

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

**JENNIFER DE OLIVEIRA LEMOS**

**ANÁLISE HIGROTÉRMICA DO DESEMPENHO DE  
VEDAÇÃO VERTICAL EXTERNA EM ARGAMASSA E  
BLOCO DE CONCRETO PARA EDIFÍCIOS NA CIDADE DE  
PORTO ALEGRE**

Porto Alegre  
Janeiro 2020

**JENNIFER DE OLIVEIRA LEMOS**

**ANÁLISE HIGROTÉRMICA DO DESEMPENHO DE  
VEDAÇÃO VERTICAL EXTERNA EM ARGAMASSA E  
BLOCO DE CONCRETO PARA EDIFÍCIOS NA CIDADE DE  
PORTO ALEGRE**

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 Engenheira Civil

**Orientadora: Angela Borges Masuero**  
**Coorientadora: Rafaela Falcão Socoloski**

Porto Alegre

Janeiro 2020

**JENNIFER DE OLIVEIRA LEMOS**

**ANÁLISE HIGROTÉRMICA DO DESEMPENHO DE  
VEDAÇÃO VERTICAL EXTERNA EM ARGAMASSA E  
BLOCO DE CONCRETO PARA EDIFÍCIOS NA CIDADE DE  
PORTO ALEGRE**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRA CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, janeiro de 2020.

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof.<sup>a</sup> Angela Borges Masuero (UFRGS)**

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientadora

**Prof.<sup>a</sup> Rafaela Falcão Socoloski (UFRGS)**

Msc. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Co-orientadora

**Davi Henrique Kleber (UFRGS)**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Prof.<sup>a</sup> Laís Zucchetti (UFRGS)**

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelos anos de ensino de qualidade, formando excelentes profissionais.

Agradeço a minha orientadora Angela Borges Masuero pela oportunidade de realizar essa pesquisa, por todo o conhecimento passado, apoio e dedicação.

Agradeço a minha coorientadora Rafaela Falcão Socoloski por dedicar grande parte do seu tempo, sempre com muita paciência em me ensinar e corrigir, para alcançarmos o nosso objetivo,

Agradeço ao LAMTAC/NORIE por disponibilizar as suas dependências e equipamentos para a realização dos ensaios.

Agradeço ao Airton, Ari e Adalberto pela disponibilidade e sempre boa vontade em me ajudarem com os ensaios de laboratório.

Agradeço ao professor João Ricardo Masuero pelo incentivo e credibilidade incansáveis, por toda a orientação de vida, tendo grande participação na minha formação.

Agradeço ao Davi Kleber, por me passar todo o conhecimento dele, tornando possível a realização desse trabalho.

Agradeço a Milena Guerra, sempre disposta a me ajudar no que eu precisasse.

Agradeço aos meus amigos, Edmilson, Kethelin, Graciela, Uildervam e Leonardo, por todo o apoio e carinho.

Agradeço aos meus pais e a minha irmã, sem eles, nada disso seria possível.

## RESUMO

O tempo meteorológico é um fenômeno que influencia a vida da população ao produzir sensações térmicas como frio e calor. Ele é caracterizado pela temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade do vento. A umidade, especificamente, está ligada a inúmeras aparições de anomalias nas construções. A cidade de Porto Alegre é conhecida pelo seu clima subtropical úmido, e possui uma oscilação dos elementos climáticos em seu histórico. Por fazer fronteira com o lago Guaíba, o teor de umidade do ar na região aumenta consideravelmente, assim como sua amplitude térmica. A degradação dos materiais de construção está relacionada à sua própria porosidade, já que funcionam como um meio que pode permitir a passagem de partículas gasosas ou líquida presentes no meio ambiente, possibilitando uma deterioração tanto externa como interna da edificação. Essa conjuntura demanda soluções específicas dos projetos de edificações de Porto Alegre, e a simulação computacional, que constitui um dos métodos de análise do desempenho higrotérmico das construções pode auxiliar nisso. Dessa forma, o presente trabalho procura examinar a influência de diferentes tipos de argamassa e de blocos de concreto no comportamento higrotérmico de Sistemas de Vedação Vertical Externa (SVVE) para a realidade da cidade de Porto Alegre, mediante simulação higrotérmica computacional unidimensional no software WUFI® Pro 6.4. Para este estudo, foram avaliadas seis SVVEs, sem acabamento superficial, compostos por blocos de concreto para vedação de dois fabricantes distintos, ambos com dimensões de fábrica de 14x19x39x3 cm (largura, altura, comprimento e espessura) e resistência característica à compressão de 4MP, para função estrutural, além de três tipos de argamassa: a convencional, a estabilizada e a industrializada ensacada, na proporção 1:1:6 (em volume de materiais seco). Cada um dos seis experimentos foi simulado em Norte, Sul, Leste e Oeste. Segundo os resultados obtidos, o bloco de concreto influenciou na taxa de umidade presente na parede, diminuindo-a, conseqüentemente acarretando no não desenvolvimento de fungos nos seis sistemas testados. Também foi possível observar que o teor de umidade é influenciado em parte pela orientação solar, uma vez que em ordem decrescente de teor de umidade foram Sul, Leste, Oeste e Norte, fenômeno que pode ser explicado pelas divergências na incidência de precipitação e da radiação.

**Palavras-chaves:** Sistema de Vedação Externa; Desempenho Higrotérmico; Potencial de Desenvolvimento de Fungos; Simulação Higrotérmica.

## 1 INTRODUÇÃO

O tempo meteorológico, fenômeno que atua sobre a população de uma cidade e produz sensações térmicas como frio e calor, é definido pelas ocorrências dos fenômenos climáticos como temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade do vento. Porto Alegre, localizada na latitude de 30° Sul e a 100 km do Oceano Atlântico, é conhecida pelo seu clima subtropical úmido, e tem uma grande oscilação dos elementos climáticos ao longo do seu histórico (KOPPEN, 1936 apud LIVI, 2018)<sup>1</sup>. Por fazer fronteira com o lago Guaíba, o teor de umidade do ar na região aumenta consideravelmente, assim como a amplitude térmica (DA COSTA SILVA e KINSEL, 2006).

A degradação dos materiais de construção está relacionada com a porosidade dos mesmos, pois funcionam como um meio que pode permitir a passagem de partículas gasosas ou líquidas presentes no meio ambiente, podendo gerar uma deterioração tanto externa como interna da edificação (BERTOLINI, 2006). Os fungos filamentosos são microrganismos que influenciam negativamente nas construções, estão relacionados à degradações físicas e alterações na aparência que podem comprometer a estética, tanto no ambiente externo como interno, provocando também problemas de saúde aos seus usuários, como alergia, tosse, infecções respiratórias, entre outros, diminuindo a qualidade de vida. O calor e a umidade transferidos por meio da superfície da construção são agentes importantes que induzem o crescimento dos fungos no ambiente interno (HE, LUO, GE, CHEN e WANG, 2018).

