

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

BERNARDO YUKI GRAFULIN

**ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE VEDAÇÃO VERTICAL SOB
A ÓTICA DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO NAS DIFERENTES
ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS**

Porto Alegre
dezembro de 2021

BERNARDO YUKI GRAFULIN

**ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE VEDAÇÃO VERTICAL SOB A
ÓTICA DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO NAS DIFERENTES ZONAS
BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Lais Zucchetti
Orientadora: Fernanda Lamego Guerra

Porto Alegre
dezembro de 2021

BERNARDO YUKI GRAFULIN

**ANÁLISE COMPARATIVA DE SISTEMAS DE VEDAÇÃO VERTICAL SOB A
ÓTICA DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO NAS DIFERENTES ZONAS
BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do
título de ENGENHEIRO CIVIL

Porto Alegre, dezembro de 2021

Prof.^a Lais Zucchetti
Dra. Pela Universidade Federal do Grande
do Sul
Orientadora

Prof.^a Fernanda Lamego Guerra
Dra. Pela Universidade Federal do Grande
do Sul
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Caroline Giordani
UFRGS
Ma. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

Roberta Casarin
UFRGS
Ma. pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

RESUMO

O conhecimento sobre o comportamento higroscópico dos materiais permite entender melhor a forma com que os fluxos de calor e umidade ocorrem, possibilitando a otimização do desempenho de uma construção, o aumento de sua eficiência energética, a durabilidade, a resistência a danos etc. Nesse contexto, simulações computacionais são utilizadas para estimar a performance de uma edificação sujeita à ação de agentes atmosféricos. Neste trabalho utilizou-se o software WUFI® com o objetivo de avaliar o comportamento higrotérmico de edificações com diferentes sistemas de vedação vertical: em alvenaria convencional com bloco cerâmico (AC), *light steel frame* (LSF) e paredes de concreto (PC). Para a análise considerou-se as oito condições bioclimáticas brasileiras, sendo, para cada uma delas, uma cidade representativa, conforme proposto na NBR 15220-3 (ABNT, 2005). A partir da simulação, pôde-se comparar o desempenho higrotérmico e a probabilidade de crescimento de fungos entre os diferentes sistemas construtivos, para as mesmas condições de exposição climática. Os resultados mostraram que o sistema LSF não atinge níveis de umidade que criem condições suscetíveis ao crescimento de fungos, além de apresentar a menor variabilidade térmica com relação às oscilações externas. Os sistemas AC e PC tiveram resultados inferiores ao LSF, principalmente considerando situações extremas de temperatura e umidade, onde demonstraram maior sensibilidade, ocorrendo alta amplitude térmica diária e níveis de umidade que proporcionam condições favoráveis ao desenvolvimento de microrganismos, sugerindo cautela e maior atenção na adoção destes sistemas.

Palavras-chave: Simulação higrotérmica, WUFI®, sistemas de vedação vertical, alvenaria convencional, light steel frame, parede de concreto.

ABSTRACT

Knowledge about the materials hygroscopic behavior allows to understand the way which heat and moisture fluxes occur, enabling the optimization of a building's performance, increasing its energy efficiency, durability, resistance to damage, etc. In this context, computer simulations are used to estimate the building performance exposed to atmospheric agents. The WUFI® software was used to evaluate the hygrothermal behavior of buildings with different external vertical sealing systems: in conventional masonry (AC), light steel frame (LSF) and concrete walls (PC). For the analysis, different climatic conditions were considered, characterized by the Brazilian bioclimatic zoning, divided into eight zones, and for each of them, a representative city was chosen, as proposed by the Brazilian performance standard, NBR 15220-3 (ABNT, 2005). From the simulation, it was possible to compare the hygrothermal performance and the probability of mould growth between the different systems for the same bioclimatic exposure conditions. The results showed that the LSF system does not reach humidity levels that create conditions susceptible to mould growth, in addition to presenting the lowest thermal variability in relation to external oscillations. The AC and PC systems had inferior results than LSF, mainly considering extreme situations of temperature and humidity, where they demonstrated greater sensitivity, with high daily thermal amplitude and humidity levels that provide favorable conditions for the microorganism's development, suggesting caution and greater attention in adoption of these systems.

Keywords: *higrothermal simulation, WUFI®, building sealing system, conventional masonry, light steel frame, concrete walls.*

1. INTRODUÇÃO

A construção civil teve, por muitos anos, seu desenvolvimento desacelerado, com a manutenção de práticas artesanais, pouca padronização e precisão quando comparado ao de outros setores, como por exemplo, a indústria automotiva, que desenvolve suas atividades em fábricas, com métodos de montagem e projetos cada vez mais inovadores.

Nos últimos anos, porém, esse cenário vem se alterando com o desenvolvimento de novos métodos construtivos, utilização de materiais mais eficientes e ferramentas que atuam em vários níveis do ciclo de vida da edificação, da concepção à execução. Com isso, aumenta-se a diversidade de soluções, cabendo ao projetista a tomada de decisão, respeitando as condições mínimas expostas na norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013).

Cada solução deve ser analisada individualmente para garantir o desempenho, considerando os diferentes aspectos que norteiam a adoção de sistemas construtivos, tais como habitabilidade, segurança, impacto ambiental, economicidade etc. Também é relevante identificar que o Brasil, com suas dimensões continentais, apresenta realidades diversas, que requerem a adoção de sistemas construtivos específicos, considerando peculiaridades regionais, principalmente considerando o requisito de habitabilidade e o impacto relacionado à origem de manifestações patológicas pela escolha inadequada de sistemas construtivos.

Tendo isso em vista, a avaliação do desempenho higrotérmico de sistemas construtivos, através de simulações computacionais, serve como método de previsão do comportamento do sistema. As simulações higrotérmicas compreendem variáveis como as características do sistema (espessuras, materiais e propriedades das camadas) e fatores climáticos (obtidos de dados históricos por localidade). Como resultado, obtêm-se dados mensuráveis sobre as interações (sistema construtivo *versus* zona) que possibilitam a criação de comparativos entre soluções, sendo uma ferramenta para o projetista. Além disso, permitem identificar a possibilidade de surgimento de manifestações patológicas relacionadas à habitabilidade das edificações, conforme NBR 15575 (ABNT, 2013).

Neste contexto, este trabalho visa analisar comparativamente o desempenho higrotérmico de três diferentes sistemas construtivos, convencionais e industrializados, considerando diferentes zonas bioclimáticas do território brasileiro através de simulação computacional, utilizando o software WUFI®. Este método permite avaliar, ainda na etapa de concepção do projeto, soluções mais adequadas, de forma a atender os requisitos de habitabilidade (conforto térmico, iluminação, ventilação, conforto acústicos, etc.) e minimizar a possibilidade de manifestações patológicas que, por sua vez, acarretem em alterações estéticas nos elementos, colonização biológica, manchas ou ainda possam ocasionar modificações estruturais por meio da manifestação de fissuras (HERRMANN *et al.*, 2019)

2. MÉTODO

O método adotado consiste na realização de simulações computacionais a fim de analisar o desempenho higrotérmico de sistemas de vedação verticais externos (alvenaria convencional, *light steel frame* e paredes de concreto), através do modelo de cálculo proposto no software WUFI® (*Wärme Und Feuchte Instationär*), para as oito regiões bioclimáticas brasileiras, e realizar uma posterior análise dos resultados com o objetivo de

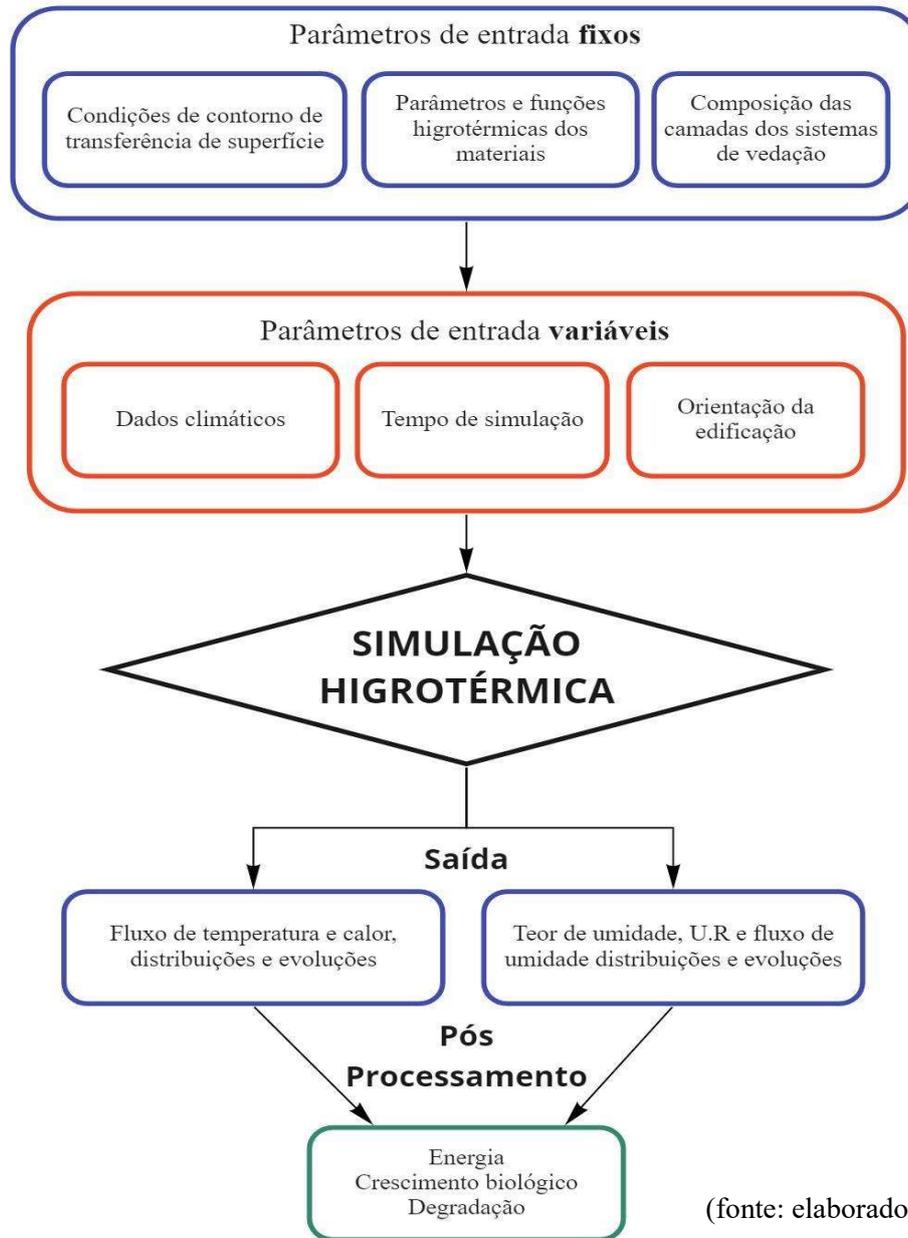
avaliar e comparar o comportamento dos sistemas para as diferentes condições de exposição climáticas.

O método de cálculo utilizado pelo *software* leva em conta uma análise conjunta de transporte de calor e umidade através das camadas que compõem um sistema de vedação vertical exposto à determinadas condições de contorno, envolvendo parâmetros climáticos e fatores relacionados à orientação geográfica e condições de exposição da fachada (WUFI®, 2020). Como fator decisivo nesse estudo, os parâmetros climáticos necessários para avaliação da evolução temporal da distribuição de temperatura e umidade consideram a incidência de radiação solar, chuva, temperatura e umidade relativa ao longo de um ano típico (TMY – *Typical Meteorological Year*) cujos dados são coletados em estações meteorológicas e obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

As simulações no WUFI® são geralmente realizadas a fim de obter uma visão sobre o desempenho de uma construção, sua durabilidade ou sua resistência, relacionados ao comportamento higrotérmico. No entanto, os cálculos do WUFI® fornecem os resultados em termos de conteúdo de água, temperaturas, fluxos de umidade, entre outros. Esses dados numéricos precisam ser avaliados para permitirem análises adequadas sobre as propriedades operacionais dos componentes dos sistemas (WUFI®, 2020).

Como requisito para realização das simulações higrotérmicas são necessários dados de entrada relativos ao modelo da edificação, sistema de vedação e materiais, posição geográfica e condições de transferência superficial. Os parâmetros de entrada foram separados em dois grupos, em que o primeiro deles envolve os dados que se mantêm fixos em todos os casos simulados, enquanto no segundo grupo estão os parâmetros que variam em cada simulação, como as diferentes zonas bioclimáticas, e a orientação da fachada em cada uma das zonas. Após realizadas as simulações, são obtidos resultados em termos de fluxo de temperatura e de umidade, distribuições temporais de temperatura e teor de umidade dentro do sistema. A combinação dos resultados, permite, com a utilização do *plug-in Mould Index VTT*®, identificar se existem condições que propiciam o desenvolvimento de fungos no substrato. Uma síntese do método aplicado é mostrada na Figura 1 e os itens são discutidos mais detalhadamente nas seções subsequentes.

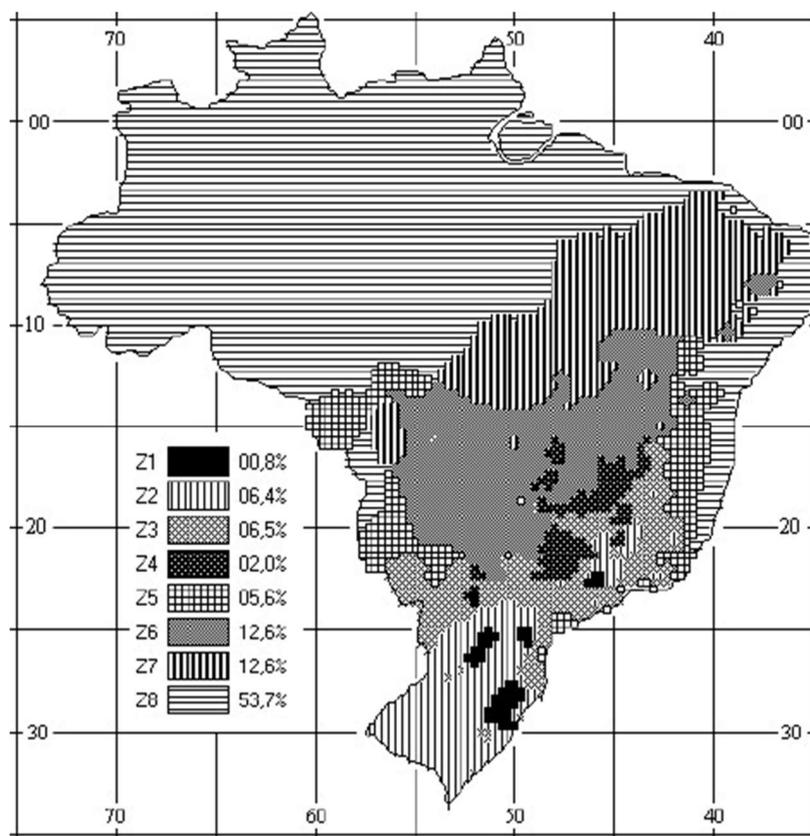
Figura 1 - Síntese do método aplicado



2.1. ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO

O Brasil é subdividido em oito zonas bioclimáticas, propostas na norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013). Para realização das simulações foram selecionados oito municípios como forma de representar cada uma destas regiões. A NBR 15220-3 (ABNT, 2005) define o zoneamento (apresentado na Figura 2) através de três parâmetros principais: médias mensais das temperaturas máximas, médias mensais de temperaturas mínimas, e as médias mensais da umidade relativa do ar.

