

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

DAVI HENRIQUE KLEBER

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE VEDAÇÃO  
VERTICAL EXTERNO COM DIFERENTES TIPOS DE  
ARGAMASSA, ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO  
HIGROTÉRMICA PARA A CIDADE DE PORTO ALEGRE.**

Avaliador:
Defesa: dia 14/12/2018 às 16:00 horas
Local: UFRGS / Castelinho Osvaldo Aranha, 99, sala 301
<b>Anotações com sugestões para qualificar o trabalho são bem- vindas. O aluno fará as correções e lhe passará a versão final do trabalho, se for de seu interesse.</b>

Porto Alegre  
Dezembro 2018

**DAVI HENRIQUE KLEBER**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE VEDAÇÃO  
VERTICAL EXTERNO COM DIFERENTES TIPOS DE  
ARGAMASSA, ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO  
HIGROTÉRMICA PARA A CIDADE DE PORTO ALEGRE.**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento 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: Angela Borges Masuero**  
**Coorientadora: Rafaela Falcão Socoloski**

Porto Alegre  
Dezembro 2018

**DAVI HENRIQUE KLEBER**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE VEDAÇÃO  
VERTICAL EXTERNO COM DIFERENTES TIPOS DE  
ARGAMASSA, ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO  
HIGROTÉRMICA PARA A CIDADE DE PORTO ALEGRE.**

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

Porto Alegre, dezembro de 2018.

Prof.<sup>a</sup> Angela Borges Masuero  
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande  
do Sul  
Orientadora

Rafaela Falcão Socoloski  
Msc. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul  
Coorientadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof.<sup>a</sup> Laís Zucchetti**  
**UFRGS**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

**Prof. Rômulo Plentz Giral**  
**UFRGS**  
Msc. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

## RESUMO

A umidade está relacionada a diversas manifestações patológicas nas edificações. Conhecer o comportamento higrotérmico dos sistemas construtivos permite avaliar o seu teor e a distribuição da umidade, auxiliando projetistas e fabricantes a identificar situações críticas e possibilidades de melhoria dos sistemas construtivos e seus materiais. Um dos métodos para estudar o comportamento higrotérmico das edificações é através de simulação computacional, na qual são inseridos o modelo matemático que represente a edificação e as condições de contorno à que ela esteja sujeita. Neste sentido, este trabalho busca analisar a influência do tipo de argamassa e do acabamento superficial (com ou sem pintura) no comportamento higrotérmico de Sistemas de Vedação Vertical Externa (SVVE) para a realidade de Porto Alegre/RS através de simulação computacional unidimensional no software WUFI<sup>®</sup> Pro 6.2. O SVVE com espessura total de 19 cm se consistiu em uma camada externa de argamassa, com 3 cm de espessura, bloco cerâmico com 14 cm de espessura, camada interna em argamassa com 2 cm de espessura. Foram feitas seis combinações de materiais para o SVVE, sendo três tipos de argamassa: uma convencional de cimento, cal hidratada e areia, na proporção de 1:1:6 (em volume de materiais secos); uma do tipo industrializado ensacado, múltiplo uso para assentamento e revestimento; e uma argamassa produzida em central com aditivos retardadores (estabilizada); um tipo de bloco cerâmico estrutural de dimensões 14x19x29 cm (largura, altura e comprimento) de resistência característica de 7 MPa, e dois tipos de acabamento superficial (com ou sem pintura acrílica interna e externa). O bloco cerâmico e as argamassas foram caracterizados em laboratório e ensaiados à permeabilidade ao vapor, e se obtiveram também as isotermas das argamassas; os demais parâmetros foram retirados de bibliografia e de relatórios de fabricantes. Cada um dos seis sistemas foi simulado nas quatro orientações principais: Norte, Sul, Leste e Oeste. Os resultados mostraram que o tipo de argamassa influenciou no teor de umidade da parede; nos SVVE com pintura, o sistema com argamassa estabilizada apresentou o menor teor de umidade em todas as orientações; já nos SVVE sem pintura, os resultados apresentaram pouca variação tanto na comparação entre sistemas com argamassas diferentes, quanto comparando orientações diferentes. Além disso, observou-se que os sistemas com pintura apresentaram teor de umidade sempre mais elevado do que o respectivo sistema sem pintura, mostrando que a camada de pintura dificultou mais a saída do que a entrada de umidade na parede. Também foi perceptível a influência da orientação solar no teor de umidade, sendo que os resultados em ordem decrescente de teor de umidade foram Sul, Leste, Oeste e Norte, o que pode ser explicado pelas diferenças na incidência de água da chuva e da radiação incidente total.

Palavras chave: Simulação Higrotérmica. Sistema de Vedação Vertical Externa. Teor de Umidade.

# 1 INTRODUÇÃO

O Sistema de Vedação Vertical Externa (SVVE) juntamente com os outros componentes externos de uma edificação têm a função de abrigar o usuário dos agentes externos, e, portanto toma sobre si grande parte das solicitações climáticas. Dentre as principais solicitações, destacam-se as variações de umidade e temperatura, que resultam da interação de agentes como umidade relativa do ar, precipitação, radiação incidente<sup>1</sup> e ventos. Entretanto, prever as situações críticas denota complexidade, já que o fluxo de umidade e calor é função das várias combinações climáticas possíveis.

Um dos princípios fundamentais de projeto é conhecer as condições de contorno do problema. Determinar extremos de umidade e temperatura em um SVVE não é, todavia, simples. Uma das ferramentas disponíveis é a simulação higrotérmica, que por meio de processamento computacional da envoltória climática e dos parâmetros da edificação permite obter variáveis de resposta capazes de orientar projetistas, fabricantes de materiais e usuários quanto a situações críticas ou extremas de umidade e temperatura.

Em um levantamento que contemplou 1615 edificações na região de Porto Alegre, realizado por Dal Molin (1988), verificou-se que aproximadamente 18% das manifestações patológicas estavam relacionadas à umidade e cerca de 8% estavam ligados a descolamentos do revestimento. Já Glass *et al.* (2013), ressalta que a umidade figura como principal categoria em litígios relacionados a edificações.

A umidade está relacionada com inúmeras manifestações patológicas das edificações. Os ciclos de molhagem e secagem favorecem a corrosão das armaduras e têm importância na durabilidade das estruturas. Muito comuns também são manifestações patológicas como eflorescências, que resultam do fluxo de hidróxido de cálcio do interior da parede para sua precipitação na forma de carbonato de cálcio, e descolamento da camada de pintura, ambos relacionados ao fluxo de umidade. Já a alta umidade relativa e a baixa incidência de radiação favorecem desenvolvimento de microorganismos pertencentes à classe dos fungos, que podem provocar a perda de aderência de revestimentos (DAL MOLIN, 1988). Os microorganismos também têm influência negativa na saúde dos usuários, e as condições que favorecem o seu desenvolvimento são temperatura e umidade elevadas, tempo de exposição, sensibilidade do substrato e não incidência de radiação (BORNEHAG *et al.*, 2001 e 2004) e (WUFI, 2018). A

---

<sup>1</sup> A radiação que incide sobre uma edificação é um somatório de: radiação solar, que é caracterizada pelos menores comprimentos de onda e inclui a luz visível; radiação da atmosfera e dos corpos terrestres, que é caracterizada pelos comprimentos de onda maiores, tipicamente na faixa do infravermelho; e a radiação refletida. Neste trabalho, o termo radiação incidente se refere ao somatório aqui explicado, enquanto que o termo radiação solar faz referência apenas à radiação de ondas curtas provenientes do sol.

norma ANSI ASHRAE 160:2009, também estabelece limites de umidade e temperatura relacionados ao possível desenvolvimento de bolor nos materiais de construção.

O desempenho higrotérmico da edificação está diretamente ligado às questões de manifestações patológicas (NASCIMENTO, 2016), e ao desempenho energético. Na nova Diretriz Europeia de Desempenho Energético em Edificações (EPBD, 2010), por exemplo, exigências por materiais com resistência térmica mais alta incentivam ainda mais o aprimoramento dos materiais e das técnicas construtivas através de simulações computacionais. Já a norma DIN EN 15026:2007 para simulação higrotérmica define os seguintes fenômenos de transporte de umidade e calor: armazenamento de calor por materiais secos e água absorvida; fluxo de calor por condutividade térmica em função da umidade; fluxo de calor latente por difusão de vapor; armazenamento de umidade por absorção de vapor e forças capilares; fluxo de umidade por difusão de vapor; fluxo de umidade por transporte líquido. O WUFI<sup>®</sup> Pro (Wärme Und Feuchte Instationär) é um dos softwares utilizados atualmente para analisar em uma dimensão a resposta higrotérmica de sistemas construtivos segundo envoltórias climáticas. Ele está validado segundo a norma DIN EN 15026: 2007 e foi utilizado neste trabalho, em especial por disponibilizar versão acadêmica completa e gratuita.

Buscando analisar os sistemas construtivos utilizados na cidade de Porto Alegre/RS, este trabalho se propõe a fazer simulações higrotérmicas de Sistemas Verticais de Vedação Externa (SVVE) utilizados na região. Os sistemas analisados foram compostos por três tipos diferentes de argamassa de revestimento e um tipo de bloco cerâmico. Foram analisadas também quatro orientações principais: norte, sul, leste e oeste, e de dois tipos de acabamento superficial: com pintura acrílica externa e interna, e sem pintura.

Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é avaliar se o tipo de argamassa, a orientação solar e o acabamento superficial têm influência no teor de umidade do SVVE, utilizando como método de análise a simulação higrotérmica através do software WUFI<sup>®</sup> Pro 6.2.

O objetivo específico do trabalho é obter parâmetros higrotérmicos das argamassas e do bloco cerâmico através de ensaios de laboratório, gerando uma base de dados com parâmetros necessários à simulação higrotérmica; além disso, realizar a análise do índice de crescimento de fungos nas paredes internas através do software.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram analisados seis sistemas, utilizando um mesmo bloco cerâmico estrutural (14x19x29 cm (largura x altura x comprimento) e resistência característica de 7 MPa); três tipos de argamassa: convencional (AC), industrializada ensacada (AI) e estabilizada (AE); e ainda variando o acabamento superficial: com pintura interna e externa (CP) e sem pintura (SP). Assim, os seis sistemas simulados foram:

SAC\_SP: Sistema com argamassa convencional sem pintura;

SAI\_SP: Sistema com argamassa industrializada sem pintura;

SAE\_SP: Sistema com argamassa estabilizada sem pintura;

SAC\_CP: Sistema com argamassa convencional com pintura externa e interna;

SAI\_CP: Sistema com argamassa industrializada com pintura externa e interna;

SAE\_CP: Sistema com argamassa estabilizada com pintura externa e interna.