No interior do elemento construtivo, a umidade pode existir em seus três diferentes estados: gasoso, líquido e sólido. Quando a umidade está em fase líquida, seu transporte ocorre através da difusão de superfície e da condução capilar. Quando ela se encontra em fase gasosa, seu transporte ocorre através da difusão de vapor de água. As trocas de umidade que ocorrem nas superfícies dos materiais são regidas pelas condições dos climas de fronteira (COELHO, 2016). Segundo Coelho (2016), a chuva por si só é caracterizada como um componente vertical, sendo assim, não influencia significativamente o comportamento higrotérmico de um elemento construtivo vertical. Todavia, quando sujeita a ação do vento, a chuva adquire também um componente horizontal. Logo, a então denominada chuva incidente, choca-se mais facilmente contra as superfícies verticais. A chuva incidente é a principal fonte de umidade no interior dos elementos construtivos verticais, o que, por conseguinte, pode gerar inúmeros problemas e

---

<sup>1</sup> KOPPEN, Wladimir. **Das geographische System der Klimate**, in: Handbuch - der Klimatologie. Gebr, Borntraeger, 1936

também pode ser responsável pela redução do período de vida útil destes elementos.

O tanto de chuva incidente que se choca contra um superfície vertical depende dos seguintes fatores: geometria do edifício; características climáticas; orientação do elemento construtivo vertical; velocidade e direção do vento; turbulência da intensidade; intensidade da chuva normal; distribuição do tamanho das gotas de água da chuva; e a duração da precipitação (COELHO, 2016).

A análise da degradação dos materiais de edificações causada por microrganismos tem despertado interesse científico principalmente desde os anos 1980. Na área da construção, danos físicos e estéticos nas edificações e até mesmo questões de saúde das pessoas são consequência da presença de fungos filamentosos (STEFANOWSKI, CURLING e ORMONDROYD, 2017). O clima subtropical úmido de Porto Alegre exige dos projetos de edificações soluções específicas para seu clima para o controle das manifestações patológicas que as intempéries podem causar nos edifícios, destacando o Sistema de Vedação Vertical Externo (SVVE) que é exposto aos agentes agressivos climáticos. Assim, de acordo com as exigências da ABNT NBR 15575:2013, que trata sobre o desempenho de edificações habitacionais, se tem por objetivo a melhor qualidade de vida dos moradores, a diminuição da degradação e o aumento da vida útil da edificação, do desempenho e da durabilidade dos componentes construtivos.

Contudo, no Brasil, existem poucos estudos que auxiliem na análise do desempenho higrotérmico dos materiais e sistemas de vedação vertical externo, são exemplos: o trabalho de Silva (2014), que faz uma avaliação quantitativa da degradação e vida útil de revestimentos de fachada de edifício com revestimento cerâmico para o caso de Brasília/DF; o estudo de Coelho (2015), que analisa o comportamento higrotérmico em regime variável e paredes sujeitas à ação da chuva incidente; a pesquisa de Nascimento (2016), que aplica a simulação higrotérmica na investigação da degradação de fachadas de edifícios; o trabalho de Salomão (2016), que estuda a estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água; e o estudo Kleber (2018), que analisa o desempenho de sistemas de vedação vertical externo com diferentes tipos de argamassa, através de simulação higrotérmica para a cidade de Porto Alegre. O presente estudo pretende acrescentar aos demais, utilizando-se da análise higrotérmica para a cidade de Porto Alegre com os diferentes materiais que serão pesquisados para o substrato.

A simulação higrotérmica por meio do software WUFI® Pro 6.4 (Warme Und Feuchte Instationar) elaborado pelo Fraunhofer Institute for Building Physics, permite simular o

transporte de calor e umidade em uma única direção, simultaneamente, em sistemas de vedação com várias camadas. Desta forma, este trabalho busca analisar o desempenho higrotérmico de SVVE tradicional na região de Porto Alegre, composto por argamassa e bloco de concreto, através da simulação higrotérmica utilizando o software WUFI® Pro. Dos materiais utilizados nas simulações, as argamassas são de 3 tipos, a convencional, a estabilizada e a industrializada, estas já foram caracterizadas anteriormente por Kleber (2018). Os blocos de concreto são de duas marcas distintas, caracterizados neste trabalho, gerando 6 diferentes SVVE. Com o auxílio do Software WUFI® Pro, serão simulados os transportes de calor e umidades, para cada SVVE, analisando também o potencial desenvolvimento de fungos na superfície interna dos sistemas, de acordo com os elementos climáticos e as orientações solares (norte, sul, leste e oeste). Desta forma, o objetivo deste trabalho é buscar entender o como acontece o transporte de umidade e calor nos SVVEs estudados e suas possíveis consequências, buscando as alternativas de melhor desempenho higrotérmico para edificações a fim de minimizar futuras degradações relacionadas a estes fenômenos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo, foram avaliadas seis SVVEs sem acabamento superficial. Todos utilizando blocos de concreto para vedação de dois fabricantes distintos, ambos com medidas 14x19x39 cm (largura x altura x comprimento). Também foram utilizados três tipos de argamassa, caracterizadas anteriormente por Kleber (2018): a convencional com traço de 1:1:6 (AC), a estabilizada (AE) e a industrializada ensacada (AI)

SAC-B1: Sistema com argamassa convencional e bloco 1;

SAE-B1: Sistema com argamassa estabilizada e bloco 1;

SAI-B1: Sistema com argamassa industrializada e bloco 1;

SAC-B2: Sistema com argamassa convencional e bloco 2;