Figura 2 - Zoneamento bioclimático brasileiro



(fonte: NBR 15220-3)

A divisão do território, com base nestes parâmetros climáticos, é questionada em Bavaresco *et al.* (2017), pois existem cidades com características climáticas significativamente distintas classificadas em uma mesma zona bioclimática. Martins *et al.* (2012) ressalta que o uso de médias mensais pode produzir distorções na interpretação dos dados, sobretudo em regiões que apresentam amplitudes anuais e sazonais importantes, e os autores sugerem também a criação de subzonas ou zonas de transição que considerem distinções, por exemplo, entre regiões quentes e secas e regiões quentes e úmidas, além da possibilidade de estabelecer um zoneamento sazonal. Amorim (2017) cita também que propostas de zoneamento em regiões territorialmente abrangentes, como o atual zoneamento, podem não representar tão bem as condições climáticas, englobando locais com relevo e disponibilidade de ventos distintos em uma mesma região, o que pode mascarar condições climáticas significativas na adoção de estratégias de desempenho.

O Quadro 1 apresenta os municípios definidos, neste trabalho, para representar cada zona bioclimática, o estado a que pertencem, o código da estação meteorológica na qual os dados climáticos foram obtidos e o período de coleta de dados das estações para caracterizar um ano meteorológico típico (TMY).

Quadro 1 - Municípios definidos para representação das zonas bioclimáticas

Zona	Estado	Município	Código da estação	Período de coleta de dados
1	PR	Curitiba	838400	2003-2017
2	RS	Uruguaiana	869730	2004-2018
3	RS	Porto Alegre	839710	2003-2017
4	DF	Brasília	833780	2003-2017
5	SP	Santos	838180	2003-2017
6	MS	Campo Grande	836120	2003-2017
7	MT	Cuiabá	833620	2003-2017
8	RJ	Rio de Janeiro	837550	2003-2017

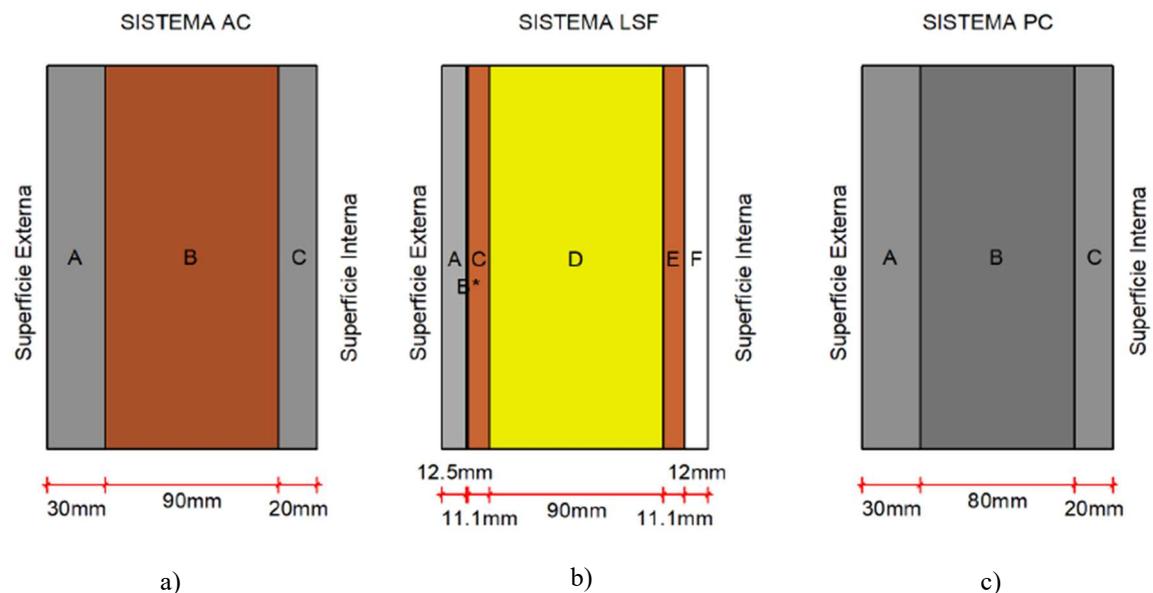
(fonte: elaborado pelo autor)

2.2. SISTEMAS E MATERIAIS

Foram analisados três diferentes tipos de SVVE, sendo eles alvenaria convencional (AC), *Light Steel Frame* (LSF) e o método construtivo em paredes de concreto (PC), por serem sistemas usualmente utilizados no Brasil e no caso do LSF, apesar da menor popularidade no país, por possuir um vasto mercado no exterior. A Figura 3 ilustra as soluções adotadas na composição dos perfis.

Já no Quadro 2, pode-se observar os materiais e espessuras adotados para cada sistema. A escolha dos materiais empregados foi dada em duas etapas, sendo a primeira delas a investigação em catálogos, manuais técnicos e referenciais teóricos, onde é possível encontrar dados das propriedades físicas dos materiais e sua aplicabilidade.

Figura 3 - Perfil de Sistema de Vedação Vertical Externo; a) Sistema Alvenaria Convencional (AC); b) Sistema Light Steel Frame (LSF); c) Sistema Paredes de Concreto (PC).



(fonte: elaborado pelo autor)

Quadro 2 - Descrição das camadas que compõem os sistemas.

Sistema AC - Alvenaria convencional		
	Material	Espessura (mm)
A	Argamassa Externa	30
B	Bloco Cerâmico	90
C	Argamassa Interna	20
Sistema LSF - Light Steel Frame		
	Material	Espessura (mm)
A	Placa Cimentícia	12,5
B	Membrana Impermeável	0,1
C	Placa OSB	11,1
D	Lã mineral	90
E	Placa OSB	11,1
F	Placa de Gesso	12
Sistema PC - Paredes de concreto		
	Material	Espessura (mm)
A	Argamassa Externa	30
B	Concreto C35/C45	80
C	Argamassa Interna	20

(fonte: elaborado pelo autor)

A segunda etapa, visando a obtenção dos valores das propriedades higrotérmicas dos materiais, foi realizada através de aproximações dos materiais previamente selecionados com materiais similares que constam no banco de dados do software, prática incentivada no manual do programa devido à dificuldade de obtenção de determinados parâmetros (WUFI®, 2020). Os parâmetros adotados são apresentados na Tabela 1.

Especificamente os parâmetros das argamassas interna e externa e do bloco cerâmico foram obtidos dos ensaios de Kleber (2018) para sistemas construtivos tipicamente utilizados no país, enquanto os demais materiais foram consultados no banco de dados do WUFI®. Os parâmetros do concreto, placa cimentícia, lã mineral, placa OSB e membrana polimérica foram medidos no IBP – *Fraunhofer Institute for Building Physics*, e a placa de gesso na Universidade de *Lund*, Suécia.

Tabela 1 - Parâmetros físicos dos materiais utilizados.

Parâmetros Materiais		Argamassa Externa	Argamassa Interna	Bloco Cerâmico	Concreto C35/C45	Placa Cimentícia	Lã mineral	Placa de Gesso	Placa OSB	Membrana polimérica
		Sistema AC e PC	AC e PC	AC	PC	LSF	LSF	LSF	LSF	LSF
Densidade aparente [kg/m ³]	ρ	1755	1755	578	2200	1117	60	625	643	130
Porosidade [m ³ /m ³]	ξ	0,21	0,21	0,486	0,18	0,48	0,95	0,706	0,57	0,001
Calor específico [J/kgK]	c	850	850	850	850	840	850	870	1400	2300
Condutividade Térmica [W/mK]	λ	0,8	0,8	0,158	1,6	0,255	0,04	0,16	0,12	2,3
Fator de resistência à difusão de vapor d'água [m]	μ	28	28	23	248	28	1,3	7,03	276	50000
Teor de umidade de referência [kg/m ³]	Wref	26	26	13	75	43	-	26,3	97,5	-
Umidade de saturação livre [kg/m ³]	Wf	210	210	193	147	350	-	430	542	-
Coefficiente de absorção de água	-	0,0039	0,039	0,09	0,009	0,013	-	0,0019	0	-
Umidade Interna típica [kg/m ³]	-	30,7	30,7	80	116,29	45	-	10	80	-

(fonte: elaborado pelo autor)

2.3. COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA SUPERFICIAL

A relação entre as camadas superficiais do SVVE e o ambiente no qual se encontram são ditadas, no modelo de cálculo, por coeficientes de transferência superficial que expressam o grau em que as condições de entorno afetam o sistema através do transporte de calor e umidade entre suas camadas.

Segundo Bauer (1987), a penetração da água da chuva incidente nas fachadas relaciona diversos fenômenos físicos os quais regem o comportamento dos materiais porosos quando sofrem a solicitação de cargas pluviais. Conforme Kazmierczak (1989), quando uma gota de chuva bate na superfície da fachada e se divide, as gotículas resultantes podem penetrar em aberturas com diâmetro superior a 5mm, devido à energia cinética da gota. Em aberturas com diâmetro menor que 0,5 mm, ocorre a ação da sucção capilar. Se houver interligação entre os vasos capilares, poderá haver percolação de água por todo o sistema de vedação (HATTGE, 2004).

A intensidade de chuva incidente na fachada da edificação é calculada pelo modelo proposto pelo WUFI®, através da Equação 1. O coeficiente R1 é dependente da inclinação da superfície enquanto o coeficiente R2 está relacionado à influência causada pelas edificações vizinhas na carga de chuva incidente. Os valores de R1 e R2 podem ser definidos por meio de medições locais para resultados mais precisos, contudo, estudos de Karagiozis e Hadjisophocleous (1997), com simulações fluidodinâmicas, propõem o valor de R1 nulo para superfícies a 90° em relação ao solo e R2 com valor 0,1 para edificações com altura entre 10 a 20 metros. Mantendo a coerência em todas as simulações, foram adotados os valores sugeridos na referência em todos os casos.

$$I = P * (R1 + R2 * Vo) \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

I = Intensidade de chuva, em mm/h;

P = Precipitação, em mm/h;

R1 = Coeficiente dependente da inclinação da superfície;

R2 = Coeficiente dependente da altura da edificação;

V₀ = Velocidade do vento, em m/s.

Uma prática recomendada pelo software é a redução da chuva incidente na fachada considerando a parcela de chuva que incide na superfície externa e é repelida no impacto. O cálculo para definição da carga de chuva resultante é dado pelo produto da chuva incidente e um fator de aderência da chuva (Fr), relacionado ao ângulo de inclinação da superfície considerada, com valor igual a 0,7 dado pelo *software* para superfícies à 90° em relação ao solo (Equação 2).

$$C = I * Fr \quad \text{(Equação 2)}$$

Onde:

C = Carga de chuva resultante, em mm/h;

I = Intensidade de chuva, em mm/h;

Fr = Fator de redução da chuva incidente.

A presença de pintura como revestimento interno e externo tem influência na performance do sistema, entretanto a consideração dos efeitos de sua aplicação é analisada de forma distinta das outras camadas. A ação da pintura pode ser entendida como um fator de resistência à difusão de vapor na camada superficial do sistema, e o método de cálculo apresentado no WUFI utiliza-se de um fator *sd-value* para simular os efeitos da camada de tinta aplicada. O coeficiente *sd* pode ser definido como a espessura de uma camada de ar cujo efeito de resistência equivale à camada de revestimento (WUFI, 2020). Os valores de *sd* podem variar em intervalos de 0,02m a 1m, de acordo com o tipo de material utilizado para tintas em paredes (ŠADAUSKIENÉ *et al.*, 2007). Optou-se por utilizar neste estudo o valor igual a 0,5m para pintura externa e interna, simulando a aplicação de tinta acrílica em duas camadas. O mesmo valor foi utilizado por Kleber (2018) em seu estudo de argamassas com pintura.

Quanto à relação superficial com a temperatura do ambiente, atuam fatores como a resistência térmica superficial que, apesar de depender das condições locais atuais, é usualmente simplificada e, conforme a tabela A.1 da NBR 15220-2 (ABNT, 2005), foi adotado o valor de 0,13m²K/W como resistência superficial interna e 0,04 m²K/W como resistência superficial externa. O desenvolvimento das simulações depende também do ambiente interno da edificação, podendo ser obtido por medições de temperatura e umidade, caso o objetivo seja prever situações para edificações já existentes, ou estimados em modelos baseados nas normas ANSI ASHRAE 160:2009, DIN EN ISO 13788:2012 e DIN EN 15026:2007. Adotou-se a metodologia ASHRAE 160 standard (2009) por se adaptar melhor às condições bioclimáticas brasileiras devido à flexibilidade do tratamento das amplitudes térmicas e de umidade relativa (KLEBER, 2018).

2.4. TEMPO DE CICLO

A repetição das simulações teve por objetivo a obtenção da convergência dos dados em determinados pontos, observando os máximos e mínimos até que a variação dos valores fosse razoavelmente pequena. O tempo mínimo de simulação adotado foi de 5 anos. No caso das zonas 2, 7 e 8 observou-se a convergência em apenas 3 anos, enquanto na zona 1 foi preciso simular um período de 10 anos. O Quadro 3 apresenta o período simulado em cada zona, assim como a orientação com maior incidência de chuva, onde o tempo de equilíbrio se mostrou superior entre as orientações.

Quadro 3 - Período de simulação em cada cidade

Zona	Estado	Cidade	Orientação	Período
1	PR	Curitiba	Leste	2021-2030
2	RS	Uruguaiana	Leste	2021-2025
3	RS	Porto Alegre	Leste	2021-2028
4	DF	Brasília	Norte	2021-2025
5	SP	Santos	Sul	2021-2026
6	MS	Campo Grande	Leste	2021-2025
7	MT	Cuiabá	Norte	2021-2025
8	RJ	Rio de Janeiro	Oeste	2021-2025

(fonte: elaborado pelo autor)

2.5. TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

Segundo Cavalcanti (2020), em geral, a transmitância (U) e resistência térmica (R) são usados nas regulamentações de construção em todo o mundo para prescrever níveis mínimos de isolamento na envoltória de edifícios, para que sejam consideradas com desempenho termoenergético aceitável. No Brasil, são vigentes duas normas que consideram o desempenho térmico de edificação, a NBR 15220 (ABNT, 2005) que traz, entre outras informações, definições e métodos de cálculo de características térmicas dos materiais, enquanto a NBR 15575 (ABNT, 2013) tem seu escopo focado nos requisitos do usuário, com critérios relativos ao desempenho térmico, acústico, lumínico, de segurança, entre outros.

A NBR 15575 (ABNT, 2013) define transmitância térmica como a transmissão de calor em unidade de tempo, através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo, considerando as superfícies interna e externa. A NBR 15220 (ABNT, 2005) tem estabelecido a transmitância térmica ou coeficiente global de transferência de calor como o inverso da resistência térmica total e representa-o como valor-U em termos de $W/(m^2K)$.

Ambas as normas trazem classificações de desempenho e requisitos mínimos julgados a partir da transmitância térmica e capacidade térmica dos sistemas de fechamento dados para cada zona bioclimática brasileira (Tabela 2), entretanto, segundo Ferreira (2017), apesar do embasamento fundamentado no zoneamento bioclimático, existem incongruências entre os valores-limite de cada norma para uma mesma zona. O autor ainda aponta diversos estudos que explicitam a discrepâncias entre os valores-limite normativos estabelecidos, o bom desempenho térmico da edificação e o conforto térmico do usuário.

