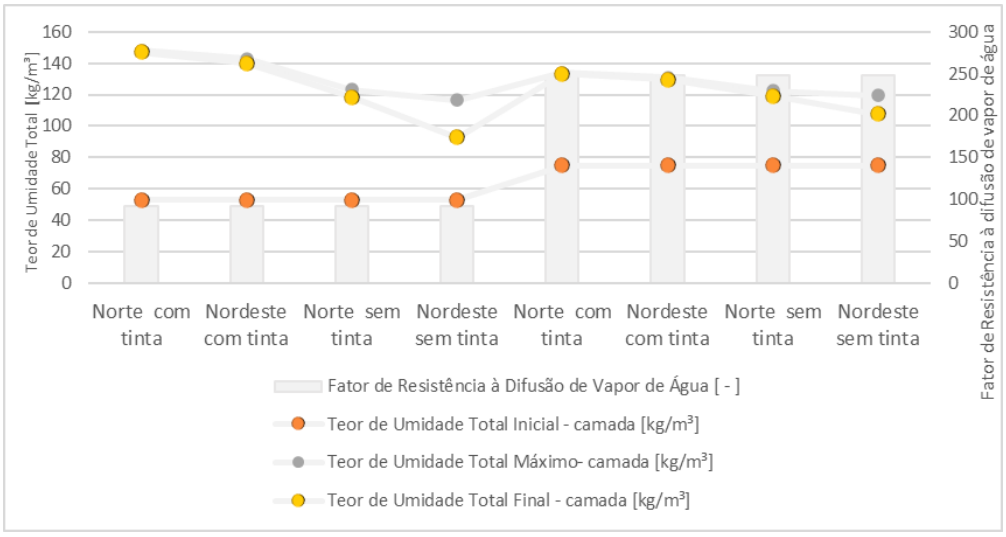


Figura 2 – Comparativo do comportamento higrotérmico do sistema e suas variações. Fonte: Os Autores.

O teor de umidade total inicial é constante entre os sistemas SC1 e SC2 (ambos C12/15), porém é mais elevado nos sistemas SC3 e SC4 (ambos C35/45) por terem um maior fator de resistência à difusão de vapor de água. A variação do teor de umidade final dos sistemas SC1 e SC2 para a fachada Norte apresentou um pico maior no sistema SC2 - com pintura externa. O fator de resistência à difusão ao vapor de água (μ) é um parâmetro higrotérmico relacionado à adsorção do material e influencia a capacidade de molhagem e secagem, observados pelos teores de umidade inicial e final.

Comparando os sistemas em relação às orientações, o SC2 (com tinta) apresentou o teor de umidade final mais elevado para a fachada Norte (maior chuva dirigida). O sistema SC4 (com tinta) apresentou um elevado teor de umidade para as fachadas Norte e Nordeste, comparado ao sistema SC3 (sem tinta). Os sistemas com a aplicação de pintura na superfície externa (tinta acrílica) indicam teores mais elevados quando comparados aos que não apresentam a camada de tinta. Isto ressalta que a pintura dificulta a evaporação da umidade e retem a água.

4.1. Índice de desenvolvimento de fungos

Em relação à envoltória das edificações, um dos efeitos da umidade são as manifestações patológicas e a proliferação de microrganismos como algas e fungos emboloradores. Os resultados da simulação no WUFI Bio mostram as condições dos níveis de desenvolvimento dos fungos. Os modelos gráficos avaliados são mostrados no Quadro 5 (gráfico 1 e gráfico 2).

Os gráficos apresentam os trechos com os respectivos pontos de temperatura e umidade relativa, onde é possível identificar se os limites foram ultrapassados e qual a porcentagem com início de desenvolvimento dos fungos. Observa-se que ambos os sistemas ultrapassam os limites I e II, apresentando resultados similares no modelo de isopletas. O sistema SC2 tem uma maior influência no desenvolvimento de fungos com a umidade relativa a partir de 90% comparado ao SC4 (89,4%), na fachada Norte.

O gráfico da Figura 3 mostra o resultado da simulação no modelo VTT (HUKKA; VIITANEN, 1990), que é uma extensão do WUFI Pro e apresenta os dados referentes à taxa de crescimento de fungos no ambiente interno, ao longo dos três anos de simulação (2022, 2023 e 2024).

Quadro 5 – Modelos gráficos para a avaliação dos índices de crescimentos dos fungos.