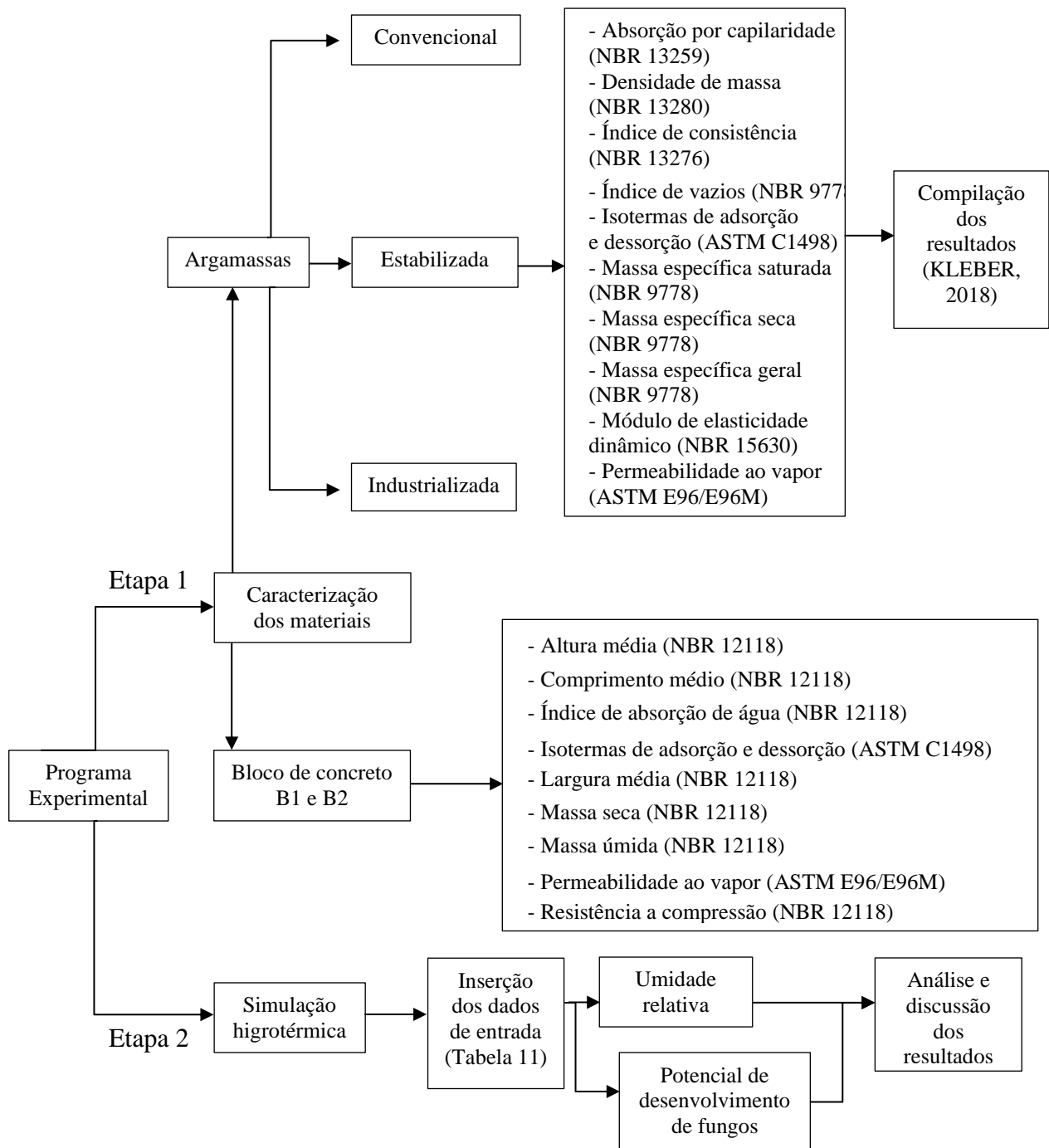
SAE-B2: Sistema com argamassa estabilizada e bloco 2;

SAI-B2: Sistema com argamassa industrializada e bloco 2.

A Figura 1 ilustra o fluxograma da sequência de desenvolvimento do trabalho, iniciando com a caracterização dos materiais e finalizando com a análise de resultados do Software WUFI® Pro 6.4.



Figura 1 – Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.



(fonte: elaborada pelo autor)

## 2.1 Definição e caracterização dos materiais

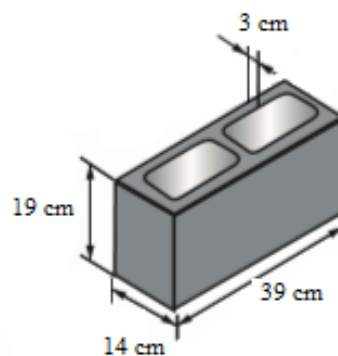
Conforme descrito no item 2, os materiais escolhidos para contemplar os diferentes SVVEs desse estudo foram os 3 diferentes tipos de argamassa caracterizadas anteriormente por Kleber

(2018) e 2 blocos de concreto de fabricantes distintos caracterizados pela autora desse trabalho. Para a caracterização geral dos blocos de concreto utilizou-se a ABNT NBR 12118:2013 e para as caracterizações específicas para a simulação higrotérmica, ensaios de permeabilidade ao vapor e isothermas de adsorção e dessorção, aplicou-se as recomendações das normas ASTM E96/E96M:2016 e ASTM C1498:2004.

### 2.1.1 Blocos de Concreto

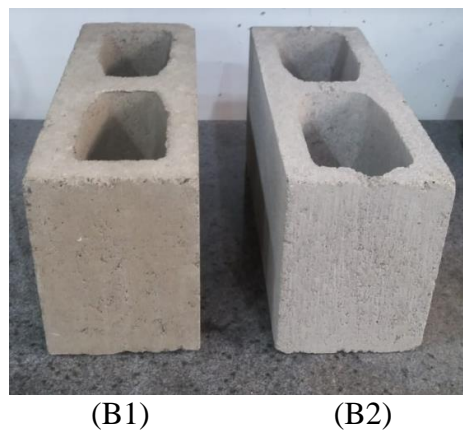
As alvenarias em bloco de concreto podem ter função estrutural ou de vedação, porém em ambos os casos devem atender aos critérios estabelecidos pela ABNT NBR 15575-4:2013, proporcionando estanqueidade à água, isolamento térmico e acústico, capacidade de fixação de peças suspensas, capacidade de suporte a esforços de uso, em casos de incêndio dificultar a propagação, desempenho lumínico, durabilidade e manutenibilidade (ALVENARIA..., 2014). A utilização do bloco de concreto, está entre os sistemas construtivos mais empregados na cidade de Porto Alegre juntamente com as construções em bloco cerâmico e parede de concreto (KLEBER, 2018). Com o intuito de atender à norma de desempenho os blocos de concreto devem cumprir com os requisitos da ABNT NBR 6136:2016 e aos métodos de ensaio da ABNT NBR 12118:2013. Para esse estudo foram utilizados como referência blocos de concreto de dois diferentes fabricantes, ambos com dimensões de fábrica 14x19x39x3 cm (largura, altura, comprimento e espessura), conforme Figuras 2 e 3, e resistência característica à compressão de 4MP, para função estrutural. Os procedimentos de ensaio seguiram as recomendações da ABNT NBR 12118:2013. Os lotes permaneceram armazenados em lugar fechado, sem a incidência de chuva e sol, durante todo o período de ensaio.

Figura 2 – Dimensões do bloco de concreto.



(fonte: adaptado da NBR 12118)

Figura 3 - blocos de concreto utilizado nos ensaios de caracterização física e mecânica; da esquerda para a direita, bloco 1 (B1) e bloco 2 (B2).



(fonte: elaborada pelo autor)

Os blocos de concreto foram caracterizados segundo as recomendações da ABNT NBR 12118:2013. Resultados seguem na Tabelas 1

Tabela 1 – caracterização física e mecânica do bloco de concreto tipo 1 (B1) e tipo 2 (B2).

BLOCO DE CONCRETO				
Norma	Ensaio	Unidade	B1	B2
NBR 12118	Resistência a compressão	[MPa]	8,79	11,36
NBR 12118	Largura média	[mm]	140,46	143,21
NBR 12118	Altura média	[mm]	188,79	191,85
NBR 12118	Comprimento médio	[mm]	390,95	389,55
NBR 12118	Massa seca	[g]	13680	12926,67
NBR 12118	Massa úmida	[g]	14420	13960
NBR 12118	Índice de absorção de água	[%]	5,41%	7,99%

(fonte: elaborada pelo autor)

### 2.1.2 Argamassa

Na cidade de Porto Alegre atualmente usam-se 3 tipos de argamassa: convencional, industrializada ensacada e estabilizada. A argamassa convencional está definida na ABNT NBR 13529:2013 como sendo aquela cujos materiais constituintes são medidos em volume ou massa e misturados na própria obra. Dentre as demais, é o modelo mais antigo aplicado na construção civil, utilizada em construções mais simples. A argamassa industrializada é o produto proveniente de processo controlado e dosagem precisa, em instalações industriais, fornecida embalada ou a granel, segundo a ABNT NBR 13529:2013. De acordo com Barbosa, Borja e Soares (2010), a principal finalidade do uso de argamassa industrializada é a produção de edificações limpas, com baixo desperdício e geração de resíduos, obtendo rapidez na execução,

melhor qualidade e economia. Estima-se uma redução de até 80% nas perdas quando comparado à argamassa produzida em obra. A ABNT NBR 13529:2013 define a argamassa estabilizada, dosada em central, como a argamassa cujos materiais constituintes são medidos e misturados em central dosadora, fornecida no estado fresco, pronta para uso. Segundo Turra (2016), visto que a argamassa estabilizada proporciona uma maior produtividade e racionalidade, já que sua trabalhabilidade pode ser controlada por até 72 horas e chega ao local de uso pronta para aplicação, seu consumo tem aumentado nos canteiros de obra.