### 2.1 Definição e caracterização dos materiais

A região de Porto Alegre/RS apresenta uma variedade de SVVE relativamente pequena. Os métodos tradicionais e pouco industrializados ainda fazem parte da realidade de muitas edificações novas e antigas. Dentre os sistemas em uso atualmente pelas principais construtoras, destacam-se: alvenaria com revestimento em argamassa cimentícia; sistema em *dry-wall*, utilizado principalmente por grandes construtoras para compartimentação dos ambientes (paredes internas); sistema em *ligh-steel-frame*, ainda embrionário no mercado regional; e paredes de concreto, utilizado majoritariamente em programas habitacionais de interesse social. Para este estudo, foi escolhido o sistema de alvenaria com revestimento de argamassa, visto que ainda é amplamente utilizado.

#### 2.1.1 Argamassa

As argamassas disponíveis em Porto Alegre dividem-se em três grupos principais: argamassa convencional preparada em obra, de cimento, cal hidratada e areia (podendo ou não conter aditivos); argamassas industrializadas ensacadas; e a mais recente, a argamassa produzida em central, comumente denominada estabilizada. As construtoras optam, em geral, por argamassas industrializadas ensacadas, visto que suas propriedades já são amplamente conhecidas e a logística de distribuição dos fabricantes é bem estabelecida. Já o uso da argamassa produzida em central tem crescido significativamente, visto que ela elimina a tarefa de mistura da massa e permite ganhos logísticos e com menor demanda de mão de obra;

porém, as construtoras têm adotado cautela no seu uso, visto que é um material relativamente mais novo e menos conhecido pelo mercado. Por outro lado, em muitas cidades da região, ainda se utiliza a argamassa convencional, devido à distância dos fornecedores e às características artesanais da mão de obra.

Este trabalho utilizou como referência três argamassas. A primeira delas foi um traço convencional de cimento:cal:areia de 1:1:6 (em volume de materiais secos). A segunda argamassa escolhida foi do tipo industrializada ensacada, múltiplo uso para assentamento e revestimento, a qual é fornecida seca geralmente em sacos de 20 kg. A terceira argamassa analisada foi do tipo produzida em central, com aditivo estabilizador de hidratação para até 36 horas, que permite o seu uso e armazenamento por até 36 horas, se observadas as recomendações do fabricante. Esta argamassa foi cedida por um dos principais fornecedores da cidade, responsável por produzir diariamente cerca de 1000 m<sup>3</sup> entre concretos e argamassas. A partir daqui, as três argamassas serão chamadas respectivamente de argamassa convencional, argamassa industrializada, e argamassa estabilizada.

Os procedimentos de preparo da argamassa convencional e industrializada seguiram as recomendações da ABNT NBR 16541:2016. Já a argamassa estabilizada foi coletada pronta na central, armazenada em baldes com tampa e foi mantida uma camada de água sobre a argamassa. Ao chegar no laboratório, passados aproximadamente 30 minutos da coleta, a camada de água superficial foi retirada e a argamassa foi homogeneizada com colher. A argamassa convencional foi dosada para um índice de consistência de  $250 \pm 10$  mm; a argamassa industrializada foi preparada com o valor máximo de água recomendado pelo fabricante, porém não se atingiu a consistência de  $250 \pm 10$  mm; a argamassa estabilizada não recebeu qualquer adição de água posterior à do fabricante. A relação de água/materiais secos e a retenção de água não puderam ser calculadas para a argamassa estabilizada por não se dispor das informações dos materiais secos.

### *2.1.2 Bloco*

No Rio Grande do Sul, a alvenaria de blocos cerâmicos tem grande representatividade devido à qualidade e disponibilidade de jazidas da matéria prima. Dados da Caixa Econômica Federal reforçam esta noção, já que 80% dos empreendimentos cadastrados no PAR (Programa de Arrendamento Residencial) entre os anos de 2001 a 2008 foram executados com alvenaria estrutural de blocos cerâmicos (POYASTRO, 2008). Já a partir de 2013, com a introdução da norma de desempenho ABNT NBR 15575:2013, os fabricantes de blocos se viram obrigados

a reavaliar seus produtos no sentido de atender aos novos requisitos de conforto e desempenho.

Na região de Porto Alegre basicamente são três os blocos cerâmicos mais comercializados: 11,5x19x29 cm, 14x19x29 cm e 19x19x29 cm (largura x altura x comprimento). A partir da análise dos relatórios técnicos de um dos principais fabricantes, escolheu-se adotar nas simulações o bloco cerâmico estrutural de largura 14 cm e resistência característica de 7 MPa, por este atender os critérios de transmitância e capacidade térmica previstos nas normas ABNT NBR 15220-3:2005 para a zona bioclimática 3<sup>2</sup> e aos requisitos da norma de desempenho ABNT NBR 15575-4:2013, conforme Tabela 1 a seguir. Além disso, os relatórios indicaram um índice de redução sonora ponderado  $R_w$  igual tanto para o bloco de largura 14 cm quanto para o bloco de largura 19 cm.

Tabela 1 - Requisitos térmicos para paredes (ABNT NBR 15220-3:2005; ABNT NBR 15575-4: 2013)

Transmitância térmica U [W/m <sup>2</sup> .K]		
NBR 15220 - zona bioclimática 3	NBR 15575 - zona bioclimática 3	Relatório do fabricante bloco 14Lx19Hx29C
$U \leq 3,60$	$U \leq 3,70$	$U = 2,3$

Capacidade térmica CT [kJ/m <sup>2</sup> .K]		
NBR 15220 - zona bioclimática 3	NBR 15575 - zona bioclimática 3	Relatório do fabricante bloco 14Lx19Hx29C
-	$CT \geq 130$	$CT = 81^3$

(fonte: elaborada pelo autor)

Os blocos cerâmicos utilizados neste trabalho foram os mesmos caracterizados por Antunes (2016) em sua tese no Laboratório de Materiais e Técnicas do Ambiente Construído (LAMTAC) no Núcleo Orientado para Inovação na Edificação (NORIE), com dimensões nominais de 14 x 19 x 29 cm (largura, altura e comprimento) e resistência característica de 7 MPa. O lote de blocos esteve armazenado em local fechado e abrigado da chuva e do sol entre o período em que foi utilizado por Antunes até a data deste trabalho.

### 2.1.3 Permeabilidade ao vapor

O fluxo de vapor de água através da parede tem importante papel nos ciclos de umidade de uma edificação. O software WUFI<sup>®</sup> Pro 6.2 indica uma lista com as propriedades necessárias

<sup>2</sup> A ABNT NBR 15220-3:2005 divide o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas, nas quais o clima é considerado homogêneo. Para cada zona bioclimática, a norma faz recomendações construtivas específicas.

<sup>3</sup> Valor de capacidade térmica referente à parede sem revestimento, que é inferior ao valor mínimo indicado na ABNT NBR 15575-4:2013. Com revestimento de argamassa de 2,5 cm em apenas uma das faces, o sistema com bloco cerâmico de largura 14 cm já atende à capacidade térmica mínima prevista na norma.

à simulação e as respectivas normas recomendadas. Neste trabalho, as argamassas e o bloco cerâmico foram ensaiados à permeabilidade ao vapor segundo a norma ASTM E96/E96M: 2016 pelo método do dessecante.

O ensaio de permeabilidade ao vapor seguiu uma metodologia semelhante à adotada por Salomão (2016). Foi utilizada uma câmara com umidade relativa controlada por solução salina saturada de cloreto de sódio e temperatura ambiente média controlada; o dessecante utilizado foi o cloreto de cálcio. Durante os ensaios das argamassas, a temperatura média foi de  $22,3^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  e a umidade média foi de  $77,2\% \pm 1,1\%$ . No decorrer dos ensaios do bloco cerâmico, a temperatura média foi de  $22,2^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  e a umidade média foi de  $74,9\% \pm 0,3\%$ .

As amostras de argamassa foram moldadas com uma espessura de aproximadamente 2,5 cm em fôrmas de *PVC*. Após 28 dias, foi montado o conjunto para avaliação da permeabilidade ao vapor, que consistiu em posicionar o corpo de prova em outra fôrma de *PVC* em formato de copo, este contendo o dessecante (Figura 1). A vedação das amostras foi feita com silicone e se considerou no cálculo a redução da área permeável das amostras devido ao selante.

Figura 1 - preparo da amostra de argamassa para o ensaio de permeabilidade ao vapor (ASTM E96 / E96M, 2016).

- a) Amostra de argamassa; b) recipiente com dessecante cloreto de cálcio; c) amostra pronta selada com silicone.



(a)

(b)

(c)

(fonte: elaborada pelo autor)

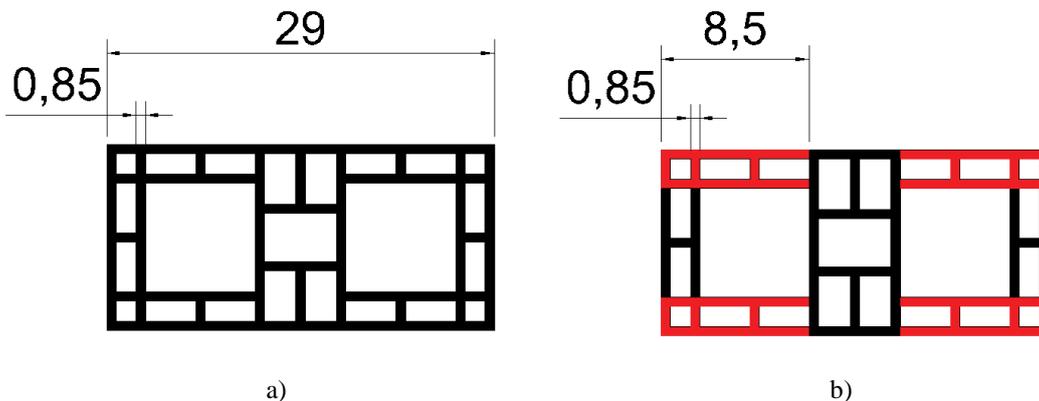
O bloco cerâmico seguiu uma metodologia adaptada da norma ASTM E96/E96M pelo autor. Dada a necessidade de reduzir as dimensões do bloco para possibilitar o ensaio nas condições de laboratório, buscou-se manter a proporção geométrica. A extração de amostras em formato cilíndrico se mostrou muito difícil, pois a extratora acabava por danificar o bloco, além de ser

difícil se obter uma amostra significativa da geometria interna do bloco. Portanto, optou-se por retirar amostras retangulares através do corte com serra circular portátil.