Gráfico 1 - Isopletas – sistema SC2 - Orientação Norte

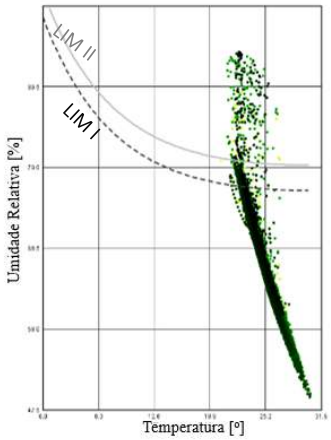
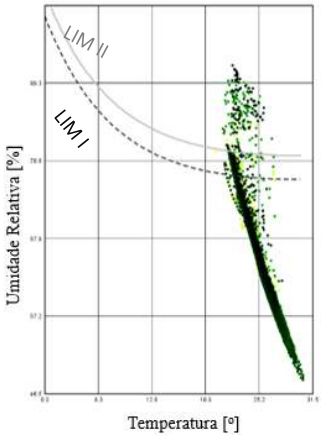


Gráfico 2 - Isopletas - sistema SC4 - Orientação Norte



Fontes: Adaptado do Mould Index – WUFI Bio.

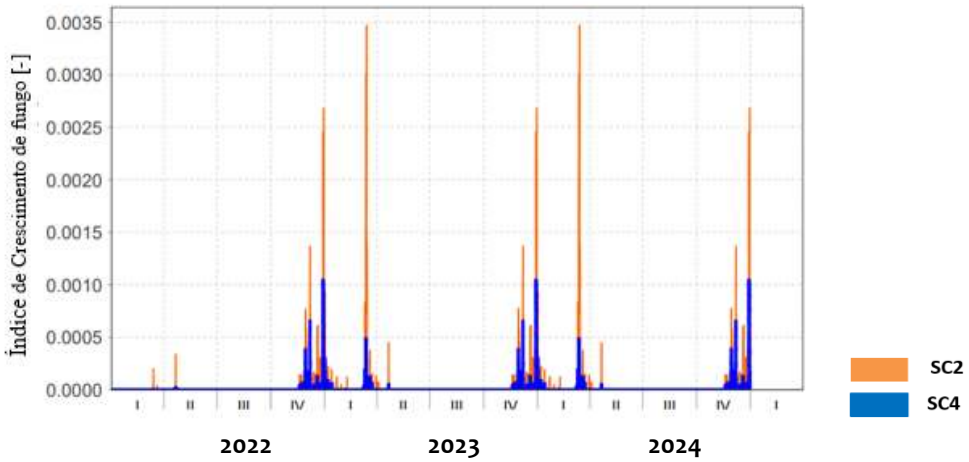


Figura 3 - Modelo de crescimento dos fungos, usando o gráfico do modelo VTT, nos 3 anos simulados no WUFI Pro.
Fonte: Os autores.

Nas simulações higrotérmicas, os sistemas SC2 e SC4 apresentaram os maiores teores de umidade, ambos na orientação Norte (fachada mais crítica à chuva dirigida em Brasília). Os índices apresentados no gráfico da Figura 3 revelam maior potencial de degradação pelo crescimento de fungos no sistema SC2. Ambos os sistemas estão classificados fora da zona de risco. No entanto, se comparado ao SC4, o sistema SC2 apresentou maior probabilidade de proliferação de fungos para a orientação Norte, devido ao menor fator de resistência à difusão de vapor de água e à superfície de concreto aparente com pintura, tornando-o mais suscetível à retenção de umidade.

5. CONCLUSÕES

Os resultados da simulação higrotérmica obtidos para os sistemas em concreto, no contexto climático de Brasília, permitiram verificar as características higrotérmicas dos elementos e compará-los. Entre os sistemas analisados, o sistema SC2 com acabamento externo em pintura e menor resistência à difusão do vapor de água apresentou maior potencial à degradação por presença de umidade, tanto na orientação Norte (maior chuva dirigida) como na orientação Nordeste. Em todos os casos, a fachada Norte apresentou maior teor de umidade que a fachada Nordeste, devido à influência da chuva dirigida mais intensa ao longo do ano.

Os sistemas SC2 e SC4, orientados à Norte, com acabamento externo em pintura, ambos apresentaram potencial ao desenvolvimento de fungos emboloradores, segundo os modelos utilizados. O sistema SC2 apresentou teores finais de umidade mais elevados. Mesmo com os resultados abaixo do módulo de desenvolvimento de fungos, com classificação inferior a 1, este sistema também apresentou maiores índices de proliferação para as duas fachadas analisadas. O sistema SC2 possui a menor resistência à difusão do vapor de água, mas a camada de pintura recebida impede a evaporação da água adsorvida, fornecendo uma barreira e, portanto, retendo o conteúdo de umidade.