As argamassas utilizadas para esse estudo foram as mesmas argamassas caracterizadas anteriormente por Kleber (2018), conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização das argamassas no estado fresco e endurecido (KLEBER, 2018).

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	[ - ]	0,1	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 geral	[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> .min0,5	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	0,8	1,36
NBR 13279	Resistência à compressão	[Mpa]	4,25	1,96	3,9

(fonte: Kleber, 2018)

### 2.1.3 Permeabilidade ao vapor

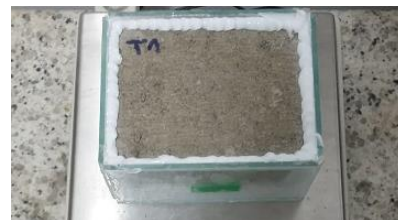
Usando como referência o método de ensaio aplicado por Kleber (2018), e a norma indicada pelo software WUFI® Pro, ASTM E96/E96M:2016, pelo método do dessecante, foram ensaiados à permeabilidade ao vapor amostras de bloco de concreto, retirados da sua seção longitudinal, com dimensões 9 x 3 x 11,5 cm (largura, altura e comprimento). As amostras foram assentadas dentro de recipientes de vidro com dessecante, cloreto de cálcio.

Considerando um espaçamento de 2 cm entre o sal e a base inferior da amostra. A vedação no perímetro da face superior da mostra, em contato com o ambiente externo, foi feita com silicone, conforme Figura 4. Contudo, no cálculo desconsiderou-se a área da amostra impermeável, devido ao silicone. Em seguida, o sistema foi direcionado para uma câmara de vidro climatizada, com temperatura ambiente e umidade relativa controlada por solução salina de cloreto de sódio. Durante a realização do ensaio a temperatura ambiente média foi de  $23,23^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  e a umidade relativa média de  $73\% \pm 1,8\%$ .

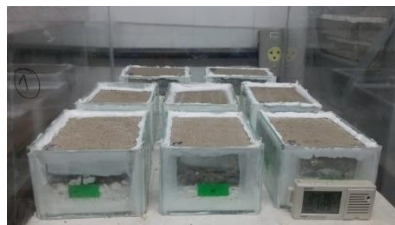
Figura 4 – Preparo das amostras de bloco de concreto para o ensaio de permeabilidade ao vapor. a) amostras do bloco de concreto b) sistema: caixa de vidro, dessecante e amostra com vedação em silicone. c) conjuntos de amostras na câmara climatizada.



a)



b)



c)

(fonte: elaborada pelo autor)

O fator de resistência a difusão de vapor e a permeabilidade ao vapor foram ensaiados para as amostras de bloco de concreto B1 e B2, conforme a norma, com resultados apresentados na Tabela 3. Para as argamassas convencional, industrializada e estabilizada, utilizou-se os resultados obtidos por Kleber (2018), conforme Tabela 4. Ressaltando que, quanto maior a permeabilidade ao vapor e menor o fator de resistência à difusão de vapor, maior o transporte de vapor pelos poros da parede, podendo evitar que a mesma fique vulnerável aos possíveis danos causados pela umidade e por microrganismos.

Tabela 3 – Permeabilidade ao vapor para os blocos de concreto.

CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR				
Norma	Ensaio	Unidade	B1	B2
ASTM E96 Desiccant Method	Permeabilidade ao vapor ( $\pi$ )	[kg/m.s.Pa]	3,01E-17	1,80E-14
ASTM E96 Desiccant Method	Fator de resistência à difusão ( $\mu$ )	[ - ]	27,14	19,62

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 4 – Permeabilidade ao vapor para as argamassas.

CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À DIFUSÃO DE VAPOR					
Norma	Ensaio	Unidade	Arg. Conv.	Arg. Ind.	Arg. Est.
ASTM E96 Desiccant Method	Permeabilidade ao vapor ( $\pi$ )	[kg/m.s.Pa]	1,28E-11	1,76E-11	1,34E-11
ASTM E96 Desiccant Method	Fator de resistência à difusão ( $\mu$ )	[ - ]	15,58	11,26	14,8

(fonte: Kleber, 2018)

#### 2.1.4 Isotermas de adsorção e dessorção

O objetivo desse ensaio é verificar o teor de umidade de um material conforme a umidade relativa do ambiente para uma mesma temperatura. Para determinar as isotermas são realizados ensaios de adsorção e dessorção, sendo que o método aplicado segue as recomendações da norma ASTM C1498:2004, adotando soluções semelhantes a Salomão (2016) e Kleber (2018). Para os ensaios de adsorção e dessorção foram utilizadas amostras de bloco de concreto com massa de aproximadamente 30g cada, inseridas em ambientes com umidades relativas distintas, até o momento em que as pesagens com intervalos de 24h tenham variação menor que 0,1% durante 5 dias consecutivos. As amostras foram colocadas em recipientes de pesagem que, antes de serem retirados dos ambientes climatizados para a pesagem, eram tampados, diminuindo as trocas de umidade relativa com o ambiente externo, conforme Figura 5.

Para determinar a isoterma de adsorção, partiu-se de amostras secas em estufa, colocadas em dessecador para que entrem em equilíbrio térmico com o ambiente, pesadas e, em seguida, inseridas em ambiente com umidade relativa baixa, em torno de 30%, que ao entrar em equilíbrio, passa-se para ambiente com umidade relativa um pouco mais alta, e assim

sucessivamente até umidade próxima a 100%, com no mínimo 5 ambientes com umidade relativas diferentes e mesma temperatura. Assim, a umidade do ambiente migra para os materiais, permitindo a composição de isotermas de adsorção de água para uma temperatura constante.

Já, para a isoterma de dessorção foram utilizadas amostras saturadas, onde o efeito ocorre através da perda de umidade relativa das amostras para o ambiente com temperatura constante. Inversamente ao ensaio de adsorção, as amostras saturadas são colocadas em ambiente com umidade relativa alta, aproximadamente 98%, que ao entrar em equilíbrio, passa para outro ambiente com umidade relativa um pouco abaixo, e assim sucessivamente, em pelo menos 5 ambientes com umidades relativas distintas e mesma temperatura, até a secagem das amostras em estufa por 2 dias, que são colocadas em dessecador e pesadas após atingir a temperatura dos demais ambientes anteriores. A norma ASTM C1498:2004 não determina as soluções salinas a serem utilizadas para controlar a umidade relativa do ar, desta forma optou-se pelo uso das mesmas utilizadas por Kleber (2018): 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 ( $(NH_4)_2HPO_4$ ), com uma temperatura média durante o ensaio de  $24^\circ \pm 0,6^\circ C$ . Para a umidade de 98% não havia mistura, o sistema era constituído apenas por água. Observando que, para ambos os ensaios, as amostras tiveram variação de massa entre 0,021 e 0,094, durante os 5 dias. Os quantitativos de água e sal utilizados para cada solução estão representados na Tabela 5

Tabela 5 - Soluções salinas utilizadas nos ensaios de adsorção e dessorção.