Como o bloco cerâmico não é maciço, o fluxo de umidade se dá tanto através do ar quanto através do material cerâmico. Foi considerado um índice de paredes, que é o somatório do comprimento das paredes dividido pelo comprimento do bloco. Este índice representa, em percentual, a área de paredes do bloco cerâmico paralelas ao fluxo de umidade em relação à área total do bloco. No bloco inteiro, este índice é de aproximadamente 26% (Figura 2a). Para extrair as amostras do bloco, buscou-se um tamanho de amostra que tivesse um índice de paredes próximo ao do bloco inteiro. Desta forma, obtiveram-se as amostras em vermelho (Figura 2b), com comprimento total de 8,5 cm, e que tem um índice de paredes de aproximadamente 30%. As amostras foram ensaiadas em recipientes de vidro, com dessecante de cloreto de cálcio e selante à base de poliuretano (Figura 3).

Figura 2 – Vista superior do bloco cerâmico e definição do índice de paredes. Unidades em centímetros.

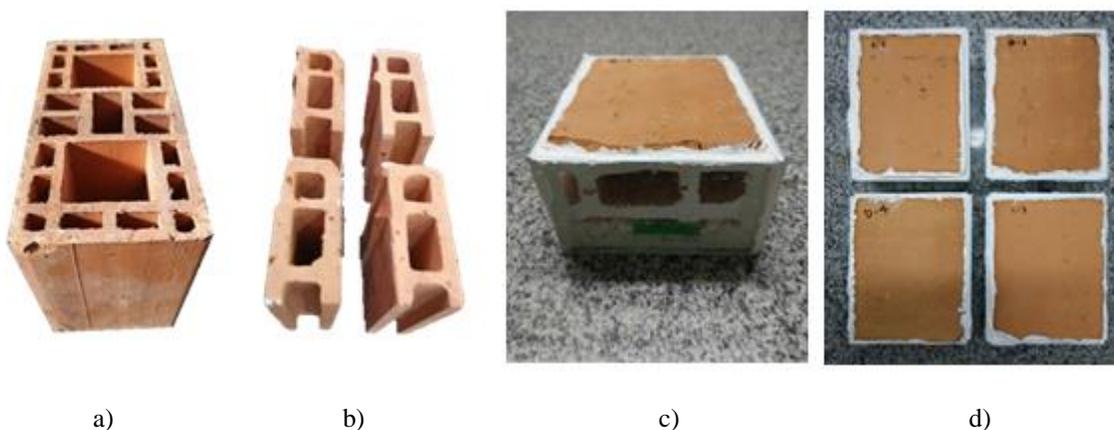
- a) Índice de paredes para o comprimento total do bloco; b) Índice de paredes para a amostra e identificação da região do bloco de onde elas foram obtidas (em vermelho).



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 3 – ensaio de permeabilidade ao vapor para o bloco cerâmico (ASTM E96 / E96M, 2016).

a) Bloco cerâmico estrutural,  $f_{bk}$  7 MPa, 14x19x29 (LxAxC); b) Amostra do bloco, conforme Figura 2b; c) Amostra em corpo de prova de vidro, vedada com selante branco a base de poliuretano, com dessecante Cloreto de cálcio; d) Vista superior das amostras seladas prontas para o ensaio.



(fonte: própria do autor)

#### 2.1.4 Isotermas de adsorção e dessorção

Este ensaio foi realizado segundo a norma ASTM C1498: 2004 e seu objetivo foi determinar o teor de umidade de equilíbrio da argamassa segundo cada umidade relativa do ambiente, para uma temperatura constante. A isoterma de adsorção é obtida a partir das amostras secas de argamassa e ocorre através do fenômeno de migração do vapor de água presente no ar para o interior do material, até se atingir uma condição de equilíbrio. Já a isoterma de dessorção parte de amostras saturadas e ocorre através do fenômeno de evaporação da umidade presente no material, até atingir uma condição de equilíbrio com a umidade relativa do ar. A própria norma descreve o fenômeno de histerese<sup>4</sup>, que define que a curva de adsorção é diferente da curva de dessorção devido à diferença do nível de energia da água nos poros do material. O método de ensaio adotado foi muito semelhante ao descrito por Salomão (2016). Foram utilizadas quatro soluções salinas para controle da umidade relativa do ar: Cloreto de magnésio ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ), Dicromato de sódio ( $Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$ ), Cloreto de sódio ( $NaCl$ ) e Fosfato de amônio bibásico ( $(NH_4)_2HPO_4$ ). A temperatura média durante o ensaio foi de  $21,7 \pm 0,7$  °C.

<sup>4</sup> O dicionário Aurélio define histerese como um fenômeno apresentado por alguns sistemas ou materiais que conservam as suas propriedades mesmo na ausência do estímulo que as gerou.

## 2.2 Transporte de umidade nos materiais

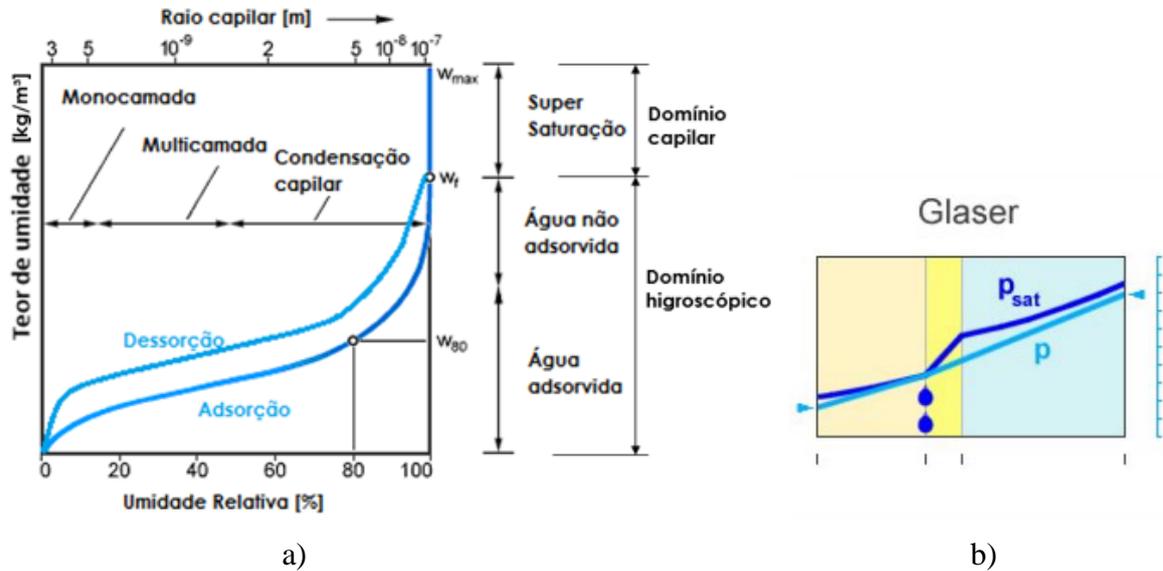
Através das isotermas é possível observar que é normal as argamassas absorverem umidade, mesmo em umidades relativas do ar inferiores a 100%. Essa característica é própria dos materiais higroscópicos e é uma das diferenças importantes da simulação higrotérmica em relação a outros métodos.

O método Glaser considera materiais não higroscópicos (DIN EN ISO 13788, 2013) e foi desenvolvido para o projeto de sistemas de vedação com camada de isolamento para câmaras frias. Neste método, calcula-se, para uma condição estacionária de temperatura e umidade, o fluxo de calor e vapor d'água através da parede. Se, em algum ponto ao longo da parede, a pressão de vapor atingir a pressão de vapor de saturação (que corresponde ao ponto de orvalho), a umidade relativa atingirá 100% e haverá condensação de água (Figura 4b). As normativas estabelecem teor de umidade limites para a interface com a camada de isolamento, visto que estes materiais geralmente não têm a capacidade de absorver a umidade; nesse método estacionário de cálculo, o único fenômeno de transporte de umidade considerado é a difusão de vapor d'água (WUFI, 2018).

A simulação higrotérmica considera, além do transporte de água na forma de vapor, o transporte na forma líquida e as características higrotérmicas e a capilaridade dos materiais. A condição de condensação pode ser atingida, entretanto muitas vezes é necessário um tempo elevado das condições de contorno em seus valores extremos para que se atinja a condensação; além disso, o aumento do teor de umidade no material tende a reduzir a sua permeabilidade ao vapor e aumentar a condução por capilaridade (WUFI, 2018). Portanto, a simulação higrotérmica se mostra mais eficiente na avaliação do teor de umidade dos materiais.

Figura 4 – Fenômenos relacionados ao transporte de umidade nos materiais.

a) Isotermas de adsorção e dessorção e fenômenos relacionados ao aumento do teor de umidade de materiais higroscópicos; b) Condensação interna pelo método Glaser. Material não higroscópico.



(fonte: NASCIMENTO, 2013)

(fonte: WUFI, 2018)

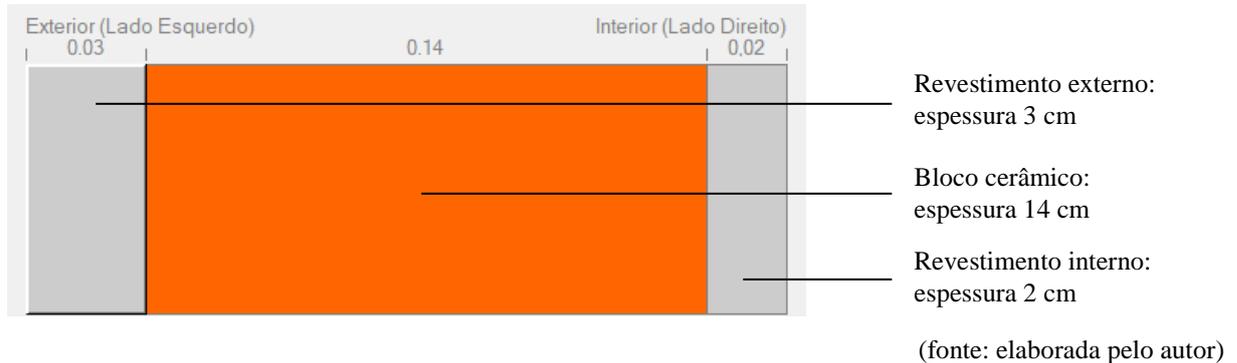
## 2.3 Simulação Higrotérmica

Os materiais descritos foram simulados no software WUFI<sup>®</sup> Pro 6.2, disponível completo em versão educacional. A seguir, serão descritos os dados de entrada do software, que se dividem em parâmetros dos materiais e parâmetros climáticos. A matriz de simulações foi feita com os seis sistemas descritos, sendo três tipos de argamassa, um tipo de bloco cerâmico, dois tipos de acabamento superficial (com ou sem acabamento pintura acrílica interna e externa); cada um deles analisado em quatro orientações solares diferentes, obtendo-se, assim, vinte e quatro resultados.