O coeficiente α representa a absorvância térmica, a parcela incidente de radiação solar (ondas curtas) que é absorvida pelo componente. O anexo B da NBR 15220-2:2005 aponta valores de α de acordo com o tipo de superfície externa, sendo que, foi adotado, nesta pesquisa, o valor 0,2 para pinturas com cor clara. Os valores de transmitância térmica dependem apenas dos componentes do sistema, tendo o mesmo valor em todas as zonas.

Tabela 2 - Resumo dos critérios de desempenho mínimo para transmitância térmica, segundo as normas NBR 15575, (2013) e NBR 15220, (2005)

Requisitos de desempenho térmico de Transmitância Térmica								
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
NBR 15575	$U \leq 2,50$		$U \leq 3,70$ para $\alpha \leq 0,6$ $U \leq 2,50$ para $\alpha > 0,6$					
NBR 15220	$U \leq 3,00$		$U \leq 3,60$	$U \leq 2,20$	$U \leq 3,60$	$U \leq 2,20$		$U \leq 3,60$

(fonte: elaborado pelo autor)

Os valores de transmitância e resistência térmica foram calculados para cada sistema e utilizados como parâmetro para análise do desempenho térmico, apresentados na seção 3.3.

2.6. TÉCNICA DE PÓS-PROCESSAMENTO

Após realizada a simulação higrótérmica, foi possível correlacionar as condições de temperatura e umidade na superfície interna dos sistemas de vedação para a análise e verificação da possibilidade de crescimento de microrganismos que afetam a durabilidade da edificação. Uma definição moderna de durabilidade é: “A capacidade da estrutura de ter um desempenho mínimo durante determinado tempo de serviço sob a influência de mecanismos de degradação.” (ISAKSSON *et al.*, 2010, p. 1712). Assim, o tempo de exposição e sensibilidade do substrato ao crescimento de fungos, conjuntamente às condições de temperatura e umidade são fatores determinantes na estimativa do risco de desenvolvimento destes microrganismos.

A norma alemã DIN 4108-2:2003 especifica um valor crítico de umidade relativa igual a 80% na superfície interna sob uma temperatura próxima de 12,6°C como uma condição suscetível ao crescimento de fungos e, em temperaturas mais altas, cerca de UR 75%.

Alguns critérios limítrofes são assumidos pela norma ANSI ASHRAE 160:2009, adaptados de *IEA Annex 14 (1991)*, que possibilitam avaliar o índice de desenvolvimento de fungos, através de condições em que não se é esperado o crescimento de microrganismos. Os critérios são apresentados no Quadro 5. Os autores da norma entendem que as condições abordadas são complexas, podendo variar de acordo com as espécies de fungos encontradas na região, além de outros parâmetros não mencionados. Entretanto, é necessário equalizar a complexidade da realidade com a necessidade de simplificar a padronização, permitindo a utilização de critérios menos rigorosos quando se avalia materiais naturalmente mais resistentes ao crescimento de fungos, como concreto, alvenaria, vidro e metais.

Para avaliação da taxa de crescimento de fungos através da ANSI ASHRAE 160:2009 é necessário definir a sensibilidade do substrato da superfície interna, conforme disponibilidade nutricional a estes microrganismos. O modelo utilizado propõe a classificação através de quatro classes de sensibilidade dos materiais, definidas por diversos estudos (T. OJANEN *et al.*, 2010; T. OJANEN *et al.*, 2011; H. A. VIITANEN *et al.*, 2010;

H. A. VIITANEN *et al.*, 2011). A adoção da pintura como revestimento interno, comum aos três sistemas, classifica-os como sensíveis ao desenvolvimento de fungos. As classes de sensibilidade de outros materiais comuns em revestimentos são mostradas no Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação da sensibilidade dos materiais ao desenvolvimento de fungos

Classificação de sensibilidade	Materiais
Muito sensível	Madeira não tratada, dispõe de elevada quantidade de nutrientes para crescimento biológico
Sensível	Placas de madeira, madeira aplainada, produtos de revestimento à base de papel
Mediamente resistente	Fibras minerais, materiais à base de cimento ou plástico
Resistente	Vidro e materiais metálicos ou compostos que sofreram tratamento adequado

(fonte: ANSI ASHRAE 160:2009)

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

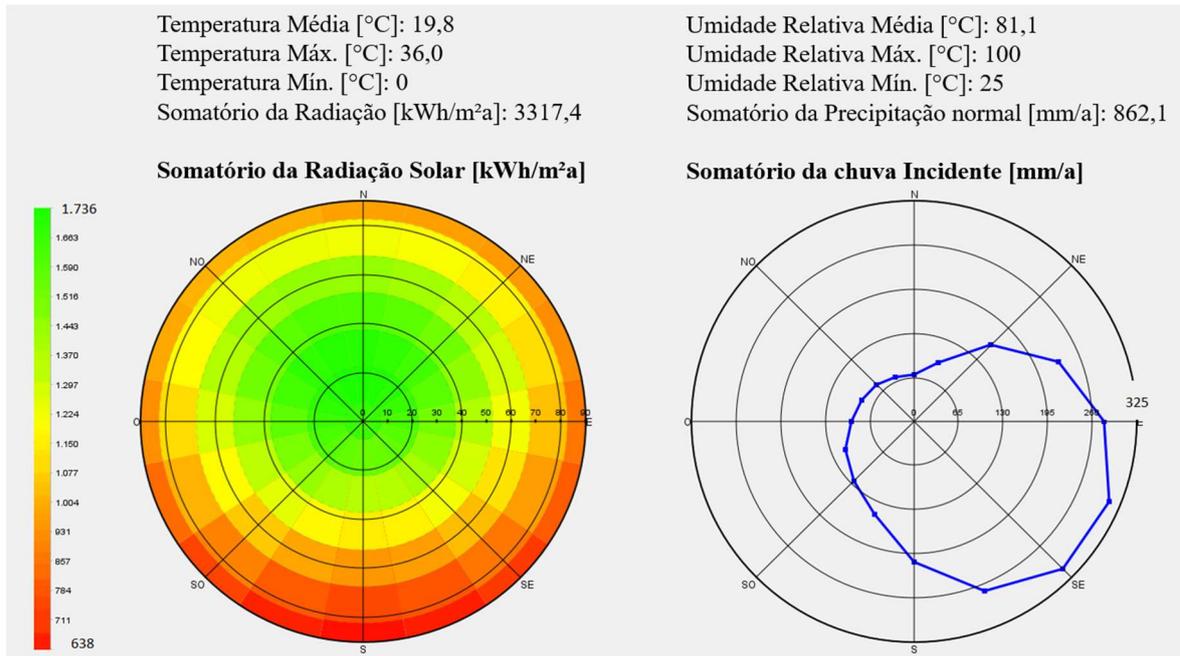
A seguir serão apresentados os principais resultados obtidos das análises desenvolvidas nos sistemas propostos para as zonas bioclimáticas brasileiras, com relação ao teor de umidade, perfil de umidade, transmitância térmica e índice de crescimento de fungos.

3.1. TEOR DE UMIDADE

Um dos resultados possíveis de ser obtido através de simulação higrotérmica é o teor de umidade total do sistema e individual de cada componente. Através dos gráficos da variação de teor de umidade em função do tempo é possível identificar a condição de equilíbrio e o ciclo do sistema em determinada região. Foram obtidos resultados de teor de umidade de todos os casos simulados, a seguir é apresentado alguns casos de maior destaque. Uma análise da influência da orientação da fachada pode ser feita através da observação das cidades de Porto Alegre (zona 3) e Brasília (zona 4).

Em cada orientação da fachada tem-se diferentes curvas de teor de umidade, providas pela variabilidade da incidência de radiação solar, chuva dirigida e direção do vento. A Figura 4 a) e b), traz diagramas de incidência solar e de chuva, respectivamente, em função da orientação geográfica, para Porto Alegre, Zona 3, como exemplo. Nos gráficos pode-se notar a diferença, quando se considera as orientações Sul e Leste, onde a incidência de chuva prevalece, enquanto a orientação Norte está sujeita a maior incidência solar e menor índice chuva dirigida.

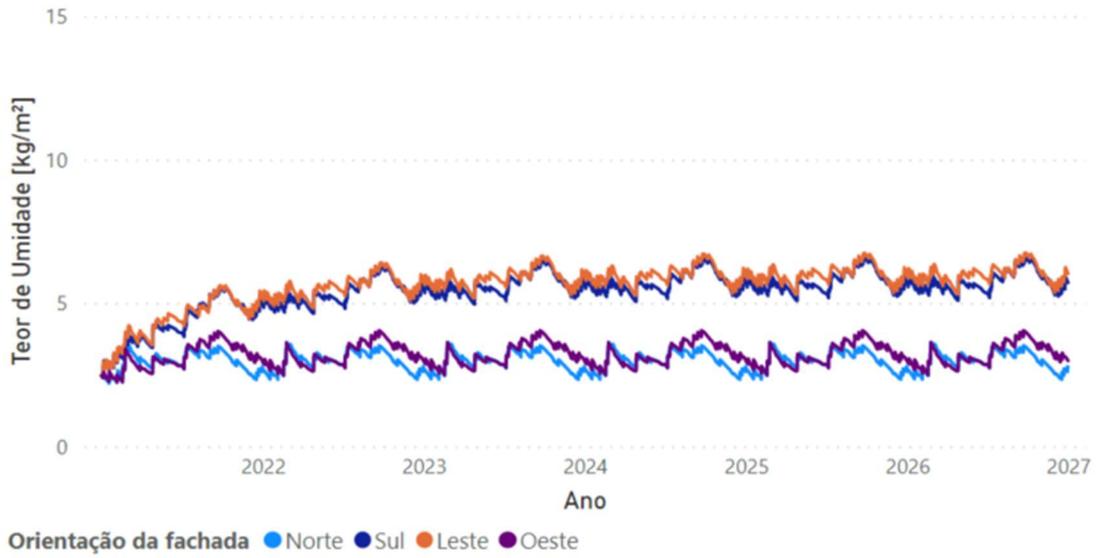
Figura 4 - Análise da radiação e chuva dirigida para Porto Alegre (RS) - Zona 3. a) Somatório da radiação incidente [kWh/m²a]; b) Somatório da chuva incidente [mm/a].



a) (fonte: adaptado de WUFI®, 2020) b)

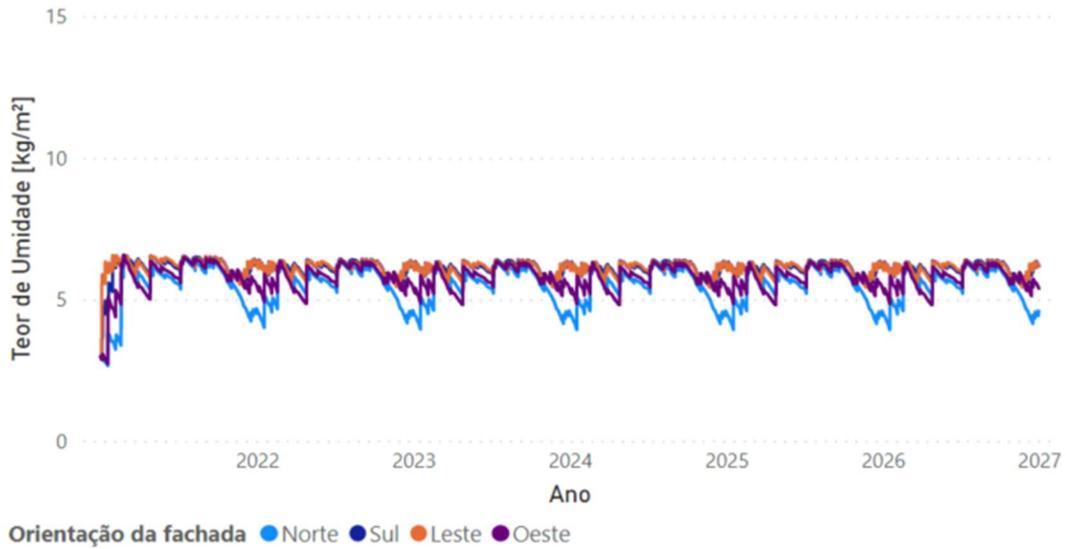
As Figura 5 a 7 caracterizam a distribuição do teor de umidade total em termos de massa de água (kg) distribuída em 1 m² de área do sistema ao longo do tempo para AC, LSF e PC respectivamente, para Porto Alegre (zona 3). É notável a diferença de absorção de água de cada sistema, devido à composição de suas camadas e a capacidade de cada material de reter umidade. Os sistemas AC e PC apresentam o curso temporal semelhante, entretanto, os valores absolutos de conteúdo de água do PC são superiores ao sistema AC. Neste caso, a diferença é dada na camada interior do sistema, passível de análise através do perfil de umidade, onde é observada a maior retenção de água no concreto em relação ao bloco cerâmico. O sistema LSF apresenta o comportamento mais regular ao longo do ano e quando consideradas as orientações de fachada.

Figura 5 - Distribuição do teor de umidade [kg/m²] no sistema AC ao longo do tempo em Porto Alegre (zona 3).



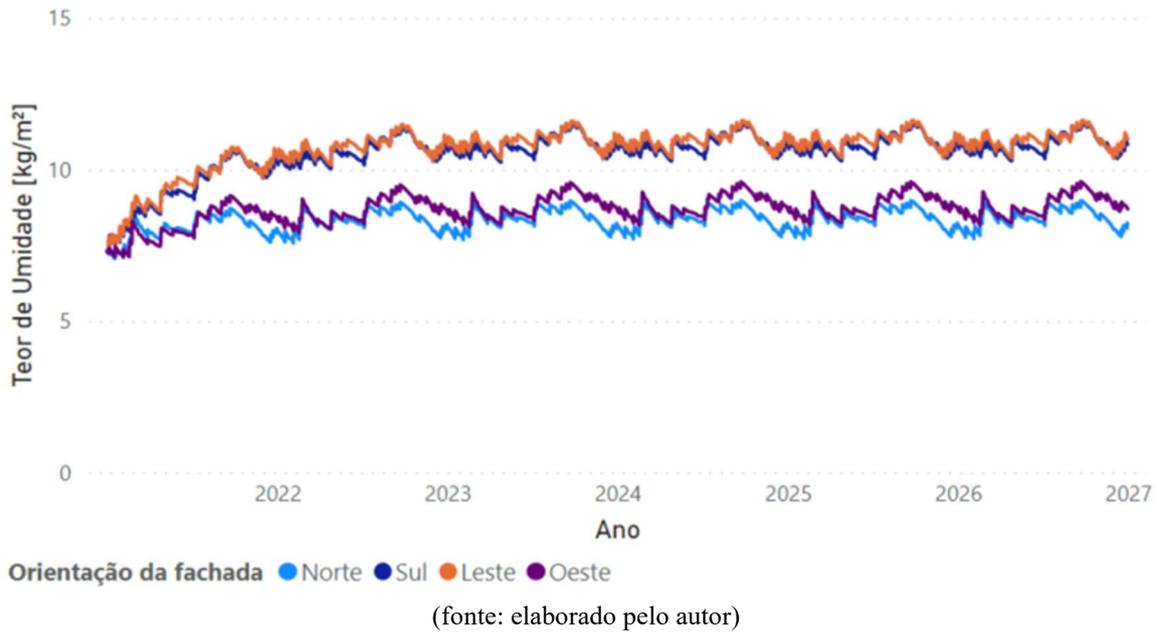
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 6 - Distribuição do teor de umidade [kg/m²] no sistema LSF ao longo do tempo em Porto Alegre (zona 3).