CARACTERIZAÇÃO DA SOLUÇÃO SALINA				
Solução salina	Temperatura [ $^\circ C$ ]	%UR	Água [ml]	Sal [g]
( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ )	23,69	36,5	200	634
( $Na_2Cr_2O_7 \cdot 2H_2O$ )	24,38	57,6	200	400
( $NaCl$ )	24,34	73,5	200	200
( $(NH_4)_2HPO_4$ )	24,43	86,1	200	216

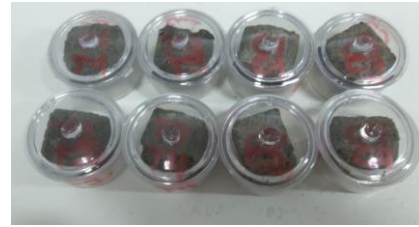
(fonte: elaborada pelo autor)

Com a finalidade de alcançar uma umidade relativa mínima próxima a 30% conforme especificado pela norma, fez-se a solução salina do cloreto de magnésio e o sistema foi armazenado dentro de uma caixa de isopor, juntamente com um pote contendo sílica gel. Desta forma atingiu-se a umidade relativa desejada para ambiente.

Figura 5 – ensaio de adsorção e dessorção para as amostras de bloco de concreto (ASTM C1989). a) Amostras de blocos de concreto usadas nos ensaios de adsorção e dessorção. b) Amostras dentro dos potes de pesagem, antes de serem alocadas no ambiente com umidade relativa controlada. c) Equipamento utilizado para fazer furos nos potes para a passagem de %UR. d) materiais utilizados para fazer furos nos potes. e) Potes vedados usados para o controle da umidade relativa de cada solução.



a)



b)



c)



d)



e)

(fonte: elaborada pelo autor)

Os resultados dos ensaios para as isotermas de adsorção e dessorção do bloco 1 (B1) e bloco 2 (B2), ensaiados conforme a norma, estão apresentados nas Tabelas 6 e 7 e Figuras 6 e 7

Tabela 6 – Isoterma de adsorção do bloco 1 (B1) e bloco 2 (B2).

ISOTERMA DE ADSORÇÃO		
Umidade relativa	Teor de umidade [kg/m <sup>3</sup> ]	
	B1	B2
0,00%	0,00	0,00
36,50%	1,10	1,04
57,60%	3,79	3,80
73,50%	4,20	4,21
86,10%	4,91	4,79
97,30%	9,10	5,07

(fonte: elaborada pelo autor)

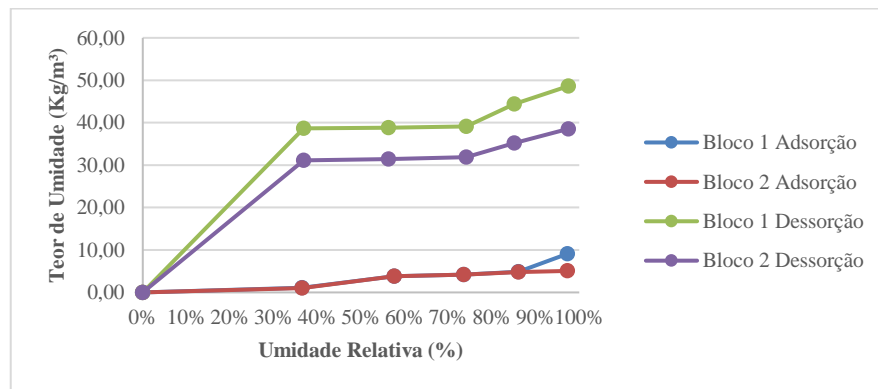


Tabela 7 – Isoterma de dessorção do bloco 1 (B1) e bloco 2 (B2).

ISOTERMA DE DESSORÇÃO		
Umidade relativa	Teor de umidade [kg/m <sup>3</sup> ]	
	B1	B2
0,00%	0,00	0,00
36,90%	38,68	31,14
56,30%	38,84	31,45
74,10%	39,11	31,92
85,10%	44,40	35,20
97,50%	48,63	38,55

(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 6 – Isoterma de adsorção e dessorção dos blocos de concreto (ASTM C1498, 2014).



(fonte: elaborada pelo autor)

As isotermas das argamassas determinadas por Kleber (2018), são conforme a Tabelas 8 e 9

Tabela 8 – Isoterma de adsorção das argamassas (KLEBER,2018).

ISOTERMA DE ADSORÇÃO			
Umidade relativa	Teor de umidade [kg/m <sup>3</sup> ]		
	Convencional	Industrializada	Estabilizada
0,00%	0,00	0,00	0,00
52,50%	1,10	3,29	3,56
59,60%	2,21	4,29	4,38
76,60%	13,01	17,86	19,12
89,40%	26,44	30,31	32,68
96,50%	61,81	50,41	78,58

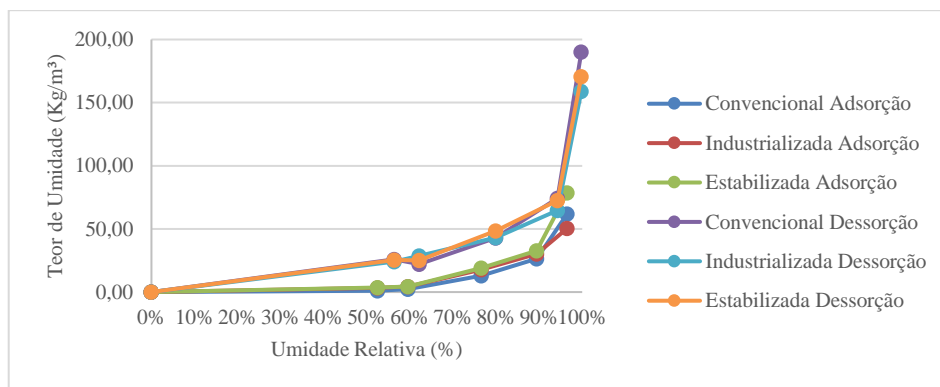
(fonte: Kleber, 2018)

Tabela 9 – Isoterma de dessorção das argamassas (KLEBER,2018).

ISOTERMA DE DESSORÇÃO			
Umidade relativa	Teor de umidade [kg/m <sup>3</sup> ]		
	Convencional	Industrializada	Estabilizada
0,00%	0,00	0,00	0,00
56,40%	25,93	24,11	25,37
62,20%	22,19	28,62	25,03
79,90%	42,97	43,11	48,39
94,30%	74,41	64,58	72,64
99,80%	190,21	159,04	170,71

(fonte: Kleber, 2018)

Figura 7 – Isoterma de adsorção e dessorção das argamassas (ASTM C1498, 2014).