### 2.3.1 Parâmetros de entrada dos materiais

A NBR 13749:2013 (ABNT, 2013) recomenda que a espessura do revestimento externo executado em camada única seja de 2 cm a 3 cm, e revestimento interno seja de 0,5 a 2 cm. Entretanto, em estudo realizado por Costa (2005) em oito empresas na cidade de Porto Alegre, observou-se que a espessura média dos revestimentos externos em argamassa estava entre 3 cm e 3,5 cm. Portanto, o autor deste trabalho optou por adotar nas simulações a espessura máxima permitida por norma para revestimento executado em uma camada, 3 cm para a face externa e 2 cm para a face interna. Não foi considerada camada de chapisco.

Figura 5 - Perfil de Sistema de Vedação Vertical Externo simulado no WUFI®.



Os dados de resistência térmica superficial foram definidos conforme indicado na Tabela A.1 da ABNT NBR 15220-2: 2005, sendo  $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  para a resistência térmica superficial externa e  $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  para resistência térmica superficial interna. Para a absorvância<sup>5</sup> se adotou o valor intermediário de 0,4 indicado para reboco claro na Tabela B.2 da ABNT NBR 15220-2: 2005, e o mesmo valor também foi adotado para a pintura. O fator de redução de chuva incidente ( $Fr$ ) indica a parcela da chuva dirigida que estará de fato disponível para a absorção capilar pela parede, visto que parte das gotas d'água que atingem a superfície são refletidas e portanto não devem ser consideradas. Este fator depende das características da superfície, entretanto o valor de 0,7 é indicado pelo software como padrão para superfícies verticais. A reflexividade do solo de 0,2 também é o valor padrão indicado pelo software. Uma síntese dessas e outras propriedades superficiais será apresentada ao final do item 2.3.

O tratamento superficial com pintura pode ser simulado de diferentes formas no software. A alternativa adotada neste trabalho utiliza o valor  $S_d$ , dado em metros, que indica a espessura de uma camada de ar fictícia que corresponderia à mesma resistência à difusão de vapor da camada de pintura. O valor  $S_d$  também pode ser entendido como o produto do fator de resistência à difusão  $\mu$  pela espessura da camada, em metros (WUFI, 2018). Para os casos com pintura externa e interna, o valor de  $S_d$  adotado foi de 0,5 m, que é próximo aos valores encontrados por Šadauskiene *et al.* (2010) para pintura acrílica e também foi utilizado em estudo realizado por Künzle *et al.* (2004). Optou-se por adotar tinta acrílica, por esta ser amplamente difundida na região em questão. O manual do software também indica que a absorção de água da chuva é reduzida quando há simulação de camada de pintura. Dessa forma, o coeficiente de capilaridade foi dividido por um fator de 10 para as argamassas com

<sup>5</sup> A absorvância de 0,4 foi adotada tanto para os sistemas com quanto sem pintura, de forma que esta não fosse uma variável da análise.

camada de pintura, conforme prática adotada em relatório técnico de empresa parceira do WUFI® no Canada e Estados Unidos.

### 2.3.2 Chuva incidente

O método de cálculo para a chuva incidente foi o proposto pelo WUFI (2018), que segue as Equações 1 e 2. O coeficiente  $R_1$  tem valor nulo para superfícies verticais, já o coeficiente  $R_2$  aumenta conforme a altura do edifício. Neste trabalho foi adotada uma altura intermediária, que representa a chuva incidente entre 10 e 20 metros de altura em relação ao solo, com coeficiente  $R_2$  igual a 0,1. A quantidade água de chuva que realmente é considerada para a absorção capilar dos materiais é dada pela Equação 2.

A umidade inicial dos componentes do sistema foi considerada como 80%, conforme indicado no manual do software. O teor de umidade correspondente de cada material é lido pelo software na respectiva curva higroscópica.

$$I = P \times (R_1 + R_2 \times V) \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde:

$I$  = intensidade de chuva, em mm/h;

$P$  = precipitação, em mm/h;

$V$  = velocidade do vento, em m/s;

$R_1$  = coeficiente que depende da inclinação da superfície;

$R_2$  = coeficiente que depende da altura da edificação.

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

Onde:

$C$  = carga de chuva na parede, em mm/h;

$I$  = Intensidade de chuva, em mm/h;

$Fr$  = Fator de redução da chuva incidente, adimensional.

### 2.3.3 Período de simulação

A observação dos resultados mostrou que, para os materiais simulados, o tempo necessário para o sistema atingir a estabilidade dinâmica foi de dois a cinco anos para os sistemas sem pintura e de até doze anos para sistemas com pintura. A partir daí, o ciclo anual de temperatura e umidade nos componentes do sistema passa a se repetir. Dessa forma, adotou-se o período de simulação de cinco anos para os casos sem pintura e doze anos para os casos com pintura.

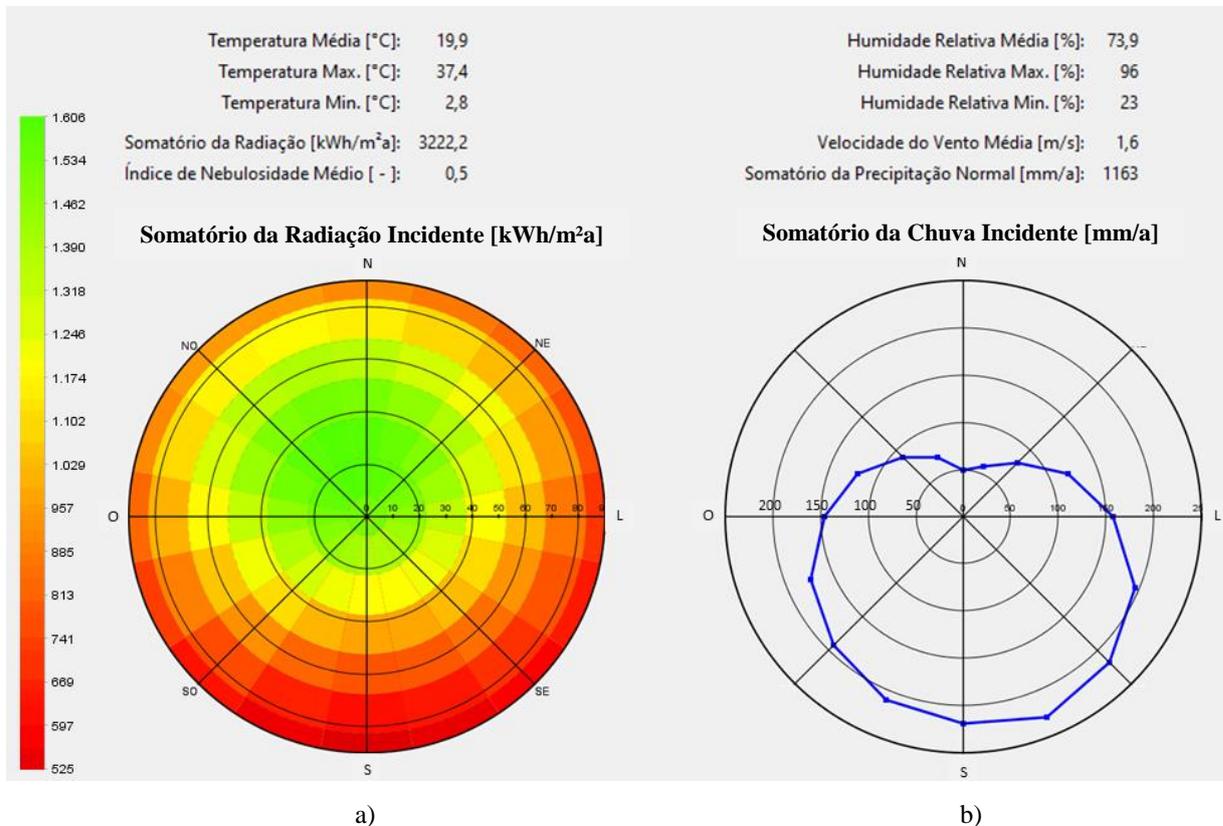
#### 2.3.4 *Clima externo*

O arquivo climático com as informações da localidade de Porto Alegre foi obtido de Roriz (2012), no formato de arquivo para o software Energy Plus<sup>®</sup>, que também pode ser lido pelo WUFI<sup>®</sup>. Este arquivo tem dados de um ano típico, ou seja, é obtido a partir de uma série histórica de dados, da qual são excluídos os valores extremos e se obtêm um ano médio. Este ano típico pode nunca acontecer na realidade, mas representa uma tendência média das variações climáticas anuais locais.

Na Figura 6 está representada uma análise do clima de Porto Alegre gerada no WUFI<sup>®</sup> a partir do arquivo climático de Roriz (2012). A Figura 6a representa a radiação total incidente em cada orientação solar, em kWh/m<sup>2</sup>a. As áreas em verde indicam maior incidência de radiação, e as áreas em vermelho são as de menor incidência. Como esperado, o lado Norte apresenta a maior incidência e o lado Sul, a menor incidência de radiação. Entretanto, o diagrama mostra que no Oeste há maior incidência de radiação do que o Leste, apesar de a radiação proveniente do sol atingir de forma simétrica estas duas orientações. Essa diferença pode então ser explicada pela radiação de ondas longas que é emitida pelos corpos terrestres e pela atmosfera ao serem aquecidos. Esse fenômeno de aquecimento dos corpos terrestres e da atmosfera ocorre ao longo do dia, começando com os corpos frios no nascer do sol (que ocorre no Leste), até atingir a temperatura máxima no período da tarde, quando a incidência solar se dá do lado Oeste. Dessa forma, durante a tarde, o lado Oeste recebe simultaneamente a radiação solar e a radiação dos corpos terrestres, e por isso apresenta somatório de radiação incidente maior do que o lado Leste. A temperatura média anual foi de 19,9°C, a máxima foi de 37,4 °C e a mínima foi de 2,8 °C.

Figura 6 – Análise da radiação e chuva dirigida para o clima de Porto Alegre feita pelo WUFI® Pro 6.2.

a) Somatório da radiação incidente (kWh/m<sup>2</sup>a); b) Somatório da chuva incidente (mm/h)



(fonte: elaborada pelo autor)

A chuva incidente segundo a orientação solar pode ser observada na Figura 6b. Nota-se que a orientação que recebe a maior quantidade de chuva é a Sul-sudeste, enquanto a menor quantidade fica no lado Norte. Esta análise se mostra muito semelhante ao descrito por Zucchetti et al. (2016), que indicou o maior índice de chuva dirigida para a orientação Sudeste.

Para as simulações, foram escolhidas quatro orientações. As primeiras escolhas foram as orientações onde estão os valores extremos de radiação incidente e chuva, portanto Norte e Sul. Como o software só permite uma das oito orientações indicadas na Figura 6b, não era possível simular a Sul-sudeste; como Sul e Sudeste apresentaram incidência de chuva semelhante, optou-se por escolher Sul, que é também o ponto de mínima radiação incidente. As duas outras orientações escolhidas foram Leste e Oeste, e se justificam por representarem pontos intermediários, já que os extremos já foram contemplados. Além disso, elas vão permitir observar o impacto da variação de chuva e radiação incidente nos parâmetros higrômicos dos SVVE.