Conclui-se que nem sempre a renovação e a proteção com pintura podem contribuir para a melhoria do desempenho dos sistemas construtivos. É preciso avaliar as propriedades higrotérmicas dos materiais,

visando beneficiar a qualidade do ambiente interno para os usuários e a vida útil das edificações. O desempenho higrotérmico, baseado nas características dos materiais e nas condições climáticas, deve ser considerado nas ações de conservação e manutenção dos edifícios que podem alterar a resposta higrotérmica do ambiente construído. Além da importância da simulação computacional, é fundamental as normativas técnicas com critérios, parâmetros e padrões para a simulação e a avaliação do comportamento higrotérmicos dos sistemas construtivos. Destaca-se, por fim, a importância das ações de conservação e manutenção predial alinhadas à preservação das características da materialidade e dos atributos arquitetônicos do edifício.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE - American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Handbook 2009 - Fundamentals. Atlanta, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220-1:2005: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.

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 AMBIENTECONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-14.

CABRERA, P.; SAMUELSON, H.; KURTH, M. Simulating Mold Risks under Future Climate Conditions. In: BUILDING SIMULATION, 2019, Rome, 2019. Proceedings […] Rome, 2019.

CRAWLEY, D. B.; LAWRIE, L. K. Development of Global Typical Meteorological Years (TMYx). Climate. One Building.Org, 2020. Disponível em: http://climateonebuilding.org. Acesso em abril de 2021.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN EN 15026 Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation. CEN, Brussels, Belgium, 2007.

ENERGYPLUS. Getting Started with EnergyPlus. Disponível em:https://energyplus.net/ Acesso em: 20 abril 2022.

GRADECI, K., LABONNOTE, N., TIME, B., AND KÖHLER, J. Mould growth criteria and design avoidance approaches in wood-based materials – A systematic review. Construction and Building Materials, 150 (Supplement C), p. 77-88, 2017.

GRADECI, K.; NOCENTE, A.; LABONNOTE, N.; RÜTHER, P. Impact of Climate Change in Building Envelope Design: The Performance to Withstand Mould Growth. In: International Conference on Durability of Building Materials and Components - XV DBMC, p.75-82. Barcelona, 2020.

HUKKA, A.; VIITANEN, H. A mathematical model of mould growth on wooden materials, Wood Science and Technology, 33(6), p. 475-485, 1999.

MENDES, N. Modelos para Previsão da Transferência de Calor e de Umidade em Elementos Porosos de Edificações. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997.

MORISHITA, C.; BERGER, J.; MENDES, N. Weather-based indicators for analysis of moisture risks in buildings. Science of the Total Environment, 709, p. 1348500, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134850

SANTOS, A. C. Avaliação do desempenho potencial de duas soluções de revestimentos argamassados em função do risco de formação de fungos emboloradores no interior de edificações na cidade de São Paulo. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2019. 193p.

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

TRECHSEL, H.R.; BOMBERG, M.T. Moisture control in buildings: the key factor in mold prevention. 2. ed., USA, ASTM, 2015.

VIITANEN, H. A.; OJANEN, T. Improved model to predict mold growth in building materials. Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whold Building X, Florida, USA, 2007.

VIITANEN, H.; KRUS, M.; OJANEN, T.; EITNER, V.; ZIRKELBACH, D. Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models. Energy Procedia, v. 78, p. 1425–1430, 2015.

WEBER, F.S; MELO, A.P; MARINOSKI D.L; LAMBERTS, R. Desenvolvimento de um modelo equivalente de avalição de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus - Anexos. Florianopólis, 2017. p 01-52.

ZANONI, V. A. G. Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília. 2015. 293 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

ZANONI, V. A. G.; DANTAS, A. L. de F.; NUNES, L. S.; RIOS, R. B. Estudo higrotérmico na autoconstrução: simulação computacional e medições em campo. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 109-120, jul./set. 2020. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. http://dx.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, Campinas, v. 9, n. 2, p. 122-132, jun. 2018.

AGRADECIMENTOS
Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade de Brasília e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) pelos recursos financeiros aplicados nas bolsas de Iniciação Científica e auxílio financeiro aos pesquisadores.