(fonte: Kleber, 2018)

## 2.2 Transporte de umidade nos materiais

Observando as isotermas, nota-se que, mesmo em umidades relativas do ar inferiores a 100%, é comum as argamassas e blocos absorverem umidade. Os materiais utilizados na construção civil normalmente são higroscópicos, pois possuem capacidade de absorver água. Logo, a quantidade de água fixada por adsorção é perceptível (NASCIMENTO, 2016).

O método Glaser calcula o fluxo de calor e vapor através da parede para uma condição imutável de temperatura e umidade. Nesse método imutável de cálculo, o único fenômeno de transporte de umidade considerado é a difusão de vapor d'água (WUFI 2019).

Além disso, a simulação higrotérmica por meio do WUFI® Pro 6.4, também considera o transporte na forma líquida, as características higrotérmicas e a capilaridade dos materiais. Na maioria das vezes, é necessário um tempo maior das condições de contorno e seus valores

máximos para que a condensação seja atingida. Ainda, o crescimento do teor de umidade no material acarreta na redução da sua permeabilidade ao vapor e no aumento da condução por capilaridade (WUFI, 2019)

## 2.3 Simulação Higrotérmica

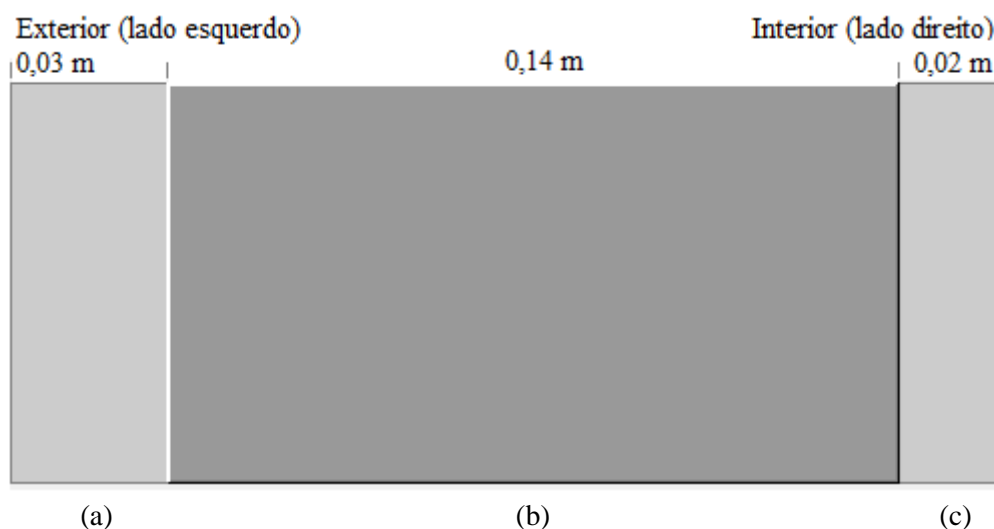
Para a simulação higrotérmica realizada no software WUFI® Pro 6.4, foram utilizados os materiais descritos anteriormente. Os dados de entrada do software, parâmetros dos materiais e parâmetros climáticos, vão ser explicados em seguida. Para compor a matriz de simulações foram utilizados seis sistemas descritos, sendo 3 tipos de argamassa e 2 blocos de concreto, ainda, cada um deles foi analisado em 4 orientações solares (Sul, Leste, Oeste e Norte). Obteve-se, dessa forma, 24 resultados.

### 2.3.1 Parâmetros de entrada dos materiais

Segundo a norma NBR 13749:2013 (ABNT, 2013), a espessura do revestimento externo executado em cama única deve ser de 2 cm a 3 cm, e revestimento interno de 0,5 a 2 cm. Para este trabalho, optou-se por utilizar a espessura máxima permitida, de acordo com a norma, para o revestimento executado em uma camada, 3 cm para a face externa e 2 cm para a face interna, conforme ilustrado na Figura 8.

Conforme a Tabela A.1 da ABNT NBR 15220-2:2005, é usado 0,04 m<sup>2</sup>K/W para a resistência térmica superficial externa e 0,13 m<sup>2</sup>K/W para resistência térmica superficial interna. De acordo com a mesma norma, para a absorvância foi adotado o valor 0,8, indicado para superfície de concreto. De acordo com Kleber (2018), a redução de chuva incidente (Fr) aponta a parcela da chuva dirigida que estará disponível para a absorção capilar pela parede, tendo em vista que parte das gotas d'água que atingem a superfície são refletidas e, sendo assim, não devem ser consideradas. Isso depende das características da superfície, contudo o valor padrão do software indicado para superfícies é 0,7, assim como a reflexividade do solo de 0,2 também é indicado como valor padrão pelo software.

Figura 8 – Perfil do Sistema de Vedação Vertical Externo simulado no WUFI® Pro 6.4. a) Revestimento externo. b) Bloco de concreto. c) Revestimento interno.



(fonte: elaborada pelo autor)

### 2.3.2 Chuva incidente

O método de cálculo utilizado para a chuva incidente foi o proposto pelo WUFI® (2019), demonstrado nas Equações 1 e 2. O coeficiente  $R_1$  tem valor nulo para superfícies verticais, quanto coeficiente  $R_2$ , esse aumenta conforme a altura do edifício. No presente trabalho foi usada uma altura intermediária, que retrata a chuva incidente entre 10 e 20 metros de altura em relação ao solo, com coeficiente  $R_2$  igual a 0,1. A quantidade de chuva que é considerada pela absorção capilar dos materiais é representada pela Equação 2. Assim como indicado pelo manual do software, a umidade inicial dos componentes do sistema foi considerada como 80%. O teor de umidade correspondente de cada material é lido pelo software na respectiva curva higroscópica.

(Equação 1)

$$I = P \times (R_1 + R_2 \times V)$$

$I$  = 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.

(Equação 2)

$$C = I \times Fr$$

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

No campo do programa de cálculo do WUFI®, é possível inserir o período de simulação ao introduzir a data de início e a data de fim do período desejado de cálculo. Automaticamente o programa produz um perfil de temperatura, umidade relativa e de teor de água para as datas que limitam o intervalo de tempo adotado. Ainda, o programa recorre a um ficheiro climático do clima adotado que não corresponde a nenhum ano específico. Isso permite que o período de cálculo compreenda qualquer dimensão adotada pelo utilizador.

Para o presente trabalho, os resultados explicitaram que, para os materiais simulados, o tempo necessário para o sistema atingir a estabilidade dinâmica foi de, em média, cinco anos. A partir desse ponto, o ciclo anual de temperatura e umidade nos componentes do sistema começa a se repetir. Logo, para o presente trabalho, adotou-se o período de simulação de cinco anos.