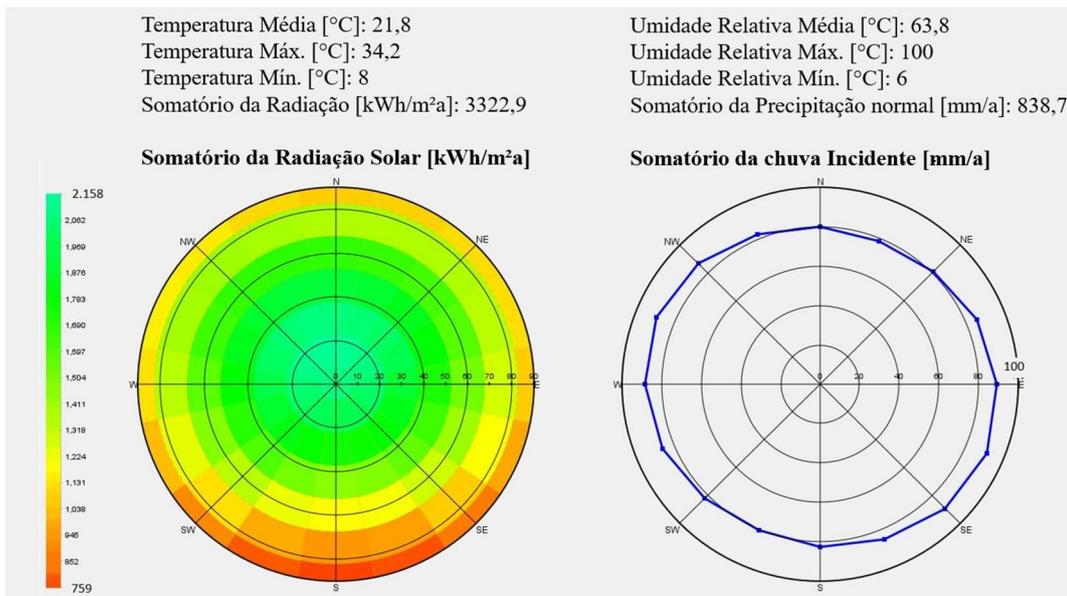
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 7 - Distribuição do teor de umidade [kg/m³] no sistema PC ao longo do tempo em Porto Alegre (zona 3).



No caso de Brasília (Zona 4), onde a distribuição da chuva incidente se dá de forma uniforme em suas orientações, como mostrado na Figura 8 b), o comportamento que rege a distribuição do teor de umidade ao longo do tempo em um mesmo sistema nas diferentes orientações possui pouca variação em termos de valores. Os picos de teor de umidade em Brasília demonstram alta variação durante o ano, caracterizando períodos secos e chuvosos bem definidos.

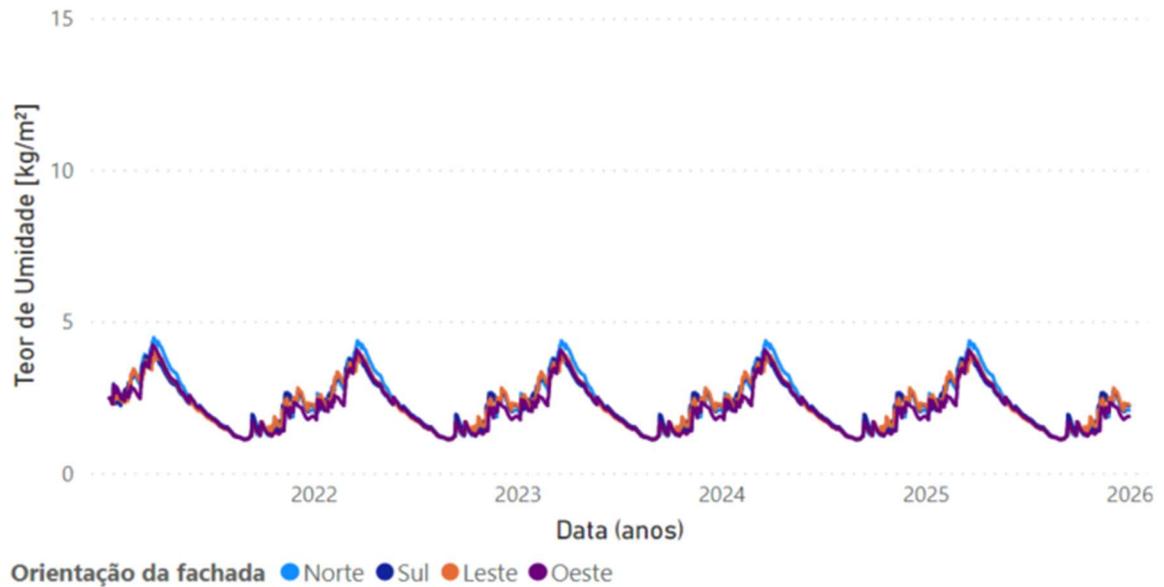
Figura 8 - Análise da radiação e chuva dirigida para Brasília (DF) - Zona 4. a) Somatório da radiação incidente [kWh/m²a]; b) Somatório da chuva incidente [mm/a]



a) (fonte: adaptado de WUFI®, 2020) b)

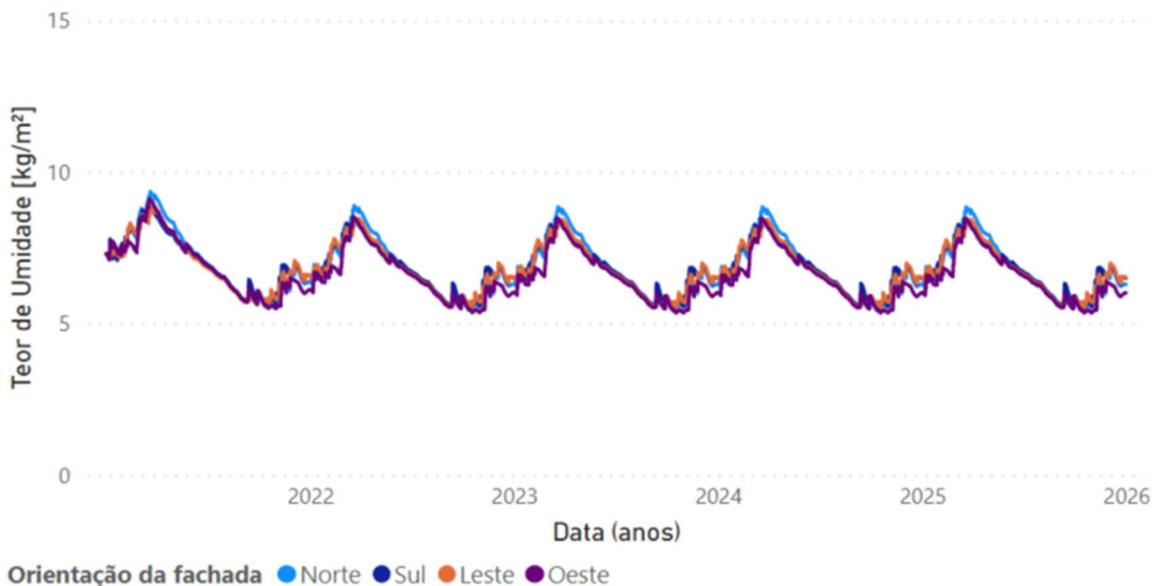
Observa-se novamente, na cidade de Brasília, a existência da diferença entre valores absolutos de teor de umidade nos Sistemas AC (Figura 9) e PC (Figura 10), onde o segundo apresenta resultados bem superiores.

Figura 9 - Distribuição do teor de umidade [kg/m^2] no sistema AC ao longo do tempo em Brasília (zona 4).



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 10 - Distribuição do teor de umidade [kg/m^2] no sistema PC ao longo do tempo em Brasília (zona 4).

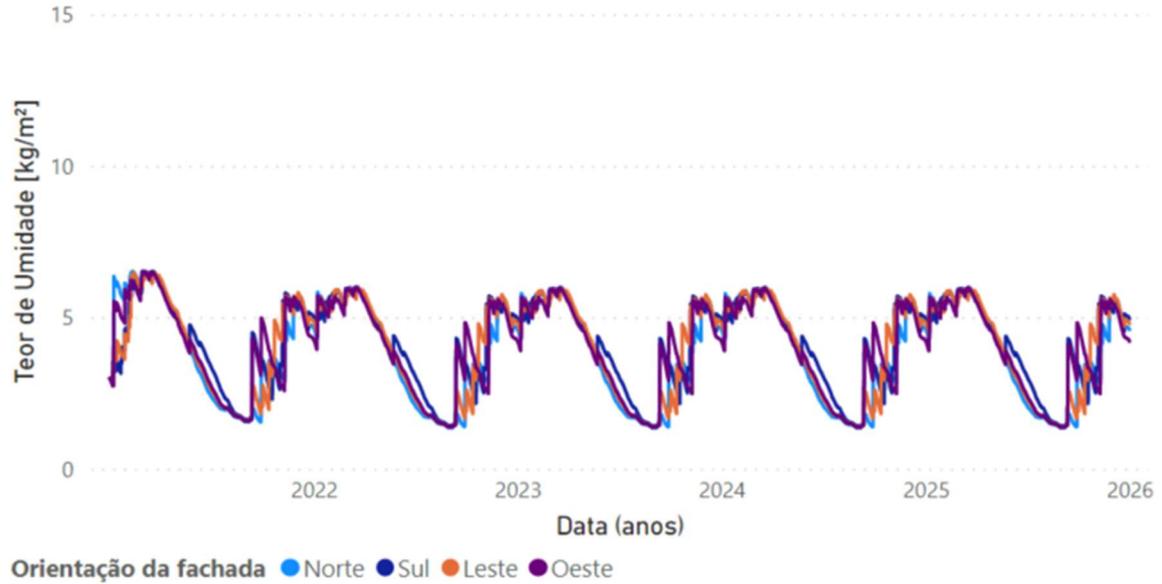


(fonte: elaborado pelo autor)

Um fator importante quanto ao Sistema LSF é a presença de uma camada impermeável, que permite que a água da chuva não adentre nas demais camadas do sistema, ou seja, ela atinge apenas a camada anterior à impermeabilização (Herrmann *et al.*, 2019) evitando que parte da água penetre nas camadas internas do sistema. Dessa forma, percebe-se que o conteúdo total de água tende ao equilíbrio em todas as orientações (Figura 11). Os valores obtidos para este sistema convergem para $6\text{kg}/\text{m}^2$ e possuem uma variação

relativamente menor nos períodos com teor de umidade elevado, quando comparado aos outros sistemas analisados. A camada impermeabilizante do LSF atua mantendo o teor de água praticamente constante, com valores próximos ao conteúdo inicial de água nos elementos do interior do sistema e variando na camada externa, atingida pela chuva.

Figura 11 - Distribuição do teor de umidade [kg/m^2] no sistema LSF ao longo do tempo em Brasília (zona 4).



(fonte: elaborado pelo autor)

Na Tabela 3 são apresentados os valores de teor de umidade máximos, mínimos e médios encontrados para as combinações dos sistemas distribuídos nas orientações definidas para cada zona analisada. Os valores destacados na Tabela 3 indicam a orientação na qual foi verificado o maior teor de umidade médio de cada sistema. Visualiza-se novamente a diferença da presença da camada de concreto do sistema PC em relação ao bloco cerâmico do sistema AC, com variações do teor de umidade médio em intervalos de 31% (zona 1 - orientação leste) até 71% (zona 7 - orientação sul). É notável também a diferença do teor de umidade entre as diferentes orientações em uma mesma cidade, como exemplo, em Curitiba, onde o teor de umidade médio no sistema AC apresenta o valor 3,01 na orientação Oeste e 8,31 na orientação Leste, com variação de 276,08%. Em relação ao LSF verifica-se que os valores máximos de teor de umidade não ultrapassam muito além de 6 kg/m^2 .

Tabela 3 - Teor de umidade [kg/m^2] máximo, mínimo e médio para todas as configurações.

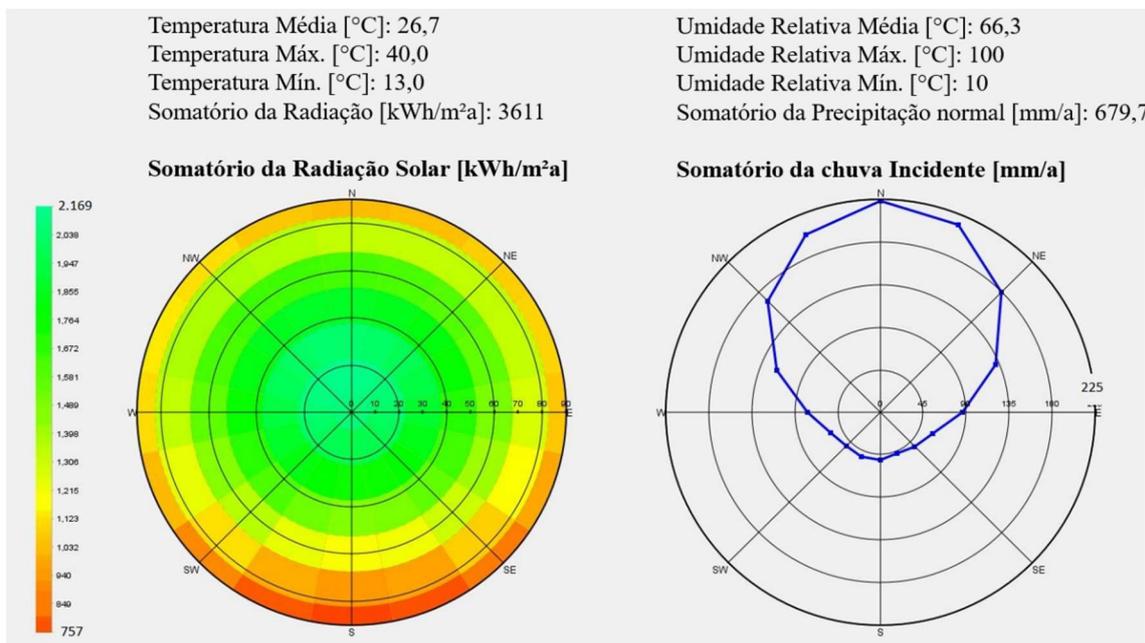
Teor de Umidade total [kg/m^2]													
Zona	Sistema	Norte			Sul			Leste			Oeste		
		Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio
1 Curitiba	AC	5,71	3,87	4,77	6,55	4,53	5,62	9,09	7,16	8,31	3,75	2,39	3,01
	LSF	6,37	4,96	5,92	6,39	5	5,96	6,39	5,31	6,12	6,33	4,3	5,56
	PC	10,9	9,26	10,07	11,47	9,71	10,65	12,81	11,06	12,1	9,08	7,77	8,4
2 Uruguaiana	AC	2,9	1,71	2,31	4,19	2,19	3,12	4,19	2,39	3,24	3,14	1,43	2,18
	LSF	6	3,93	5,1	6,16	4,18	5,58	6,14	4,28	5,54	6,08	1,94	4,37
	PC	7,69	6,5	7,09	9,58	7,68	8,53	9,75	8,01	8,85	7,86	6,28	6,9
3 Porto Alegre	AC	3,63	2,33	3	6,59	5,09	5,76	6,75	5,31	6,01	4,04	2,49	3,21
	LSF	6,31	3,93	5,49	6,4	5,41	6,11	6,37	5,43	6,09	6,33	4,81	5,75
	PC	8,98	7,71	8,41	11,56	10,28	10,84	11,63	10,37	10,98	9,6	8,17	8,84
4 Brasília	AC	4,36	1,09	2,26	3,94	1,1	2,25	3,93	1,09	2,23	4,06	1,09	2,11
	LSF	5,99	1,35	3,81	5,97	1,41	4,1	5,96	1,37	3,96	5,97	1,36	3,95
	PC	8,85	5,42	6,75	8,47	5,47	6,77	8,47	5,48	6,74	8,47	5,35	6,52
5 Santos	AC	5,76	3,7	4,71	6,79	4,7	5,58	5,98	3,7	4,69	6,05	4,32	5,19
	LSF	6,41	4,91	5,88	6,45	5,34	6,07	6,42	4,49	5,8	6,4	5,18	6,02
	PC	10,93	9,15	10,08	11,66	9,89	10,64	11,09	9,13	10,01	11,11	9,65	10,42
6 Campo Grande	AC	4,67	1,23	2,57	4,45	1,51	2,67	5,11	1,41	2,95	3,26	1,23	2,01
	LSF	5,99	1,47	4,11	6	3,33	5,09	5,99	2,75	5,03	5,87	1,74	4,3
	PC	9,43	5,91	7,4	9,3	6,4	7,61	10,06	6,34	8,04	7,58	5,6	6,51
7 Cuiabá	AC	4,8	1,09	2,6	3,59	1,1	1,93	4,11	1,1	2,15	4,03	1,1	2,11
	LSF	6,06	1,33	4,09	6,05	1,38	3,36	6,05	1,35	3,83	6,04	1,34	3,54
	PC	9,59	5,59	7,31	8,09	5,42	6,55	8,72	5,51	6,66	8,59	5,39	6,57
8 Rio de Janeiro	AC	3,76	2,15	2,75	4,08	2,3	3,26	4,2	2,25	3,06	4,95	2,96	4,02
	LSF	6,15	2,65	4,41	6,24	4,05	5,59	6,22	3,23	4,68	6,24	4,67	5,71
	PC	8,82	7,19	7,89	9,51	7,81	8,82	9,51	7,55	8,42	9,71	8,69	9,71