### *2.3.5 Clima interno*

O WUFI<sup>®</sup> Pro 6.2 apresenta três possibilidades para simulação do clima interno da edificação, que são baseadas nas seguintes normas: DIN EN 15026:2007, DIN EN ISO 13788:2013 e ANSI ASHRAE 160:2009. Entretanto, elas são de uma realidade na qual as edificações possuem sistema de condicionamento da temperatura interna da edificação, e por vezes também controle de umidade. Por isso, muitas delas não permitem amplitudes térmicas e de umidade das edificações em uma realidade como a de Porto Alegre. A opção que permitiu maior flexibilidade neste sentido foi a ANSI ASHRAE 160:2009, pois foi possível configurar a temperatura em que o sistema de ar condicionado deveria ligar (40°C) e a temperatura em que o sistema de aquecimento ligaria (0°C), que estão fora da amplitude local, portanto o sistema de condicionamento da temperatura não atua. A umidade relativa do ar interno, por sua vez, só atinge o máximo de 70%, sendo esta uma limitação do método. Nesta configuração também foi possível definir a taxa horária de renovação do ar para 1,00, valor sugerido na ABNT NBR 15575-1:2013.

Tabela 2 - Síntese dos parâmetros de entrada para simulação de Sistema com Argamassa Convencional Sem Pintura.

Parâmetro de entrada	Símbolo	Valor	Unidade
<b>Elemento Construtivo</b>			
Argamassa convencional - Rev. Externo	-	0,03	m
Bloco cerâmico	-	0,14	m
Argamassa convencional - Rev. Interno	-	0,02	m
<b>Orientação, Inclinação, altura e chuva dirigida</b>			
Orientação	Sul	-	-
Inclinação	(i)	90	°
Altura	(h)	10-20	m
Chuva incidente - Método WUFI®	$R_{wdr}$	-	L/m <sup>2</sup> h
<b>Coefficiente de transferência à superfície</b>			
Resistência superficial externa	$R_{se}$	0,04	m <sup>2</sup> K/W
Valor de Sd	$S_d$	-	m
Absortância	$\alpha$	0,4	-
Refletividade do solo	r	0,2	-
Fator de redução da chuva dirigida	Fr	0,7	-
Resistência superficial interna	$R_{si}$	0,13	m <sup>2</sup> K/W
Valor de Sd	$S_d$	-	m
<b>Condições iniciais de contorno</b>			
Umidade inicial	-	0,8	-
Temperatura inicial	-	20	°C
Período de simulação	5 anos		
<b>Clima</b>			
Clima exterior	Arquivo climático (RORIZ, 2012)		
Clima interior	De acordo com a ASHRAE 160		

(fonte: adaptado de NASCIMENTO, 2016)

## 2.4 Desenvolvimento de fungos

O *plug-in* WUFI VTT® utiliza como condições limites para mensurar o índice de desenvolvimento de fungo os critérios da norma ANSI ASHRAE 160:2009. Ele também é compatível com resultados da simulação higrotérmica do WUFI® Pro 6.2. A norma ANSI ASHRAE 160:2009 estabelece que não haverá problemas com desenvolvimento de fungos se a superfície da parede se mantiver abaixo das seguintes condições:

- a) Trinta dias com umidade relativa superficial média maior ou igual a 80%, quando a média da temperatura superficial no período estiver entre 5 °C e 40 °C;
- b) Sete dias com umidade relativa superficial média maior ou igual a 98%, quando a média da temperatura superficial no período estiver entre 5 °C e 40 °C;
- c) Vinte e quatro horas com umidade relativa superficial média igual a 100%, quando a média da temperatura superficial no período estiver entre 5 °C e 40 °C.

O modelo utilizado no software foi proposto por Hukka *et al.* (1999) e Viitanen *et al.* (2000), e também estabelece que o material do substrato pode ser mais, ou menos, propenso ao desenvolvimento dos fungos. Dessa forma, classifica os materiais segundo classes de sensibilidade da Tabela 3:

Tabela 3 – Classe de sensibilidade dos materiais ao desenvolvimento de fungos (ANSI ASHRAE 160:2009). Tradução própria.

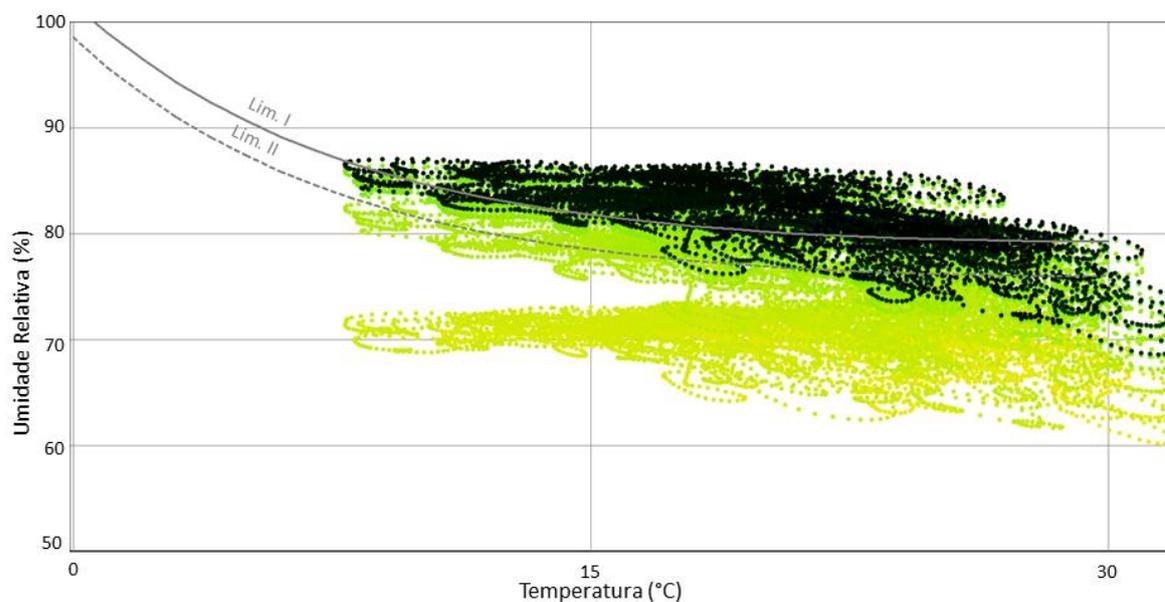
<b>Classe de sensibilidade a fungos</b>	<b>Materiais</b>
Muito sensível	Madeira não tratada, inclui muitos nutrientes para crescimento biológico
Sensível	Madeira serrada, materiais à base de papel, materiais à base de madeira
Medianamente resistente	Materiais à base de cimento ou plástico, fibras minerais
Resistente	Vidro, metal, materiais com bom tratamento para proteção

(fonte: adaptado de WUFI<sup>®</sup> Mould Index VTT Help, 2018)

Uma das possibilidades de visualização dos limites de umidade e temperatura estabelecidos na norma ANSI ASHRAE 160:2009 é através das isopletras, que são gráficos com umidade relativa no eixo das ordenadas, e temperatura no eixo das abcissas. Neste gráfico, são plotados o limite I, que indica substratos bio-utilizáveis, como papel de parede, gesso acartonado e outros materiais mais sensíveis a microorganismos; e o limite II, que representa substratos menos sensíveis, em geral com estrutura porosa, como materiais de origem mineral, gesso, materiais de isolamento, etc (SEDLBAUER, 2001). Ao plotar os pontos de umidade e temperatura de uma área da parede no gráfico das isopletras, é possível verificar se algum dos limites é ultrapassado. As cores do gráfico estão relacionadas ao tempo; pontos próximo ao início da simulação são amarelos, e vão escurecendo a medida que se aproximam do fim do período simulado. Os pontos escuros representam o equilíbrio dinâmico que o sistema atinge. Um exemplo de isopletra com os limites I e II pode ser visto na Figura 7 abaixo. É importante destacar que o software faz esta análise apenas para a superfície interna da parede e ressalta que ele recomenda uma análise mais detalhada para resultados conclusivos.

O WUFI VTT<sup>®</sup> analisa a problemática através do Índice de Crescimento de Fungos (*Mould Growth Index*, MGI), baseado nas pesquisas de Viitanen *et al.* (2007) e interpretado conforme a Tabela 4.

Figura 7 – Isopleta com os limites I e II (WUFI, 2018).



(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 4 – Interpretação do Índice de Crescimento de Fungos.

MGI	Descrição da taxa de crescimento de fungos
0	Não há crescimento
1	Pequena quantidade de fungos na superfície (microscópico), estágios iniciais de crescimento local.
2	Várias colônias localizadas de fungos locais (microscópico)
3	Identificação visual de crescimento de fungos na superfície, < 10% de cobertura, ou > 50 % de cobertura de fungos (microscópico)
4	Identificação visual do crescimento de fungos na superfície, 10 - 50 % de cobrimento, ou > 50% de cobrimento (microscópico)
5	Muito crescimento de fungos na superfície, > 50% de cobrimento (visual)
6	Crescimento denso, com cobrimento próximo de 100%

(fonte: adaptado de WUFI® Mould Index VTT Help, 2018)

### 3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 3.1 Resultados experimentais

##### 3.1.1 Argamassa

As argamassas foram caracterizadas no estado fresco e endurecido (28 dias), conforme descrito no subitem 2.2.1. Os resultados dos ensaios de caracterização se encontram na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido.

CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO					
Norma	Ensaio	Unidade	Convencional	Industrializada	Estabilizada
NBR 13276	Índice de consistência	[mm]	259	229	225
NBR 13276	Relação água/materiais secos	[ - ]	0,10	0,15	-
NBR 13277	Retenção de água	[ % ]	94%	99%	-
NBR 13278	Densidade de massa	[kg/m <sup>3</sup> ]	1950	1461	1780
CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO					
Norma	Ensaio	Unidade	Convencional	Industrializada	Estabilizada
NBR 9778	Absorção	[ % ]	17%	36%	15%
NBR 9778	Índice de vazios	[ % ]	30%	49%	24%
NBR 9778	Massa específica amostra seca	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,76	1,34	1,64
NBR 9778	Massa específica amostra saturada	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,06	1,83	1,88
NBR 9778	Massa específica real	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,51	2,63	2,17
NBR 13280	Densidade	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,75	1,43	1,66
NBR 13259	Absorção por capilaridade t=10 min	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,202	0,141	0,113
NBR 13259	Absorção por capilaridade t=90 min	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,688	0,535	0,293
NBR 13259	Coeficiente de capilaridade	g/dm <sup>2</sup> .min <sup>0,5</sup>	4,808	4,409	2,208
NBR 15630	Módulo de elasticidade dinâmico	[MPa]	8375	7398	8277
NBR 13279	Resistência à tração na flexão	[MPa]	1,14	0,80	1,36
NBR 13279	Resistência à compressão	[MPa]	4,25	1,96	3,90

(fonte: elaborada pelo autor)

### 3.1.2 Bloco cerâmico

A caracterização física e mecânica do bloco cerâmico foi feita anteriormente por Antunes (2016), e os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização física e mecânica do bloco cerâmico (ANTUNES, 2016).