### 2.3.4 Clima externo

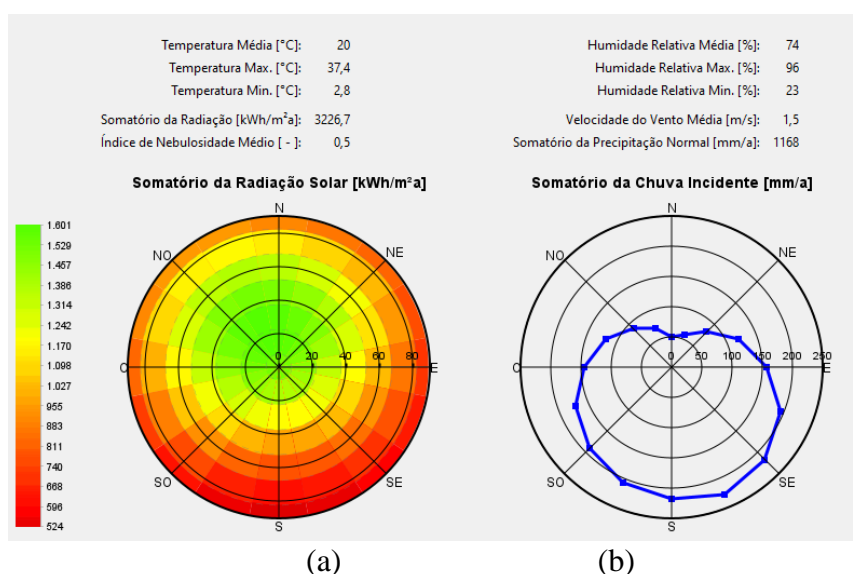
A partir de Roriz (2012) foi adquirido o arquivo climático com as informações da localidade Porto Alegre, onde há os dados de um ano típico, isto é, retirando-se os valores extremos de uma série de dados, obtém-se um ano médio. Esse resultado representa uma tendência média das varrições climáticas anuais locais, mesmo que esse ano típico possa nunca acontecer na realidade. A partir do arquivo climático, obtém-se a representação gráfica da variação da temperatura e da umidade relativa ao longo do ano de referência. Na figura 9 está representado um estudo do clima de Porto Alegre gerado no WUFI conforme o arquivo climático de Roriz (2012).

A Figura 9a mostra a radiação total incidente em cada orientação solar, em kWh/m<sup>2</sup>a. As áreas em verde explicitam maior incidência de radiação e, em seguida, as áreas em vermelho são as de menor incidência. O lado Norte tem a maior incidência de radiação enquanto que o lado Sul tem a menor. Todavia, o diagrama apresenta que no Oeste há maior incidência de radiação do que no Leste, mesmo com a radiação proveniente do sol atingindo de forma simétrica estas duas

orientações. Essa diferença pode ser elucidada pela radiação das ondas largas que é emitida pelos corpos terrestres e pela atmosfera ao serem aquecidos, que ocorre ao longo do dia, começando com os corpos frios no nascer do sol, até atingir a temperatura máxima no período da tarde, quando a incidência se dá do lado Oeste. Dessa forma, durante a tarde, o lado Oeste recebe ao mesmo tempo a radiação solar e a radiação dos corpos terrestres, e conseqüentemente apresenta uma taxa de radiação incidente mais do que a observada no lado Leste. A temperatura média anual foi de 20°C, a máxima foi de 37,4°C e a mínima foi de 2,8°C.

Na figura 9b está apresentada a chuva incidente segundo a orientação solar. A orientação que recebe a maior quantidade de chuva é a Sul-sudeste, enquanto que a menor quantidade está no lado Norte. Foram escolhidas quatro orientações a serem utilizadas nas simulações. As primeiras a serem escolhidas foram as orientações onde estão os valores extremos de radiação incidente e chuva, sendo assim, Norte e Sul. Como o software só permite uma das oito orientações indicadas na figura 9, não foi possível simular a Sul-sudeste. O Sul e Sudeste demonstraram incidência de uma chuva semelhante, portanto, optou-se por escolher Sul, que é também o ponto de mínima radiação incidente. As duas outras orientações a serem escolhidas foram Leste e Oeste, que representam pontos intermediários. Ademais, elas vão permitir observar o impacto da variação de chuva e radiação incidente nos parâmetros higrotérmicos dos SVVEs.

Figura 9 – Análise da radiação e chuva incidente realizada pelo WUFI® Pro 6.4 para a cidade de Porto Alegre. a) Somatório da radiação solar em kWh/m<sup>2</sup>a; b) Somatório da chuva incidente e mm/a.



(fonte: elaborada pelo autor)

### 2.3.5 *Clima interno*

O WUFI® Pro 6.4 apresenta três possibilidades de metodologias de cálculo que permitem caracterizar as condições do clima interno. Essas metodologias são baseadas nas seguintes normas: DIN EM 15026:2007, DIN EM ISSO 13788:2013 e ANSI ASHRAE 160:209. Contudo, nota-se que elas pertencem a uma realidade onde as edificações possuem sistema de condicionamento da temperatura interna da edificação, e algumas vezes também possuem controle de umidade. Logo, a maior parte das metodologias não permite amplitudes térmicas e de umidade das edificações que se aplique a uma realidade como a de Porto Alegre. Como apontado por Kleber (2018), aquela que permitiu maior flexibilidade foi a ANSI ASHRAE 160:2009, que foi a única onde foi possível estabelecer a temperatura que o sistema de ar condicionado deveria ligar (40°C) e a temperatura que o sistema de aquecimento ligaria (0°C), que estão fora da amplitude local, então o sistema de condicionamento da temperatura não atua. Quanto a umidade relativa do ar interno, essa só atinge o máximo de 70%, constituindo uma limitação do método. Nessa configuração também foi possível estabelecer a taxa horária de renovação do ar sugerida na ABNT NBR 15575-1:2013, que é 1,00.

Abaixo, na Tabela 10 estão listados os parâmetros de entrada utilizados neste trabalho para o WUFI®

Tabela 10 - Síntese dos parâmetros de entrada para simulação de sistema com argamassa convencional e bloco de concreto para a orientação Sul

Parâmetro de entrada	Símbolo	Valor	Unidade
Elemento Construtivo			
Argamassa - Rev. Externo	-	0,03	m
Bloco de concreto	-	0,14	m
Argamassa - Rev. Externo	-	0,02	m
Orientação, inclinação, altura e chuva dirigida			
Orientação	Sul	-	-
Inclinação	(i)	90	°
Altura	(h)	10-20	m
Chuva incidente - Método WUFI	Rwdr	-	L/m <sup>2</sup> h
Coeficiente de transferência à superfície			
Resistência superficial externa	Rse	0,04	m <sup>2</sup> K/W
Valor de Sd	Sd	-	m
Absortância	$\alpha$	0,8	-
Refletividade do solo	r	0,2	-
Fator de redução da chuva dirigida	Fr	0,7	-
Resistência superficial interna	Rsi	0,13	m <sup>2</sup> K/W
Condições iniciais de contorno			
Umidade inicial	-	0,8	-
Temperatura inicial	-	20	°C
Período de simulação		5 aos	
Clima			
Clima externo	Arquivo climático (RORIZ, 2012)		
Clima interno	De acordo com a ASHRAE 160		

(fonte: adaptado de NASCIMENTO, 2016)

## 2.4 Potencial desenvolvimento de fungos

Como citado no manual do WUFI VTT®, a presença de fungos é um dos sinais de crescimento biológico em construções causado por certas condições de umidade e temperatura. O aparecimento de fungos representa um risco para a segurança e conforto, além do problema estético. Os critérios da norma ANSI ASHRAE 160:2009 são utilizados como condições limites para verificar a taxa de desenvolvimento de fungo pelo plug-in WUFI VTT ®. A norma citada afirma que os problemas com fungos deverão ser reduzidos se a superfície da parede seguir as seguintes condições:

- a) Trinta dias com umidade relativa superficial média menor que 80%, quando a média da temperatura superficial no período estiver entre 5°C e 40°C;
- b) Sete dias com umidade relativa superficial média menor que 98%, quando a média da temperatura superficial no período estiver entre 5°C e 40°C;



c) Vinte e quatro horas com umidade superficial média menor que 100%, quando a média da temperatura superficial no período estiver entre 5°C e 40°C.