(fonte: elaborado pelo autor)

Para análise de regiões com teores de umidade mais baixos, foi escolhida a zona 7 (Cuiabá - MT), que apresenta a menor precipitação anual (679,7 mm/ano) e somatório de radiação solar de 3611 kWh/m²a (Figura 12). Pela Tabela 3 é possível observar que os menores valores de teor de umidade médio são apresentados nesse município. Por outro lado, os maiores valores são encontrados em Curitiba (zona 1), para o sistema AC, a maior média dentre as orientações foi de 8,31kg/m², enquanto para LSF e PC, obteve-se 6,12 e 12,1kg/m², respectivamente, todas na orientação leste. A análise dos valores médios representa o comportamento de forma global, entretanto pode ocultar o comportamento de períodos extremos, secos ou chuvosos.

Brasília apresenta valores de teor de umidade bem próximos entre todas as orientações, indicando a distribuição de chuva dirigida de maneira uniforme, como visto na Figura 8.

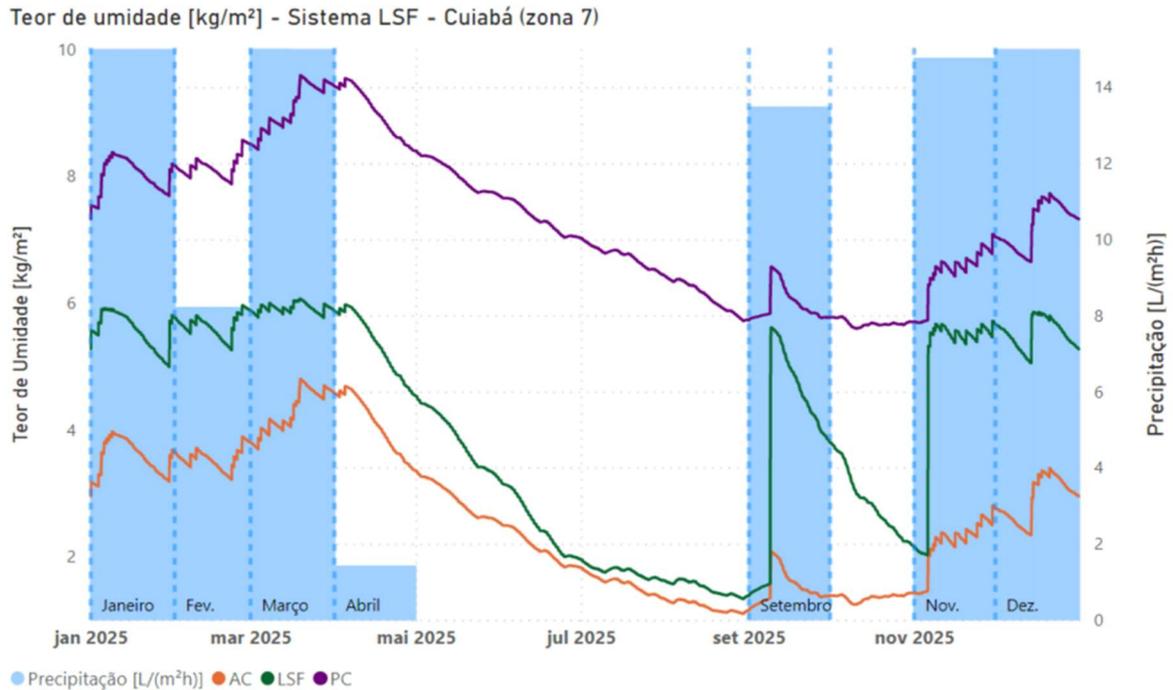
Figura 12 - Análise da radiação e chuva dirigida para Cuiabá (MT) - Zona 7. a) Somatório da radiação incidente [kWh/m²a]; b) Somatório da chuva incidente [mm/a].



a) (fonte: adaptado de WUFI®, 2020) b)

O curso temporal dos sistemas de Cuiabá, para a fachada Norte (maior incidência de chuva) é mostrado na Figura 13, juntamente com o pluviograma obtido dos dados meteorológicos coletados nas estações adotadas (Quadro 1). Nota-se a maior presença de água no sistema PC, além de apresentar comportamento semelhante ao sistema AC. O LSF tem valores intermediários de teor de umidade, entretanto o desempenho difere dos demais, que tendem a aumentar de forma gradativa o teor de umidade nos períodos chuvosos, diminuindo linearmente nos períodos secos. O comportamento intermediário do LSF pode ser explicado pela alta absorção d'água em períodos com muita chuva, atingindo rapidamente o teor de umidade médio do sistema, próximo à 6kg/m² e depois, em períodos secos, onde a umidade relativa do ar é menor, o teor de umidade decai rapidamente. A curva do LSF na Figura 13 demonstra a rápida absorção de água e além disso, a capacidade de manter o teor de umidade relativamente constante pelo período de novembro até abril (período chuvoso) embora apresente uma queda considerável nos períodos secos (maio a agosto). Os períodos mais secos têm efeito semelhante nos três sistemas, após atingir o teor de umidade mais elevado nos sistemas AC e PC, durante os meses de abril até setembro, a baixa incidência pluvial causa a diminuição acentuada no conteúdo de água dos materiais.

Figura 13 - Teor de umidade [kg/m²] de cada sistema para Cuiabá (zona 7) com orientação Norte e pluviograma.

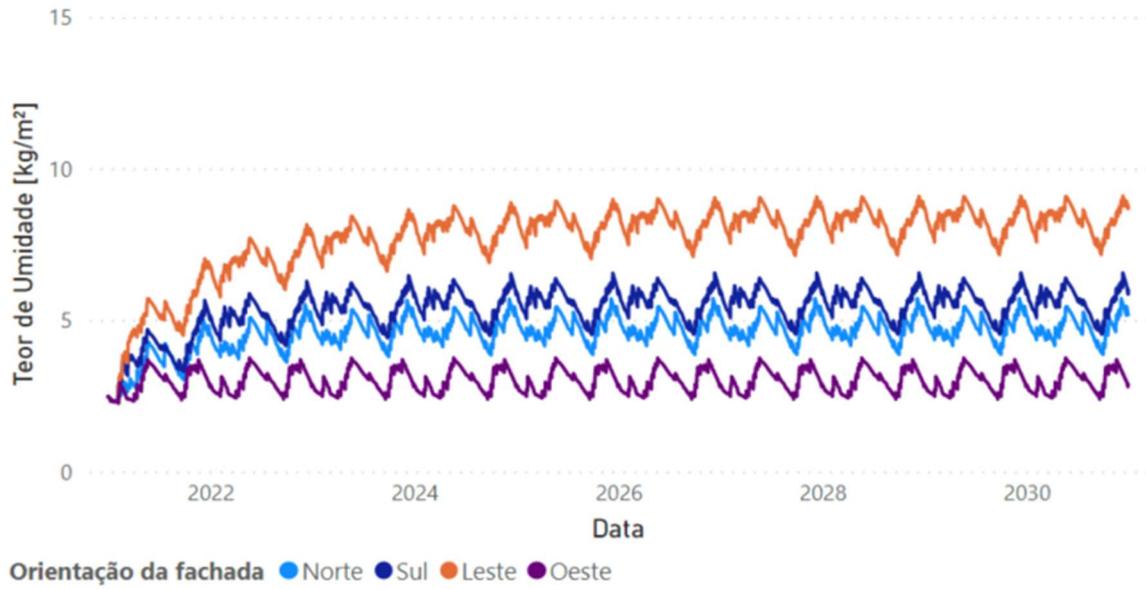


(fonte: elaborado pelo autor)

É importante mencionar que o teor de umidade está relacionado à umidade relativa do sistema e os fluxos entre seus componentes. Em teores de umidade elevados, a umidade relativa superficial interna aumenta, com isso, a probabilidade de crescimento de fungos é acentuada.

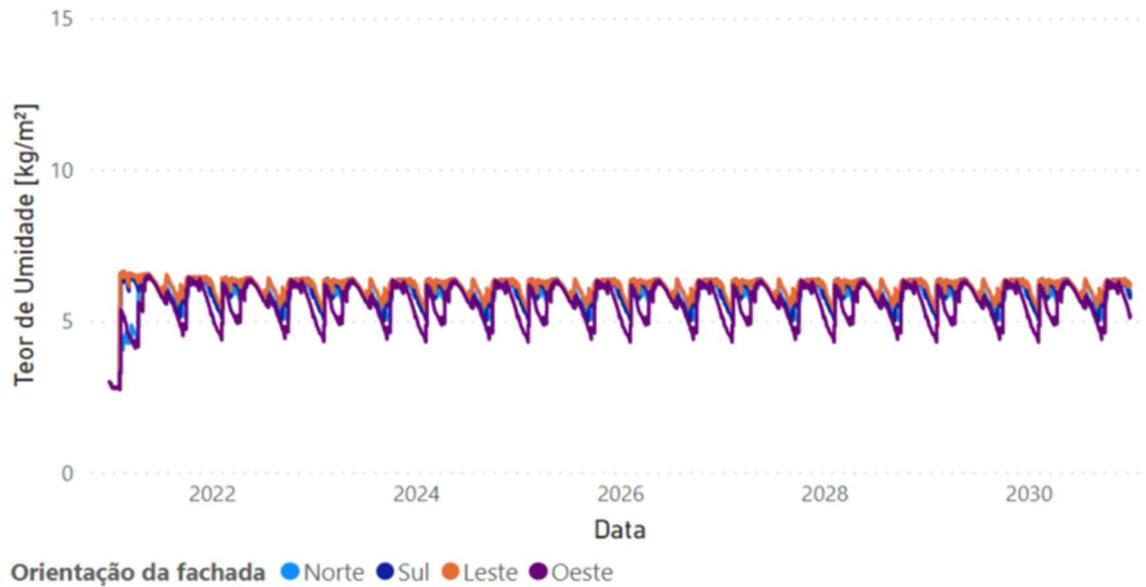
A cidade de Curitiba (zona 1) apresentou os maiores valores de conteúdo de água entre todas as cidades. A distribuição do teor de umidade para AC é dada na Figura 14, LSF na Figura 15 e PC na Figura 16. Entre as orientações, a situação mais grave é observada na direção leste, onde os sistemas AC e PC apresentam alto teor de umidade. Uma discussão mais detalhada a respeito do desenvolvimento de fungos é dada na seção 3.4.

Figura 14 - Distribuição do teor de umidade [kg/m²] no sistema AC ao longo do tempo em Curitiba (zona 1).



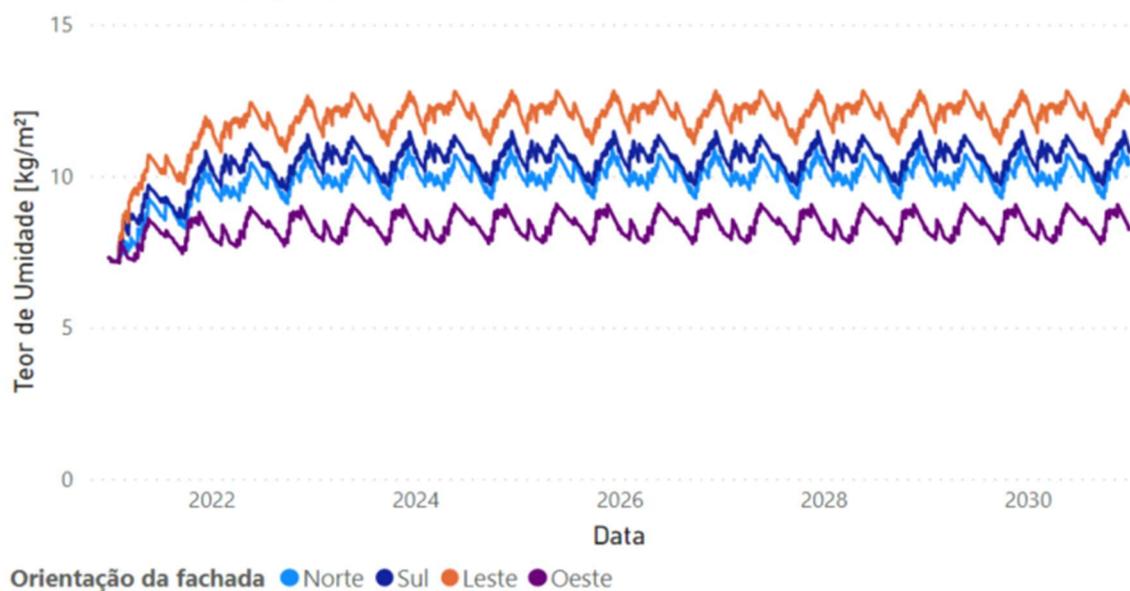
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 15 - Distribuição do teor de umidade [kg/m²] no sistema LSF ao longo do tempo em Curitiba (zona 1).



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 16 - Distribuição do teor de umidade [kg/m²] no sistema PC ao longo do tempo em Curitiba (zona 1).



(fonte: elaborado pelo autor)

3.2. PERFIL DE UMIDADE

A distribuição da umidade entre os materiais das camadas dos sistemas possibilita a avaliação do comportamento individual de cada um destes em um determinado momento específico da simulação. A análise adotada baseou-se na utilização de dados representativos de situações críticas, caracterizadas por teor de umidade elevado no sistema, em períodos de alta umidade relativa do ar. Para determinação destas, foram considerados dois fatores: o dia com o maior teor de umidade interna do sistema e a orientação com maior incidência de chuva. Esta análise possibilitou a identificação da quantidade de água em cada um dos materiais/ componentes dos sistemas.