Norma	Ensaio	Unidade	Resultado
NBR 15270-3	Resistência à compressão	[MPa]	7,58
NBR 15270-3	Largura média	[mm]	140,62
NBR 15270-3	Altura média	[mm]	191,02
NBR 15270-3	Comprimento médio	[mm]	290,55
NBR 15270-3	Massa seca	[g]	6076,01
NBR 15270-3	Massa úmida	[g]	6828,18
NBR 15270-3	Índice de absorção de água	[ % ]	12,39

(fonte: elaborada pelo autor)

### 3.1.3 Fator de resistência à difusão de vapor

O fator de resistência à difusão de vapor e a permeabilidade ao vapor das argamassas e do bloco cerâmico foram ensaiados conforme descrito no subitem 2.1.3, e os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Permeabilidade ao vapor para diferentes argamassas e bloco cerâmico utilizados neste trabalho (ASTM E96 / E96M, 2016).

CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR						
Norma	Ensaio	Unidade	Bloco cerâmico	Arg. Conv.	Arg. Ind.	Arg. Est.
ASTM E96	Permeabilidade ao vapor ( $\pi$ )	[kg/m.s.Pa]	6,11E-12	1,28E-11	1,76E-11	1,34E-11
ASTM E96	Fator de resistência à difusão ( $\mu$ )	[ - ]	32,40	15,58	11,26	14,80

(fonte: elaborada pelo autor)

Para analisar a influência da variável tipo de argamassa no parâmetro fator de resistência ao vapor, foi feita uma análise ANOVA e comparação de múltiplos de médias. Com um índice de confiança de 95%, pode-se afirmar que o tipo de argamassa influencia no fator de resistência ao vapor, para os materiais ensaiados. Além disso, a argamassa convencional e estabilizada se mostraram estatisticamente iguais para o fator de resistência ao vapor.

Tabela 8 – Análise estatística do ensaio de permeabilidade ao vapor para as argamassas analisadas.

Fonte	SQ	GDL	MQ	Teste F	Ftab	Valor-p	Significativo
Entre Grupos	42,43	2,00	21,21				
Dentre Grupos	10,69	9,00	1,19	17,86	4,2565	0,00074	Sim
Total	53,12	11,00					

(fonte: elaborada pelo autor)

### 3.1.4 Isotermas de adsorção e dessorção

Os resultados dos ensaios das isotermas de adsorção e dessorção foram descritos no item 2.1.4 deste trabalho e estão apresentados na Tabela 9 e na Figura 8, em quilograma de água por metro cúbico de argamassa.

Tabela 9 – Isotermas de absorção e dessorção das argamassas (ASTM C1498, 2004).

a) Isoterma de adsorção; b) Isoterma de dessorção.

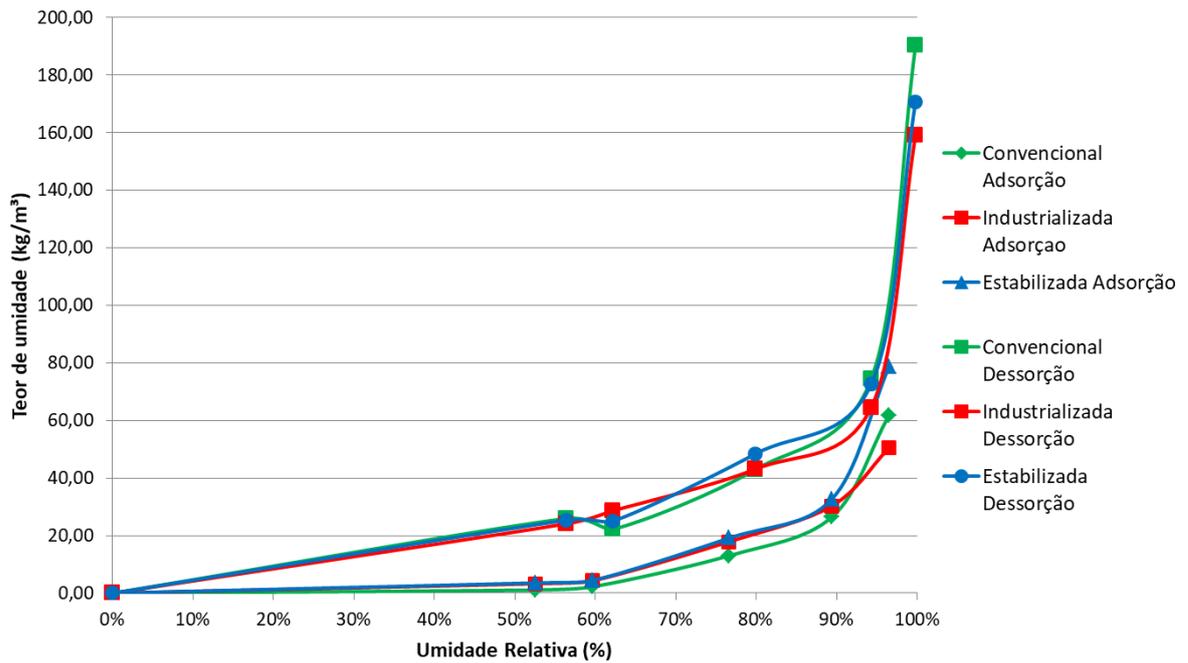
Umidade relativa	Teor de umidade [kg/m <sup>3</sup> ]			Umidade relativa	Teor de umidade [kg/m <sup>3</sup> ]		
	Convencional	Industrializada	Estabilizada		Convencional	Industrializada	Estabilizada
0,0%	0,00	0,00	0,00	0,0%	0,00	0,00	0,00
52,5%	1,10	3,29	3,56	56,4%	25,93	24,11	25,37
59,6%	2,21	4,29	4,38	62,2%	22,19	28,62	25,03
76,6%	13,01	17,86	19,12	79,9%	42,97	43,11	48,39
89,4%	26,44	30,31	32,68	94,3%	74,41	64,58	72,64
96,5%	61,81	50,41	78,58	99,8%	190,21	159,04	170,71

a)

b)

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 8 – Isotermas de absorção e dessorção das argamassas (ASTM C1498, 2004).



(fonte: elaborada pelo autor)

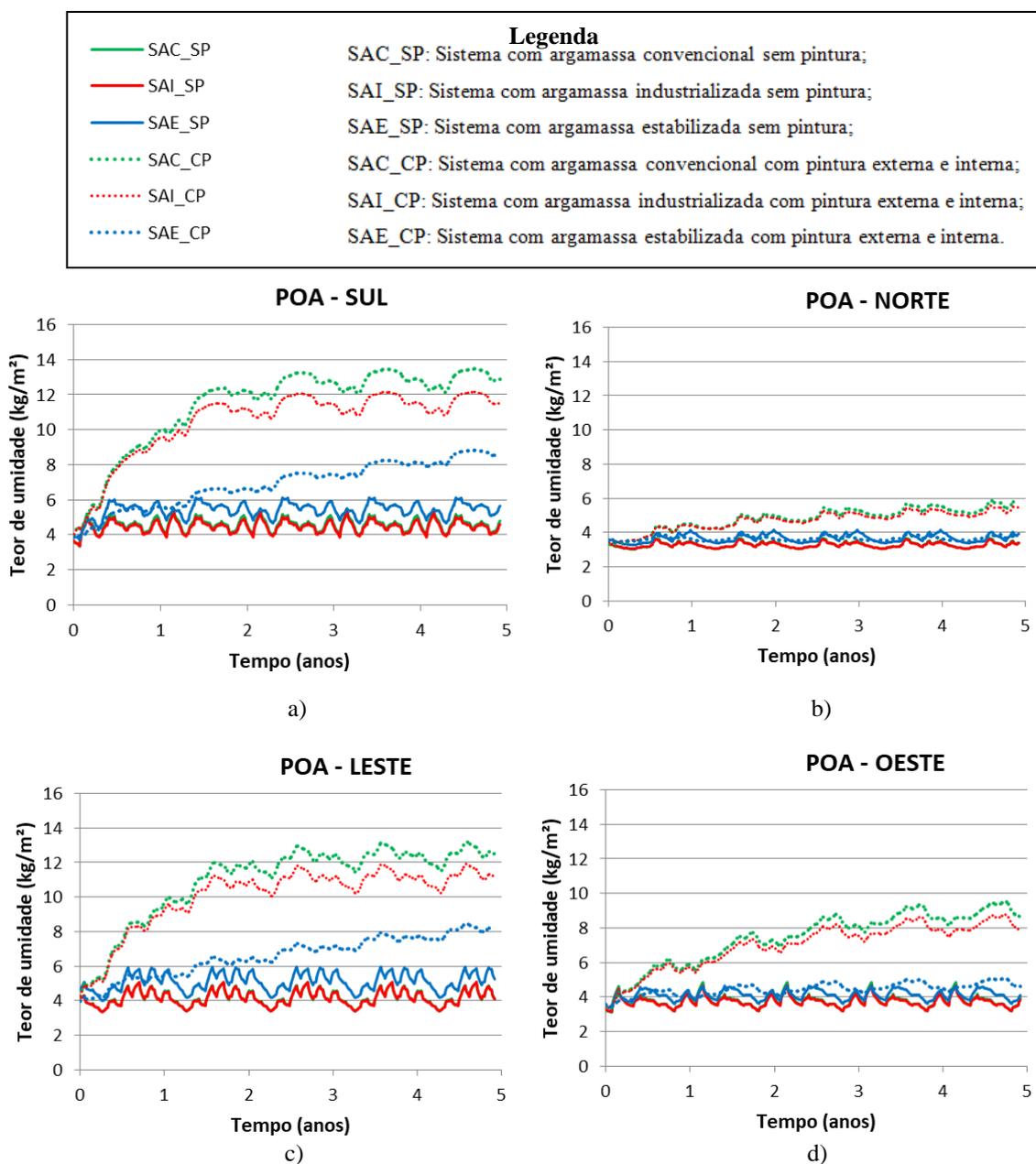
### 3.2 Resultados da simulação computacional

#### 3.2.1 Teor de umidade

Os gráficos de teor de umidade foram divididos por orientação solar, cada um com seis sistemas representados, formados pelas três argamassas e os dois tipos de acabamento superficial, e estão representados na Figura 9.

Figura 9 – Gráficos do teor de umidade por área de parede ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ).