Observando a Figura 17, no perfil de umidade do sistema LSF, é possível notar que o maior conteúdo de água é apresentado na placa cimentícia, camada em contato com a superfície externa. Apesar do elevado valor do teor de umidade, a capacidade do material de absorver água com umidade relativa igual à 100% equivale a 350 kg/m³ e, se esse valor máximo for ultrapassado, o material entra em uma condição supersaturada onde todos os poros são ocupados por água. Assim, caso essa situação ocorra, todo conteúdo de água excedente resultará em problemas de condensação interna, onde a água no estado gasoso dentro dos poros do material passa por uma transição para o estado líquido percolando com maior facilidade para as camadas do interior do sistema.

Na camada externa dos sistemas AC (Figura 18) e PC (Figura 19) o teor de umidade atingiu níveis elevados próximos à 200 kg/m³, sem superar a condição de supersaturação deste material, alcançada com teor de umidade de 210 kg/m³. As demais camadas dos sistemas apresentaram valores aceitáveis quanto à condição exposta, sem alertar problemas de condensação interna.

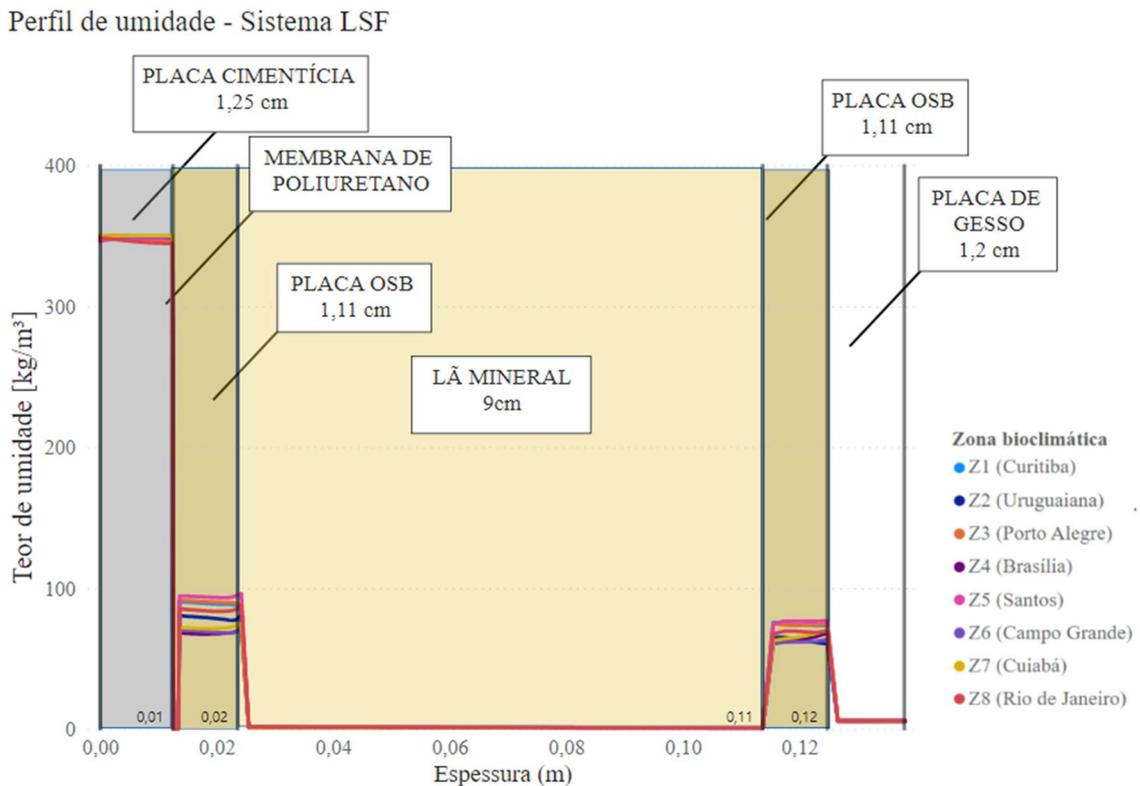
Pelos perfis de umidade AC e PC, é possível notar a diferença entre o teor de umidade do bloco cerâmico e da camada de concreto, na qual o segundo absorve uma quantidade maior de umidade em relação ao primeiro independente de possuírem a mesma camada de

revestimento externo. A camada de concreto com elevado teor de umidade acaba gerando um fluxo interno de umidade, com direção às camadas adjacentes.

É possível observar também na Figura 17 que teor de umidade no sistema LSF, na condição analisada com umidade relativa do ar alta, em todas as cidades, atinge um valor máximo na camada externa (placa cimentícia) e a principal diferença entre os componentes, embora pequena, é dada nas camadas interiores, nas placas OSB.

Os sistemas AC e PC se mostraram mais sensíveis à variação da zona bioclimática, apresentando valores com grande variação, como observado nas cidades de Curitiba (zona 1) e Cuiabá (zona 7). As diferenças maiores do teor de umidade são presentes na camada mais externa do sistema (argamassa externa) e tendem a diminuir nas camadas mais interiores.

Figura 17 - Perfil de Umidade - Sistema LSF



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 18 - Perfil de Umidade - Sistema AC

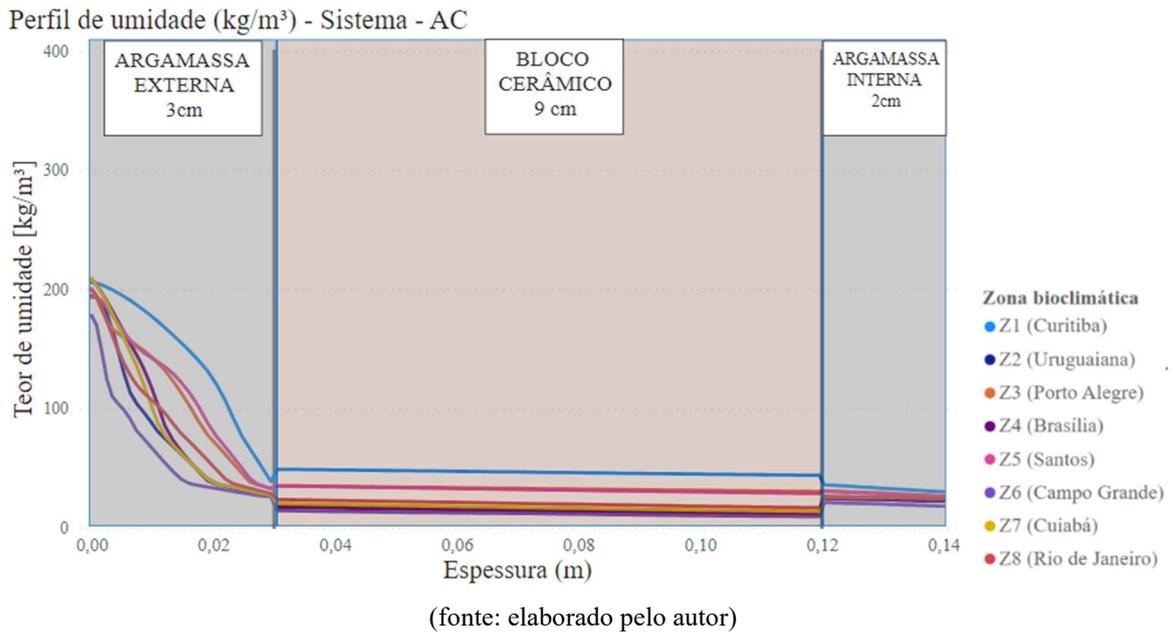
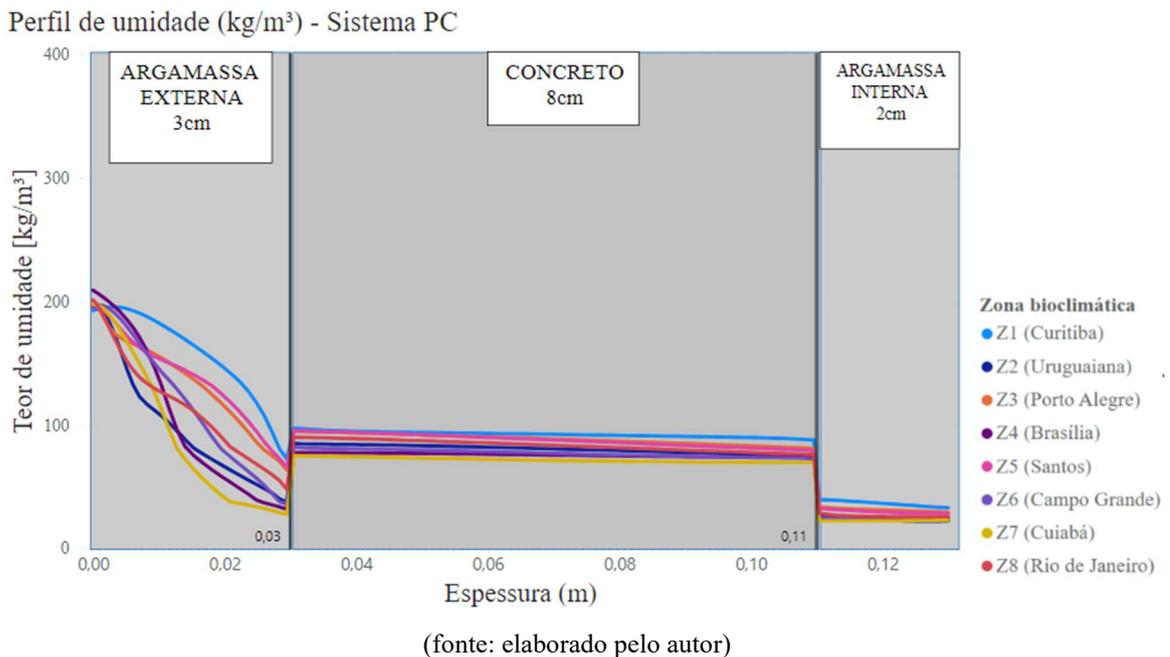


Figura 19 - Perfil de Umidade - Sistema PC.



3.3. TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

Ao definir o sistema de fechamento e suas camadas, o software WUFI® (2020) fornece um valor de transferência de calor médio (U -value), correspondente à transmitância térmica do conjunto. O sistema AC apresentou o valor $1,411 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ enquanto o sistema LSF obteve $0,371 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e o sistema PC resultou em $3,77 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. O valor da transmitância térmica pode ser comparado aos valores de desempenho apresentados na Tabela 2. A transmitância térmica independe das condições climáticas de exposição, tendo o mesmo valor para todas as zonas; em contrapartida, o valor estabelecido como requisito de adequabilidade é diferente em cada zona. Os sistemas AC e LSF apresentaram valores

dentro do limite em todos os municípios, enquanto o sistema PC se mostrou inadequado em todas as zonas.

O desempenho térmico é refletido na variação entre a temperatura do ambiente externo à edificação e o espaço interno. Podendo ser estimada através da simulação higrotérmica, as curvas de temperatura da superfície interna e a temperatura externa do ar, em função do tempo, permitem analisar o comportamento térmico do sistema de forma direta. As temperaturas máximas, mínimas e médias da superfície interna do sistema de todos os casos simulados são apresentadas na Tabela 4.

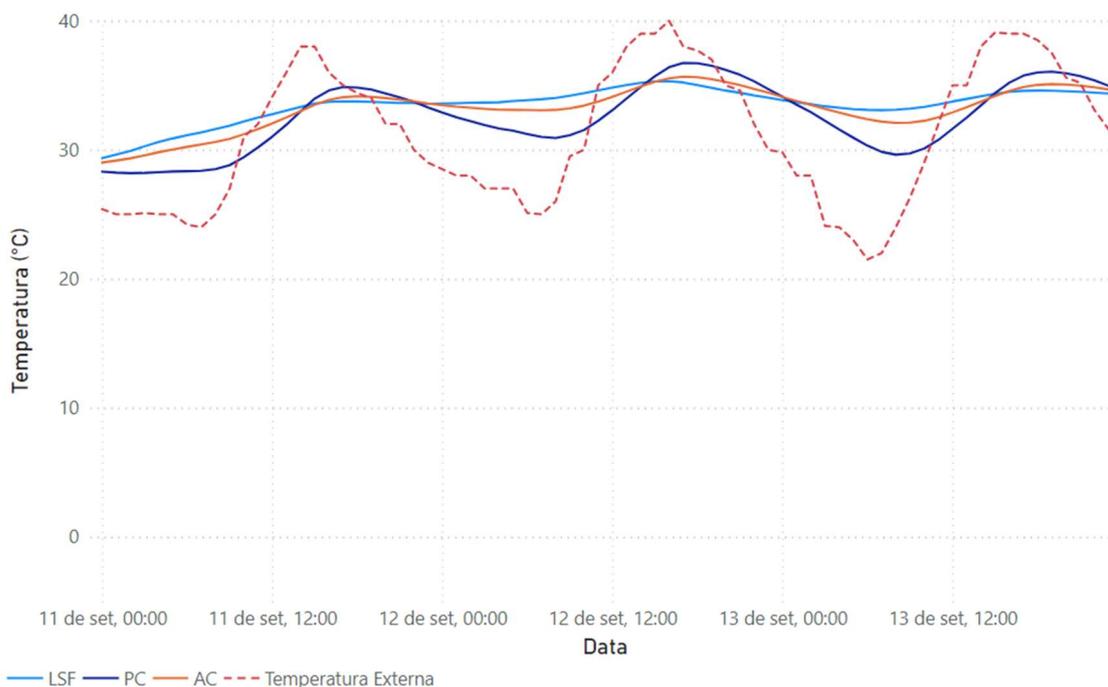
Tabela 4 - Temperaturas mínimas, máximas e médias para todas as configurações simuladas.

Zona	Orientação	Sistema AC			Sistema LSF			Sistema PC			Temperatura Externa		
		Mínima °C	Máxima °C	Média °C	Mínima °C	Máxima °C	Média °C	Mínima °C	Máxima °C	Média °C	Mínima °C	Máxima °C	Média °C
Zona 1 Curitiba	Norte	7,27	28,87	19,84	8,50	28,57	20,25	4,77	29,67	19,36	-2,00	33,00	17,55
	Sul	7,18	28,73	19,86	8,50	28,53	20,24	4,66	29,79	19,23	-2,00	33,00	17,55
	Leste	7,00	28,80	19,85	8,50	28,52	20,25	4,70	29,85	19,29	-2,00	33,00	17,55
	Oeste	7,41	29,13	19,97	8,50	28,67	20,25	4,77	30,42	19,37	-2,00	33,00	17,55
Zona 2 Uruguaiana	Norte	8,52	34,66	22,00	8,94	34,56	22,25	6,96	35,19	21,42	1,50	36,40	19,55
	Sul	8,49	34,50	21,90	8,95	34,48	22,23	6,88	34,84	21,19	1,50	36,40	19,55
	Leste	8,49	34,62	21,64	8,95	34,51	22,25	6,89	35,15	21,32	1,50	36,40	19,55
Zona 3 Porto Alegre	Oeste	8,52	34,68	21,98	8,95	34,58	22,25	6,93	35,34	21,36	1,50	36,40	19,55
	Norte	8,22	31,91	22,23	8,80	31,63	22,51	6,49	32,87	21,65	0,00	36,00	19,51
	Sul	8,10	31,91	22,11	8,80	31,63	22,49	6,38	32,62	21,46	0,00	36,00	19,51
	Leste	8,09	31,94	22,15	8,80	31,62	22,50	6,38	32,78	21,57	0,00	36,00	19,51
Zona 4 Brasilia	Oeste	8,23	32,13	22,22	8,80	31,76	22,51	6,46	33,22	21,62	0,00	36,00	19,51
	Norte	17,18	30,86	24,26	17,39	30,62	24,51	15,77	31,38	23,70	8,00	34,20	21,80
	Sul	17,18	30,87	24,21	17,40	30,63	24,49	15,72	31,41	23,56	8,00	34,20	21,80
	Leste	17,18	30,94	24,26	17,39	30,62	24,51	15,80	31,58	23,70	8,00	34,20	21,80
Zona 5 Santos	Oeste	17,18	31,12	24,28	17,39	30,75	24,51	15,73	32,01	23,73	8,00	34,20	21,80
	Norte	16,25	33,67	24,38	17,08	33,55	24,69	13,46	34,28	23,83	6,10	35,30	21,99
	Sul	16,17	33,14	24,29	17,08	33,34	24,67	13,38	33,09	23,65	6,10	35,30	21,99
	Leste	16,24	33,36	24,36	17,07	33,42	24,68	13,45	33,50	23,78	6,10	35,30	21,99
Zona 6 Campo Grande	Oeste	16,21	33,46	24,36	17,09	33,39	24,69	13,41	33,96	23,79	6,10	35,30	21,99
	Norte	8,90	32,51	26,25	9,24	32,35	26,51	8,03	33,18	25,70	5,00	36,00	23,80
	Sul	8,83	32,62	26,18	9,22	32,34	26,49	7,87	33,37	25,51	5,00	36,00	23,80
	Leste	8,82	32,60	26,24	9,22	32,34	26,51	7,89	33,36	25,68	5,00	36,00	23,80
Zona 7 Cuiabá	Oeste	8,91	32,93	26,27	9,25	32,44	26,51	8,00	34,15	25,72	5,00	36,00	23,80
	Norte	16,92	36,42	29,12	17,23	36,24	29,38	16,06	36,86	28,55	13,00	40,00	26,68
	Sul	16,93	36,29	29,09	17,23	36,24	29,38	16,06	36,49	28,44	13,00	40,00	26,68
	Leste	16,93	36,33	29,13	17,23	36,24	29,38	16,06	36,65	28,58	13,00	40,00	26,68
Zona 8 Rio de Janeiro	Oeste	16,93	36,61	29,15	17,23	36,34	29,38	16,06	37,34	28,60	13,00	40,00	26,68
	Norte	18,14	34,15	25,58	19,09	33,99	25,85	16,02	34,59	24,99	10,90	37,00	23,15
	Sul	18,09	34,22	25,49	19,10	34,02	25,83	15,91	34,77	24,79	10,90	37,00	23,15
	Leste	18,11	34,21	25,54	19,10	33,98	25,85	15,95	34,84	24,92	10,90	37,00	23,15
	Oeste	18,04	34,56	25,52	19,10	34,16	25,84	15,90	35,57	24,90	10,90	37,00	23,15

(fonte: elaborado pelo autor)

Com intuito de verificar o desempenho em situações de temperaturas elevadas foi observado o comportamento da zona 7 (Cuiabá), pois apresenta a maior média de temperatura (26,68°C), na orientação oeste, que recebe maior incidência solar. Verificou-se a temperatura mais elevada (40°C) no dia 12 de setembro às 16 horas e, a fim de ilustrar o período, o gráfico da Figura 20 apresenta o intervalo de 11 a 13 de setembro.

Figura 20 - Gráfico de temperaturas para a zona 7 (Cuiabá) com orientação Oeste.



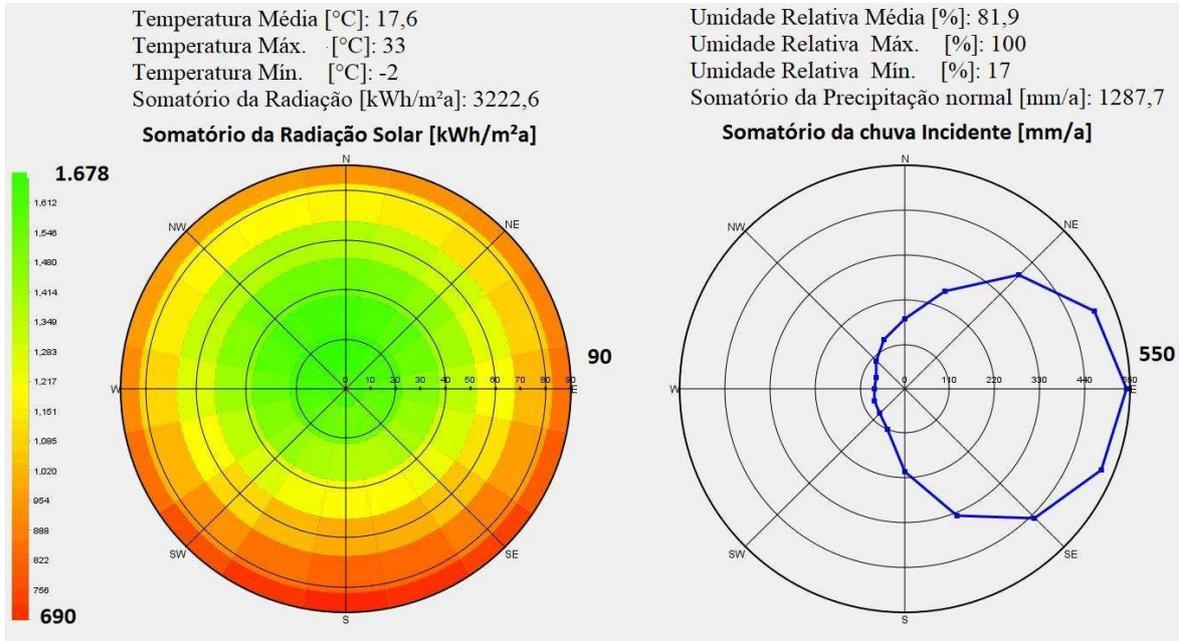
(fonte: elaborado pelo autor)

No período analisado, no município de Cuiabá (Figura 20), o sistema PC apresentou a maior temperatura interna ($36,72^{\circ}\text{C}$), enquanto os sistemas AC e LSF atingem $35,68^{\circ}\text{C}$ e $35,32^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Observando o comportamento da temperatura da superfície interna de cada sistema é possível notar a menor variação de temperatura no LSF, que retém o calor por mais tempo, no entanto, absorve uma quantidade menor de calor como mostram os intervalos consecutivos entre às 12:00 e 16:00 horas (ver Figura 20). Durante o período noturno, quando a temperatura atinge níveis mais baixos, a temperatura se mantém relativamente estável no LSF, com amplitude térmica igual a $5,98^{\circ}\text{C}$ nestes dias; já os sistemas AC e PC apresentam variações térmicas maiores, com amplitude térmica de $6,67^{\circ}\text{C}$ e $8,53^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Por apresentar o comportamento com menor variabilidade, temperatura constante elevada e difusão de calor lenta, o sistema LSF apresenta a maior média de temperatura ($33,48^{\circ}\text{C}$), enquanto os sistemas AC e PC apresentam médias de $33,20^{\circ}\text{C}$ e $32,59^{\circ}\text{C}$, respectivamente, embora os maiores picos de temperatura sejam encontrados nos sistemas PC e AC.

Entretanto, a menor média de temperatura não representa o sistema com melhor adaptação a esta zona, pois os picos de temperatura elevados também são fatores determinantes na análise térmica. Com essas diferenças, as alternativas de climatização interna possuem abordagens distintas em relação aos envelopes. Enquanto o sistema PC requer uma climatização mais intensa no período da tarde, por apresenta temperaturas mais altas e, durante a noite, com a diminuição da temperatura externa do ar e pelo ambiente interno já estar relativamente confortável devido à climatização vespertina, a rápida troca de calor devido à baixa inércia térmica, resfria o ambiente interno mais rapidamente que os outros sistemas. O sistema AC apresenta características semelhantes ao PC, com pontos de inflexão mais suaves. Para o LSF, o comportamento distinto sugere uma abordagem diferente, embora possua média de temperatura interna maior, precisa ser considerado o fato de isolar melhor o ambiente, podendo manter de maneira mais fácil a temperatura interna, sendo menos sensível à amplitude térmica externa.

De forma antagônica, para comparar o desempenho térmico em regiões mais frias adotou-se a zona 1 (Curitiba), com orientação sul, onde apresenta temperaturas médias internas mais baixas e recebe menor incidência solar (Figura 21).

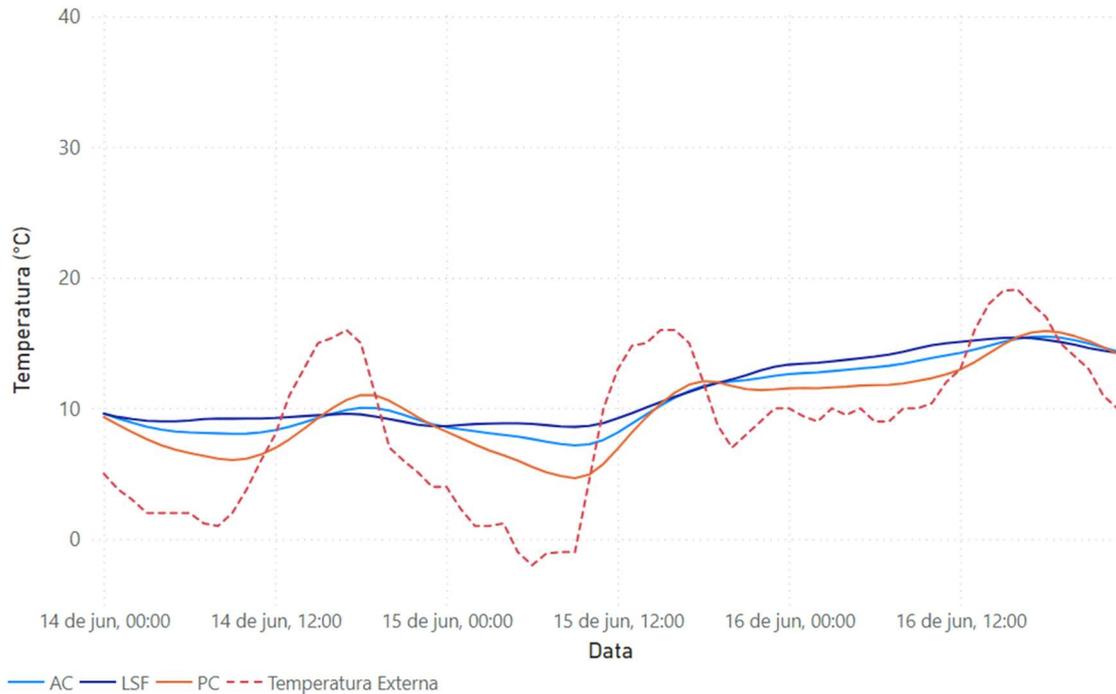
Figura 21 - Análise da radiação e chuva dirigida para Curitiba (PR) - Zona 1.



a) (fonte: adaptado de WUFI®, 2020) b)

A menor temperatura externa (-2°C) foi observada na madrugada do dia 15 de junho, às 06:00 horas, e o comportamento observado, apresentado na Figura 22, leva em conta os dias adjacentes. É possível notar que o sistema PC apresenta maior sensibilidade aos picos de temperaturas mais baixas, exibindo temperatura interna mais baixa e amplitude térmica mais elevada no período (11,27°C), em relação aos sistemas AC e LSF, com amplitudes de 8,33°C e 6,82°C, respectivamente. Em relação à inércia térmica, o comportamento de cada sistema é semelhante ao visto na zona 7 (Cuiabá), em temperaturas elevadas (Figura 20), de forma que o sistema PC apresenta a maior troca de calor, o LSF mantém as temperaturas com a menor amplitude térmica e o sistema AC apresenta comportamento intermediário.

Figura 22 - Gráfico de temperaturas para a Curitiba (zona 1) com orientação Sul.



(fonte: elaborado pelo autor)

3.4. TÉCNICA DE PÓS-PROCESSAMENTO

Aplicando o método descrito na seção 2.5 é possível analisar graficamente o índice de crescimento de fungos utilizando o parâmetro Índice de Crescimento de Fungos (*Mould Growth Index*, MGI). A classificação é feita em três intervalos, onde valores de MGI inferiores a um (1) são usualmente aceitáveis, conforme classificação proposta na ANSI ASHRAE 160:2009. Para intervalos de um (1) a três (3) existe a probabilidade de desenvolvimento de fungos, sugerindo-se maior investigação. Por fim, para valores acima de três a utilização do sistema é considerada inaceitável. As condições características que propiciam o desenvolvimento de fungos são dadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Condições estabelecidas para evitar o desenvolvimento de fungos.

Condições limite para evitar o crescimento de fungos	
1.	Trinta dias corridos com umidade relativa superficial menor que 80% com temperatura média entre 5°C e 40°C
2.	Sete dias corridos com umidade relativa superficial menor que 98% com temperatura média entre 5°C e 40°C
3.	Vinte e quatro horas corridas com umidade relativa superficial igual a 100% com temperatura média entre 5°C e 40°C

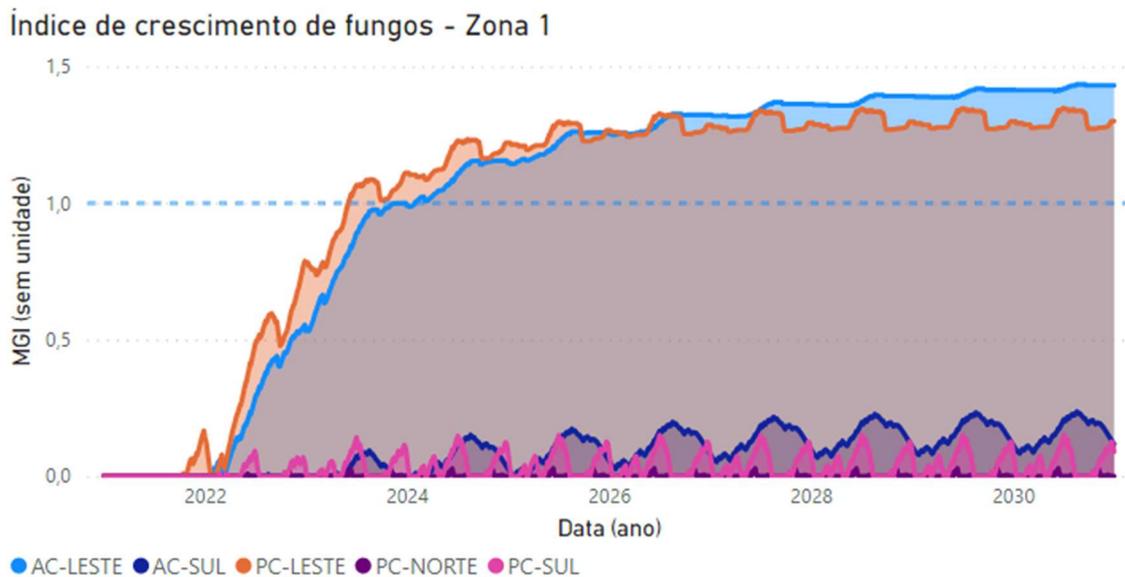
(fonte: ANSI ASHRAE 160:2009)

A análise indicou que para o Sistema *LSF* a probabilidade de crescimento de fungos é muito baixa em todas as configurações (zonas e orientações), com valor de MGI entre 0 e

0,05. O baixo teor de umidade na camada interna e as características do material propiciam ao sistema condições aceitáveis que impedem o desenvolvimento de fungos.