- a) Resultados para a orientação Sul; b) Resultados para a orientação Norte; c) Resultados para a orientação Leste; d) Resultados para a orientação Oeste.



(fonte: elaborada pelo autor)

Pode-se observar que a orientação Sul apresentou os teores de umidade mais elevados (Figura 9a), enquanto a orientação Norte teve os menores teores (Figura 9b), já que são as orientações com extremos de radiação incidente e chuva (Figura 6). Interessante também observar que a fachada Oeste apresentou resultados inferiores à fachada Leste (Figuras 9c e 9d), apesar de receberem quantidades muito parecidas de chuva (Figura 6), o que demonstra que há maior evaporação na orientação Oeste em relação à Leste. Comparando as direções Sul e Leste, vê-

se que ambas atingem teores de umidade muito semelhantes, entretanto os picos dos gráficos do Leste são mais agudos que do Sul, o que indica que o teor de umidade permanece alto por mais tempo na direção Sul. Isso explica também o fato de o Índice de Desenvolvimento de Fungos ser maior para a direção Sul (Figura 11). Outra constatação possível é de que o teor de umidade se mostrou inversamente proporcional em relação à incidência total de radiação, para os parâmetros simulados.

Um fator também marcante é o teor de umidade mais elevado nos SVVE com pintura em todas as direções. Isso indica que a camada de pintura dificulta a perda de umidade para o ambiente, que geralmente se dá por evaporação. Por outro lado, os SVVE sem pintura apresentam teores de umidade muito semelhantes, independente da orientação. Considerando que as orientações diferentes recebem quantidades de chuva bem distintas (Figura 6), a constância no teor de umidade entre os gráficos indica que as argamassas sem pintura têm muito mais facilidade de perder umidade para o meio, conforme esperado.

Dentre os SVVE com pintura, o sistema com argamassa convencional apresentou sempre teor de umidade maior nas quatro orientações, porém semelhante ao desempenho do sistema com argamassa industrializada. Já o sistema com argamassa estabilizada apresentou resultados inferiores aos outros dois. Analisando os parâmetros higrotérmicos da argamassa estabilizada, o seu fator de resistência à difusão ( $\mu$ ) (Tabela 7) e a curva higroscópica (Tabela 9) são intermediários; entretanto o coeficiente de capilaridade (Tabela 5) é aproximadamente 50% menor em relação às outras duas argamassas. Dessa forma, o menor teor de umidade apresentado pelo Sistema com Argamassa Estabilizada Com Pintura deve estar relacionado ao transporte capilar reduzido.

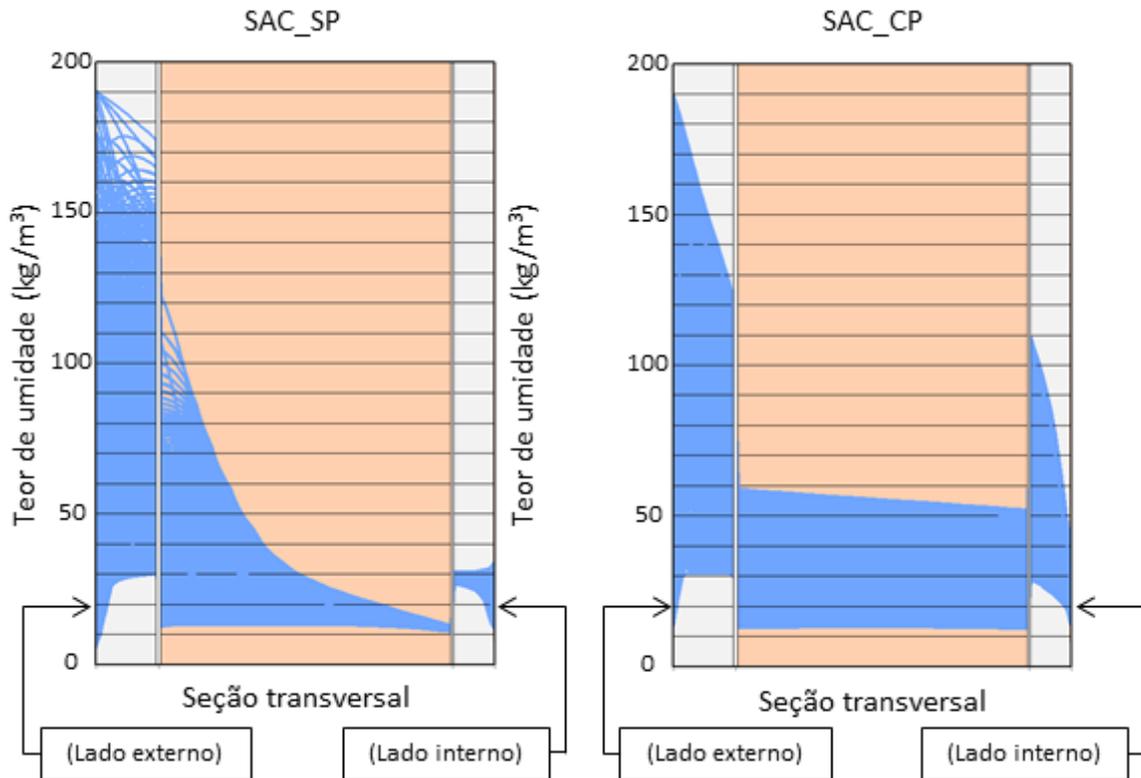
### 3.2.2 *Perfil de umidade*

A distribuição de umidade ao longo da parede também se mostrou muito distinta entre os sistemas com e sem pintura. A Figura 10 mostra o SVVE em perfil, com a face externa na esquerda e a face interna na direita, semelhante à Figura 5. A mancha em azul representa o histórico do teor de umidade ao longo da parede; durante a simulação, cada alteração do teor de umidade deixa uma “mancha” azul, indicando assim os limites da distribuição de umidade na parede.

Observa-se que os dois sistemas atingiram teor de umidade muito semelhante na face externa. Entretanto, o sistema com pintura apresentou teor de umidade mais elevado tanto no bloco quanto no revestimento interno. Isso ressalta a redução da evaporação nos sistemas com

pintura e explica o maior teor médio de umidade, mostrados na Figura 9. O mesmo padrão se repetiu para os demais sistemas simulados.

Figura 10 – Perfil de teor de umidade para Sistema com Argamassa Convencional na direção Sul, com e sem pintura.



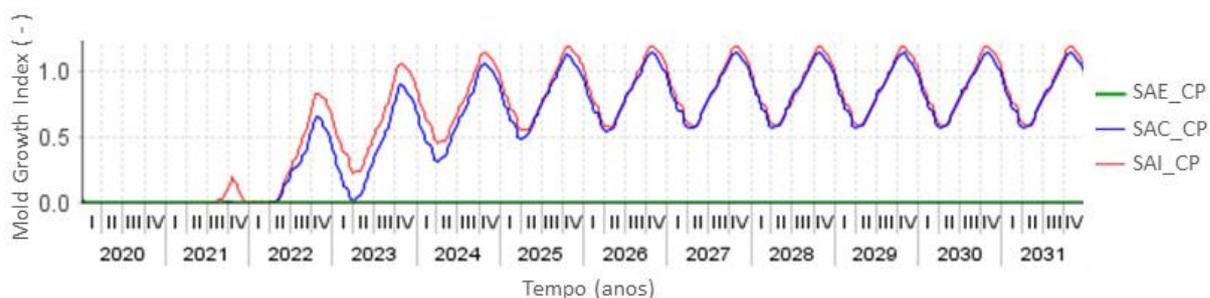
(fonte: elaborada pelo autor).

### 3.2.3 Índice de desenvolvimento de fungos

O software permite definir algumas características dos materiais, que por sua vez influenciam nos resultados. O tipo de material adotado para esta análise foi o de “pintura de parede para ambiente interno”, que classifica o material como sensível (Tabela 3).

A classificação do *plug-in* WUFI VTT® e ANSI ASHRAE 160:2009 indica que índices de desenvolvimento de fungos (*Mould Growth Index*, MGI) inferiores a 1 não são preocupantes; entre 1 e 2 indicam a possibilidade de desenvolvimento de fungos e sugerem maior investigação; acima de 2 indicam forte possibilidade de problemas relacionados a fungos.

Figura 11 – Índice de Crescimento de Fungos para os três SVVE com pintura na direção Sul.



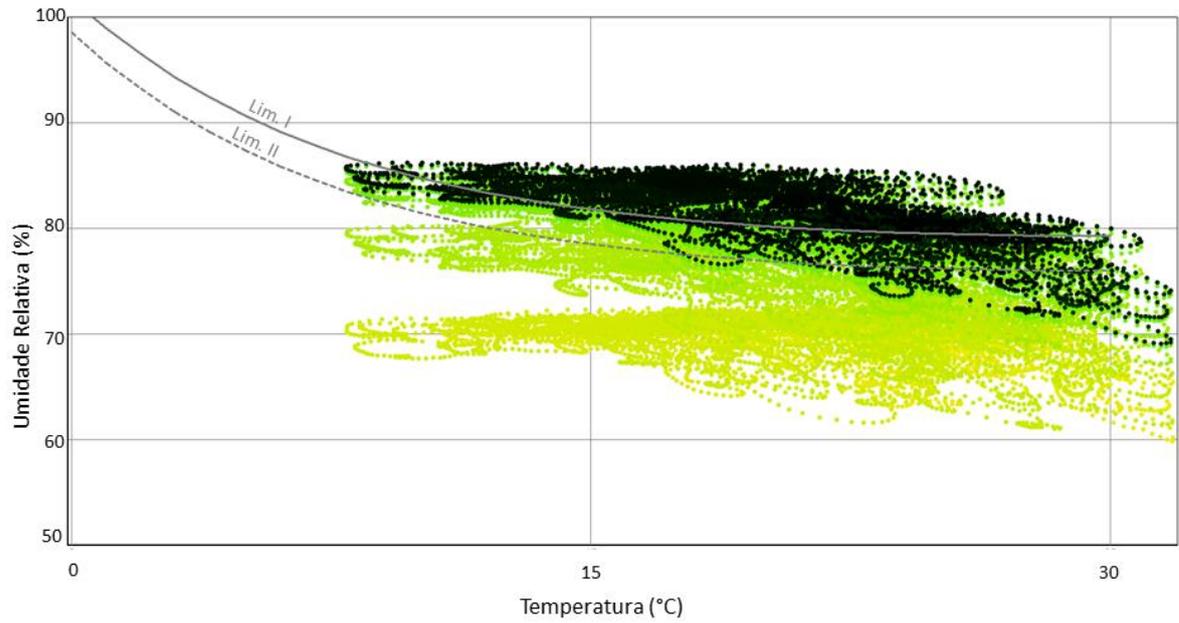
(fonte: elaborada pelo autor)

Dois resultados apresentaram MGI preocupantes. o Sistema com Argamassa Convencional com pintura e o Sistema com Argamassa Industrializada com pintura, ambos para a direção Sul. Eles apresentaram MGI com valores máximos entre 1,0 e 1,25 (Figura 11). Todos os demais sistemas e direções apresentaram MGI inferiores a 1. Percebe-se na Figura 10, que a pintura teve grande influência sobre os resultados, pois ela reduziu a capacidade de secagem das paredes, fazendo com que a umidade permanecesse por mais tempo no sistema, o que levou às condições previstas na ANSI ASHRAE 160:2009 de umidade elevada por um período de tempo longo.