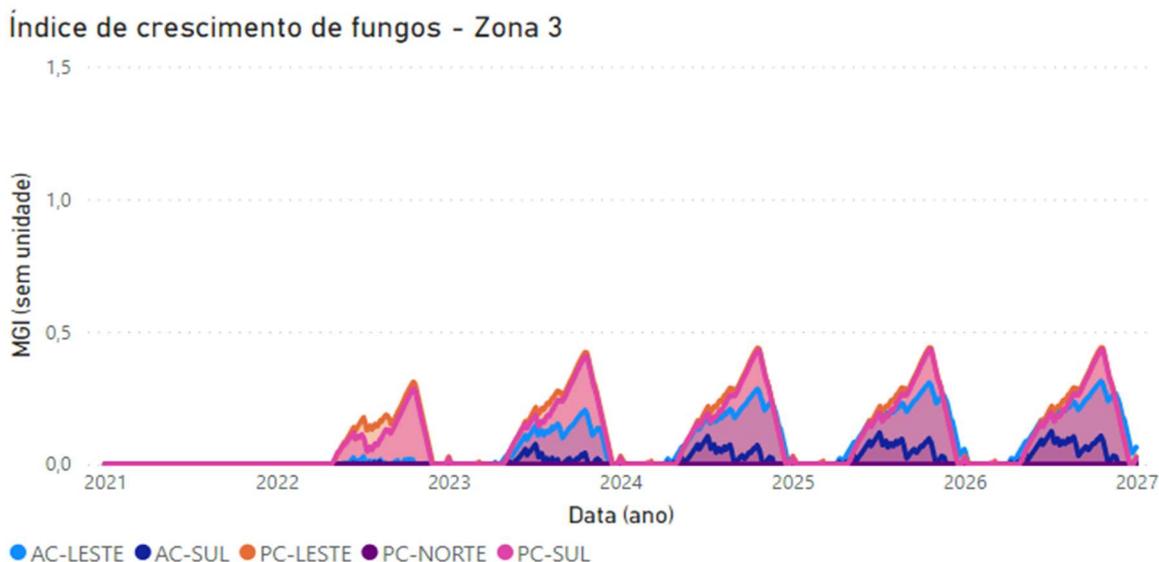
Para os sistemas AC e PC, observou-se comportamentos semelhantes, com valores de MGI superiores a um (1) apenas na Zona 1 (Curitiba). Em todas as outras zonas para todas as orientações de fachada, os sistemas mostraram-se eficientes quanto ao não crescimento de fungos, com valores próximos a zero. As zonas 3 (Porto Alegre) e 5 (Santos) apresentam valores de MGI superiores às demais, com exceção à zona 1 (Curitiba), mas sem alcançar os níveis desfavoráveis. Nas Figura 23, 24 e 25, pode-se observar a taxa de crescimento de fungos em função do tempo para Curitiba, Porto Alegre e para Santos, respectivamente. É visível a diferença entre o comportamento apresentado pelas orientações de fachadas em uma mesma cidade, que se justificam, de forma geral, pelas condições climáticas na qual estão inseridas, envolvendo posição solar e incidência de chuva dirigida.

Figura 23 - Índice de crescimento de fungos - zona 1 (Curitiba)



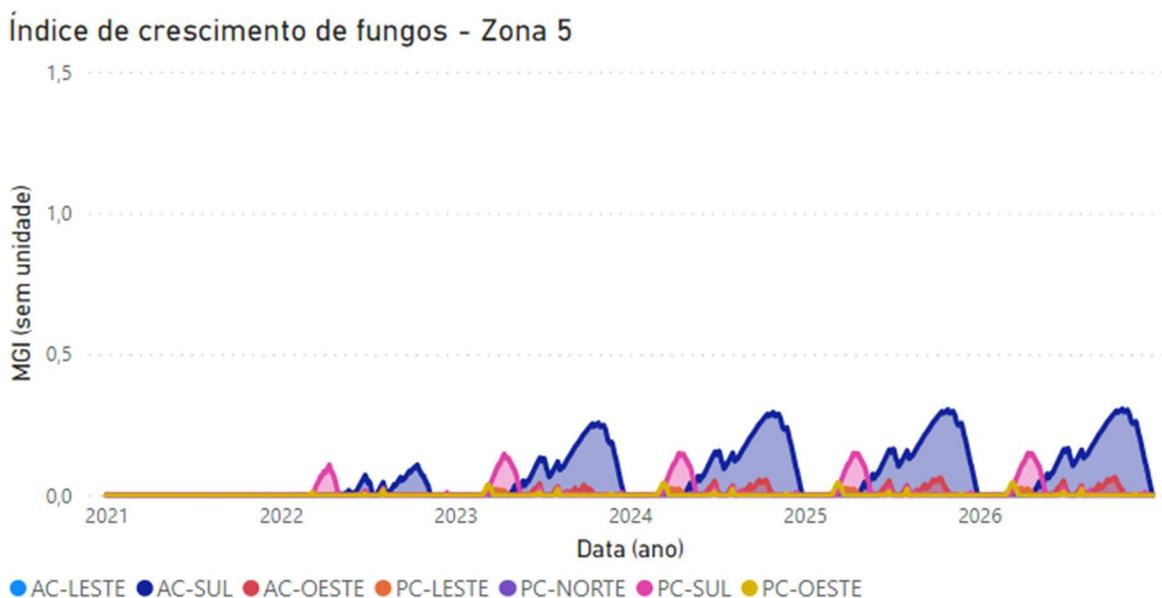
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 24 - Índice de crescimento de fungos - zona 3 (Porto Alegre)



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 25 - Índice de crescimento de fungos - zona 5 (Santos).



(fonte: elaborado pelo autor)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que os sistemas de vedação são suscetíveis a variações de desempenho originadas pela localização na qual estão inseridos e, ainda, dentro de uma localidade específica, apresentam resultados distintos devido à incidência solar e chuva dirigida relativos à orientação da fachada.

Dentre os sistemas analisados, o LSF apresentou o menor valor de transmitância térmica, sendo mais resistente à variação térmica em temperaturas frias (Curitiba) e

temperaturas mais elevadas (Cuiabá). Um dos fatores que justifica o desempenho deste sistema é a presença da camada de lã mineral que, devido à baixa condutividade térmica, atua como isolante térmico, impedindo o fluxo de calor entre as superfícies externa e interna. Comparando os resultados obtidos de transmitância térmica aos critérios de desempenho mínimo estipulados nas normas NBR 15575 (ABNT, 2013) e NBR 15220 (ABNT, 2005), os sistemas AC e LSF atendem aos requisitos exigidos; em contrapartida, o sistema PC possui o valor de transmitância superior ao máximo permitido em cada zona. Como parâmetro normativo, a transmitância se mostrou adequada para representar o desempenho térmico dos sistemas, no entanto, os requisitos para classificação de adequabilidade podem não ser eficazes.

Quanto ao teor de umidade, a principal motivação no estudo está associada ao desenvolvimento de fungos na superfície interna de revestimento. Foi observado que Curitiba, a qual possui a maior umidade relativa média, requer maior cautela na determinação da melhor opção de sistema de vedação. Os sistemas AC e PC mostraram desempenho insuficiente, indicando a provável ocorrência de crescimento biológico. Vale notar que o sistema AC apresenta um desempenho adequado quanto à transmitância térmica, possuindo valores dentro do mínimo recomendado, ressaltando a importância da análise através de diferentes parâmetros de desempenho.

De forma geral, as simulações higrotérmicas possuem algumas limitações, pois os resultados são calculados por modelos matemáticos complexos que envolvem mecanismos de transporte de líquido, de calor e de vapor dificilmente calculados, sendo necessário adotar simplificações. Além disso, o modelo é limitado à uma dimensão, podendo ser analisado o fluxo de calor e água em um sentido (horizontal), enquanto o fluxo ascendente da região em contato com o solo é ignorado. Outras simplificações são feitas quando se trata de efeitos difíceis de serem mensurados, como transporte de calor resultante do fluxo de água entre o componente ou o efeito de resfriamento causado pela chuva em temperaturas baixas (KUNZEL, 1995). Além das limitações matemáticas, a assertividade dos resultados aumenta conforme a precisão dos dados de entrada (parâmetros dos materiais, coeficientes de transferência superficial, dados climáticos etc.). Sistemas que possuem juntas entre seus componentes, como o LSF, podem apresentar pontos de fraqueza, podendo ocorrer infiltração de água para dentro do sistema, se executado de forma equivocada e, por apresentar um cenário ideal, os erros de execução não são considerados nas simulações.

Sugere-se, para trabalhos futuros, a realização da medição dos parâmetros dos materiais utilizados para que se possa obter simulações mais próximas da realidade. A pesquisa e o estudo dos materiais, de forma geral, auxiliam no incentivo do uso desta tecnologia na composição de novos sistemas. As simulações também podem auxiliar no desenvolvimento de parâmetros normativos, ou, ainda, aperfeiçoar requisitos já estipulados, como o caso da transmitância térmica.

5. CONCLUSÃO

Analisando os resultados de forma geral, pode-se afirmar que o sistema AC não é recomendado para o município de Curitiba (zona 1), tendo como fator de reprovação o alto teor de umidade, apresentando em períodos prolongados com umidade relativa interna superior a 80% propiciando o desenvolvimento de fungos. Nas cidades Porto Alegre (zona 3) e Santos (zona 5), o sistema AC não atingiu os níveis que alertam a mesma condição de crescimento de fungos, entretanto, o comportamento apresentado pode ser agravado em situações acidentais à ponto de comprometer a durabilidade do sistema à longo prazo. Da análise térmica, o sistema AC apresenta valor de transmitância térmica inferior ao limite

estabelecido nas normas NBR 15575 (ABNT, 2013) e NBR 15220 (ABNT, 2005). Entretanto, o uso deste sistema deve ser pensado considerando o gasto energético com resfriamento e aquecimento principalmente nas cidades que apresentam grande amplitude térmica e picos de temperatura acentuados.

O sistema LSF demonstrou os resultados mais adequados entre os três analisados, podendo ser adotado em todos os municípios. O fato de possuir camadas específicas de isolamento térmico e impermeabilização com espessuras adequadas justifica o desempenho positivo do sistema. O LSF apresentou baixa amplitude térmica, mas temperaturas médias relativamente elevadas em Cuiabá, de forma que a utilização do sistema em cidades com clima quente pode ocasionar um gasto energético alto para resfriamento, por apresentar inércia térmica alta. Vale ressaltar que a ausência ou má execução de qualquer camada do sistema altera o seu comportamento, podendo comprometer seu desempenho.

O sistema PC, dentre os três, apresentou o desempenho com mais pontos de inadequação, com valor de transmitância térmica superior aos valores limites para todos os municípios. Além disso, os valores de teor de umidade mostraram-se prejudiciais, acusando o desenvolvimento de fungos na cidade de Curitiba e umidade relativa na superfície interna superior a 80% em períodos prolongados em Curitiba, Porto Alegre e Santos. Apesar do desempenho, o sistema PC possui a facilidade construtiva de aumentar a espessura da sua camada interior (concreto) devido ao uso de formas e ao fato de ser moldado no local. A utilização de concretos com diferentes parâmetros físicos também pode ser aplicada como técnica para se obter resultados com desempenho adequado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMORIM, A. C.; CARLO, J. C. Análise das propostas de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro: estudo de caso de Colatina, ES. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 373–391, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**. Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**. Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**. Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**. Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**. Edificações habitacionais - Desempenho Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE, Rio de Janeiro, 2013.
- BAUER, E. Resistência a Penetração Da Chuva Em Fachadas De Alvenaria De Materiais Cerâmicos - Uma Análise Do Desempenho. **Dissertação**, p. 188, 1987.
- BAVARESCO, M. V. et al. Classificação de climas brasileiros empregada na atualização dos Regulamentos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações. **Universidade Federal de Santa Catarina**, p. 8, 2017.
- CAVALCANTI, F. S. Impacto da absorvância e transmitância das fachadas na eficiência energética e conforto térmico para habitação de interesse social. **Paranoá: cadernos de arquitetura e urbanismo**, n. 28, 2020.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EN ISO 13788**. Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods. 2012.
- 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.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4108-2**: Thermal protection and energy saving in buildings. Part 2: Minimum requirements for the heat protection. Berlin, 2003.
- FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. DE; ASSIS, E. S. DE. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 183–200, 2017.
- HATTGE, A. F. Estudo Comparativo Sobre a Permeabilidade Das Alvenarias Em Blocos Cerâmicos E Alvenarias Em Blocos De Concreto. p. 138, 2004.
- HENS, H. IEA Annex 14: Condensation and Energy. **Journal of Thermal Insulation**, v. 15, n. 3, p. 261–273, 1992.

HERRMANN, T. D. et al. Estudo de caso do desempenho de estanqueidade à água de argamassas e hidrorrepelentes - Parte I. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 24, n. 4, 2019.

IBP - FRAUNHOFER INSTITUTE FOR BUILDING PHYSICS –. **WUFI Pro 6.0**. Holzkirchen, Germany, 2020.

ISAKSSON, T. et al. Critical conditions for onset of mould growth under varying climate conditions. **Building and Environment**, v. 45, n. 7, p. 1712–1721, 2010.

KARAGIOZIS, A.; HADJISOPHOCLEOUS, G.; CAO, S. Wind-driven rain distributions on two buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 67–68, p. 559–572, 1997.

KAZMIERCZAK, C. S. Desempenho de paredes de materiais cerâmicos a penetração de água da chuva: uma análise de fatores condicionantes. 1989. 127 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil / UFRGS, Porto Alegre, 1989.

KLEBER, D.H. Análise do desempenho de sistemas de vedação vertical externo com diferentes tipos de argamassa, através de simulação higrotérmica para a cidade Porto Alegre. Porto Alegre, 2018. 30p. Trabalho de diplomação – Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

KÜNZEL, H. M. **Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One- and two-dimensional calculation using simple parameters**. [s.l: s.n.]. v. 1995

MARTINS, T. A. DE L.; BITTENCOURT, L. S.; KRAUSE, C. M. DE L. B. Contribuição ao zoneamento bioclimático brasileiro: reflexões sobre o semiárido nordestino. **Ambiente Construído**, v. 12, n. 2, p. 59–75, 2012.

NASCIMENTO, M. L. M. Aplicação da Simulação Higrotérmica na Investigação da Degradação de Fachadas de Edifícios. Brasília, 2016. 173 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Universidade de Brasília.

OJANEN, T. et al. Mold growth modeling of building structures using sensitivity classes of materials. 2010.

OJANEN, T. et al. **Classification of material sensitivity: New approach for mould growth modeling**. (J. Vinha, J. Piironen, K. Salminen, Eds. Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Building Physics. **Anais...Finland: Tampere University of Technology**, 2011

ŠADAUSKIENE, J.; MONSTVILAS, E.; STANKEVIČIUS, V. The impact of exterior finish vapour resistance on the moisture state of building walls. **Technological and Economic Development of Economy**, v. 13, n. 1, p. 73–82, 2007.

TENWOLDE, A. ASHRAE Standard 160P- Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings. p. 167–172, 2008.

VIITANEN, H. et al. Moisture and bio-deterioration risk of building materials and structures. **Journal of Building Physics**, v. 33, n. 3, p. 201–224, 2010.

VIITANEN, H. et al. **Mould growth modelling to evaluate durability of materials**. XII DBMC: International Conference on Durability of Building Materials and Components. **Anais...Portugal: FEUP Edições**, 2011