Quanto ao Sistema com Argamassa Estabilizada, este apresentou baixo MGI mesmo com pintura, o que indica menor teor de umidade na superfície interna e que pode ser verificado nas Figuras 9 e 13. Dentre os parâmetros relacionados à umidade, aqueles que mais se diferenciaram nesta argamassa em relação às outras foram o coeficiente de capilaridade e a porosidade, mais baixo na argamassa estabilizada. Considerando que a permeabilidade ao vapor e a curva higroscópica desta argamassa eram intermediários em relação às outras duas argamassas, pode-se perceber que a redução do transporte capilar neste caso teve efeito positivo sobre o índice de desenvolvimento de fungos.

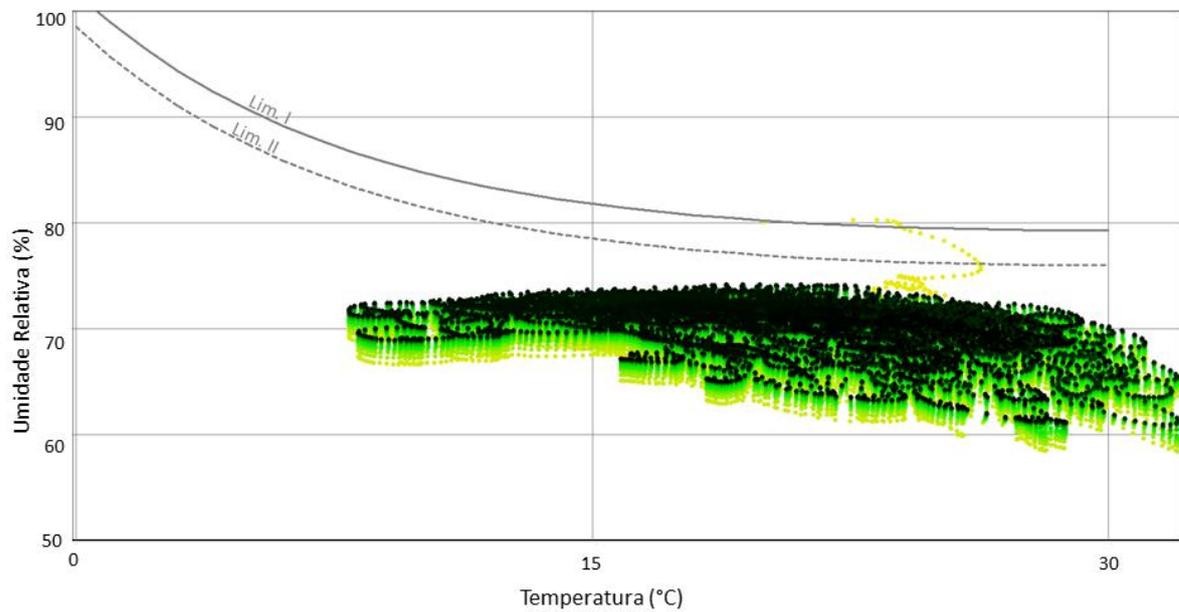
Uma análise das isopletras permite observar a umidade relativa mais elevada no Sistema com Argamassa Convencional Com Pintura (Figura 12) em relação ao Sistema com Argamassa Estabilizada Com Pintura (Figura 13), ambos na direção Sul. Observa-se que os pontos escuros no SAC\_CP ultrapassam os limites I e II atingindo cerca de 85 % de umidade relativa (Figura 12), enquanto que no SAE\_CP, praticamente todos os pontos estão abaixo dos limites I e II, atingindo no máximo 75% de umidade relativa (Figura 13). A isopletra do SAI\_CP na direção Sul é muito semelhante à isopletra da Figura 12, portanto foi omitida.

Figura 12 – Isopleta da superfície interna do Sistema com Argamassa Convencional Com Pintura (SAC\_CP) na direção Sul.



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 13 – Isopleta da superfície interna do Sistema com Argamassa Estabilizada Com Pintura (SAE\_CP) na direção Sul.



(fonte: elaborada pelo autor)

#### 4 CONCLUSÃO

A utilização do software WUFI® Pro 6.2 para análise dos SVVE para as condições climáticas de Porto Alegre se mostrou exitosa no âmbito da avaliação e conhecimento do desempenho higrotérmico dos sistemas.

Dentre os SVVE com pintura, o sistema com argamassa estabilizada apresentou o menor teor de umidade em todas as orientações. Já nos sistemas sem pintura, os resultados se mostraram semelhantes tanto entre sistemas com diferentes argamassas, quanto entre orientações; isso indica que a evaporação da umidade foi alta nos sistemas sem pintura, mesmo nas orientações com menos radiação incidente.

A orientação Sul foi a que apresentou maiores teores de umidade e maior propensão ao desenvolvimento de fungos. Este resultado se justifica pela menor incidência de radiação ao longo do ano na orientação Sul, além de esta ter a maior incidência de chuva, para as condições de Porto Alegre.

Quanto ao acabamento superficial, pôde-se perceber que ele tem grande influência na capacidade de secagem da parede. Os sistemas com pintura apresentaram teores de umidade mais elevados para todas as argamassas analisadas e todas as orientações. Dessa forma, a correta caracterização dos materiais utilizados para pintura e modelagem desta camada se mostram essenciais para a validação dos resultados, já que existem inúmeras opções de tintas, texturas e *primers* disponíveis atualmente, cada um com características próprias de permeabilidade, capilaridade, absorvência, etc.

Dentre os objetivos desta pesquisa, estava a obtenção de parâmetros higrotérmicos para os materiais locais, que foi alcançado dentro das limitações deste trabalho. Além disso, também houve ganho no sentido da equipe envolvida adquirir experiência nos ensaios e desenvolver sensibilidade quanto às possibilidades e necessidades de melhoria das técnicas utilizadas.

Por fim, entende-se que é importante o estabelecimento de normas nacionais que tratem de limites de teor de umidade, de absorção de água, de permeabilidade e de capilaridade dos materiais, adaptados à realidade das edificações locais. Um passo importante já foi dado com a norma de desempenho em 2013, e se observa que muitos projetistas e fabricantes têm se adaptado aos novos requisitos. Certamente a consolidação de parâmetros higrotérmicos dos materiais e sistemas locais traria uma elevação no desempenho dos SVVE projetados, que por sua vez iria beneficiar o usuário e elevar a qualidade das edificações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E96 / E96M**. Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. ASTM International, West Conshohocken, 2010.

\_\_\_\_. **C1498**: Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials. ASTM Internacional, West Conshohocken, 2010.

ANTUNES, G. R. **Contribuição para avaliação de desempenho de revestimentos de argamassa reforçados com telas metálicas**. Porto Alegre, 2016. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANSI/ASHRAE - American National Standards Institute & American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers. **ANSI/ASHRAE 160 - Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings**. Atlanta, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749**. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013

\_\_\_\_. **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. ABNT, 2005.

\_\_\_\_. **NBR 15220-3**. Desempenho Térmico de Edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. ABNT, 2005.

\_\_\_\_. **NBR 15575-1**. Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. ABNT, 2013.

\_\_\_\_. **NBR 15575-4**: Edificações Habitacionais – Desempenho. Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_. **NBR 16541**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Forças devidas ao vento em edificações. ABNT, 2016.

BORNEHAG, C-G.; BLOMQUIST, G.; GYNTELBERG, F.; JÄRVHOLM, B.; MALMBERG, P., NORDWALL, L.; NIELSEN, A.; PERSHAGEN, G.; SUNDELL, J. **Dampness in buildings and health. Nordic interdisciplinary review of the scientific evidence on associations between exposure to “Dampness” in buildings and health effects**. Indorr Air, p. 11-86, 2001.

COSTA, F. N. **Processo de produção de revestimento de fachada de argamassa: problemas e oportunidades de melhoria**. Porto Alegre, 2005. 180 p. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DAL MOLIN, D. C. C. **Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 1988. 215p. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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.

\_\_\_\_\_. **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.

EUROPEAN UNION. **Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council.** Official Journal of the European Union L 153, 2010. p.124-146.

GLASS, S. V.; TENWOLDE, A.; ZELINKA, S. L. **Hygrothermal Simulation: A Tool for Building Envelope Design Analysis.** Wood Design Focus, vol. 23, n. 3, 2013.

HUKKA, A.; VIITANEN, H. A. A mathematical model of mould growth on wooden material. **Wood Science and Technology.** 33.6, 1999.

KÜNZEL, H. M.; KÜNZEL, H.; HOLM, A. **Rain Protection of Stucco Facades.** Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings IX – International Conference, Florida, USA. 2004.

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.

POYASTRO, P. C. **Comparação entre blocos cerâmicos e em concreto, quanto a custo e produtividade, quando utilizados em alvenaria estrutural.** Porto Alegre, 2008. 95p. Trabalho de diplomação – Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros.** ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos, SP. 2012. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivosclimaticos/formato-epw>>. Acesso em: agosto de 2018.

ŠADAUSKIENE, J.; STANKEVICIUS, E. M. V. **The impact of exterior finish vapour resistance on the moisture state of building walls.** Technological and Economic Development of Economy, 13:1, p. 72-82, 2007.

SALOMÃO, M. C. F. **Estudo da estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água.** Brasília, 2016. Tese de doutorado – Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Brasília.

VIITANEN, A.; HANHIJÄRVI, A.; HUKKA, A.; KOSKELA, K. Modeling mould growth and decay damages. **Proceedings of Healthy Buildings**, v. 3, p. 341-346, 2000.

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

**WUFI® Pro 6.2 – Manual do software.** IBP – Fraunhofer Institute for Building Physics. Holzkirchen, Germany, 2018.

YOSHIDA, A. T.; BARROS, M. M. S. BOTTURA de. Caracterização de argamassas no estado fresco – Peculiaridades da análise de argamassas industrializadas. I Simpósio brasileiro de tecnologia das argamassas. **Anais.....**, 1995.

ZUCCHETTI, L.; POYASTRO, P.; DAPPER, S. T. H.; MASUERO, A. B.; LOREDO-SOUZA, A. M. **The wind-drive rain and the buildings: directional driving rain, experimental simulation and qualification of wetness areas.** Recent Developments in Building Diagnosis Techniques, p. 91-103. Springer, Singapore, 2016.