Segundo o software, o modelo foi proposto por Hukka et al. (1999) e Viitanen et al. (2000), e é essencial para medir o risco de crescimento de fungos em materiais de construção. Na Tabela 11 encontra-se a classificação dos materiais segundo classes de sensibilidade ao aparecimento de fungos sob certas condições.

Tabela 11 – Classe de sensibilidade à fungos de acordo com o tipo de material

<b>Classe de sensibilidade à 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.
Mediamente resistente	Materiais à base de cimento ou plástico, fibras minerais.
Resistente	Vidro, metal, materiais com bom tratamento para proteção.

(fonte: adaptado da Tabela 4 do WUFI® Mould Index VTT Help. 2019)

Como ilustrado pela Tabela 12, o WUFI VTT® determina que quando o índice de fungo for igual a zero significa que não há incidência de fungo na edificação.

Tabela 12 – Índice de crescimento de fungos

Índice de crescimento de fungos	Descrição da taxa de crescimento
0	Nenhum crescimento.
1	Pequenas quantidades de fungo na superfície (microscópico), estágios iniciais de crescimento local.
2	Várias colônias locais de crescimento de fungos na superfície (microscópico).
3	Resultados visuais de fungos na superfície, menor que 10% de cobertura ou maior que 50% de cobertura de fungos.
4	Resultados visuais de 10% a 50% de cobrimento fungos na superfície ou maior que 50% de cobrimento (microscópico).
5	Crescimento de fundo na superfície maior que 50%.
6	Crescimento denso, cobrimento com cerca de 100%.

(fonte: adaptado da Tabela 1 do WUFI® Mould Index VTT Help. 2019)

As isopleias (gráficos com umidade relativa no eixo das ordenadas e temperatura no eixo das abcissas) constituem uma das possibilidades de visualização dos limites de umidade e temperatura determinados pela ANSI ASHRAE 160:2009. São desenhados neste gráfico o limite I, referente a substratos bio-utilizáveis (como papel de parede, gesso acartonado e materiais mais frágeis a microrganismos em geral), e o limite II, referente a substratos não tão sensíveis (materiais de origem mineral, gesso, etc). Posicionando os pontos de umidade e temperatura de uma área da parte no gráfico das isopleias, é possível averiguar se algum dos limites é ultrapassado por esses pontos. O tempo está diretamente ligado às cores do gráfico, de forma que os pontos próximos ao início da simulação são amarelos, e em seguida vão escurecendo quando se aproximam do fim do período simulado.

### 3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

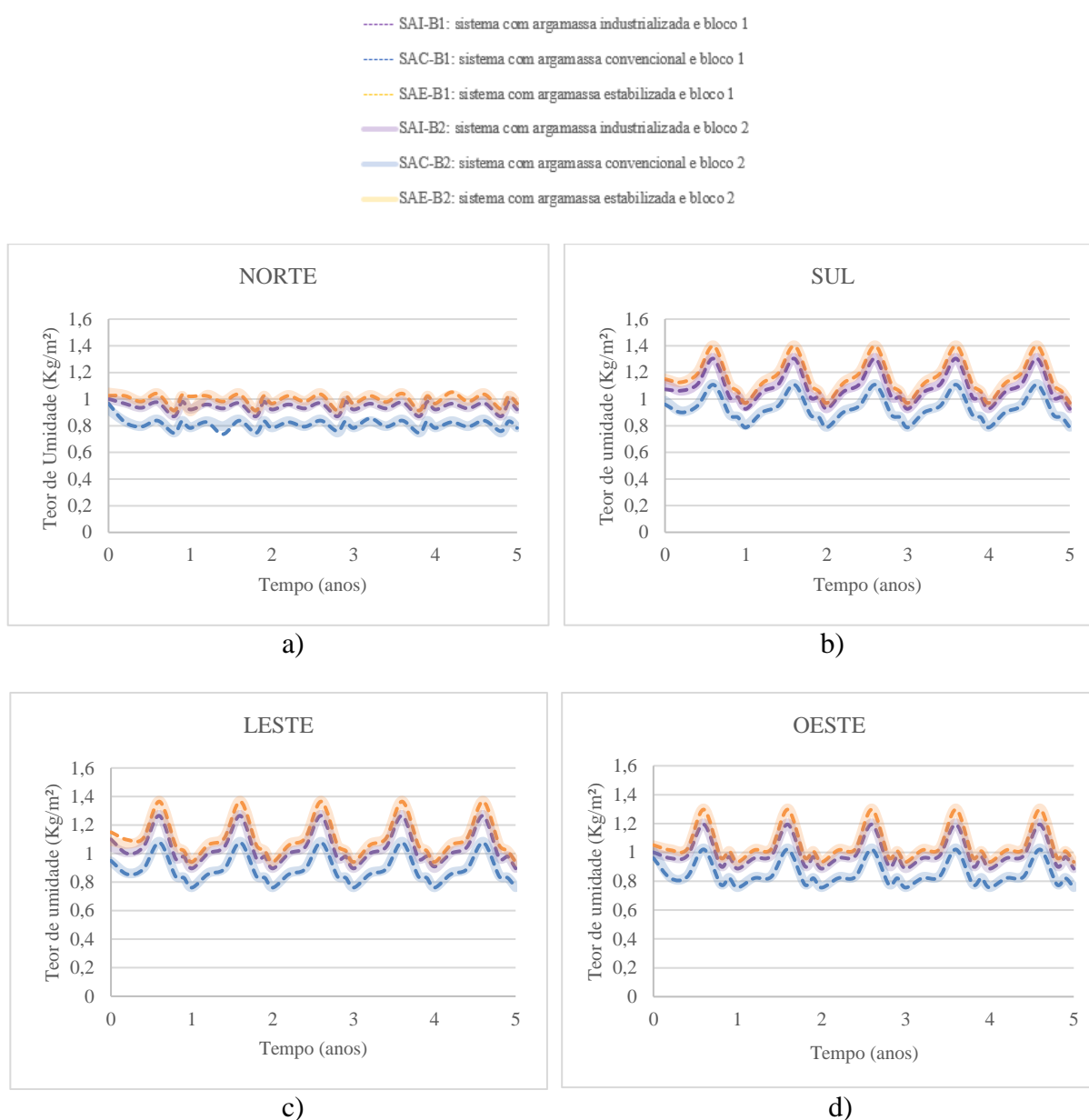
A seguir serão apresentados os resultados da simulação computacional gerados no WUFI para o teor de umidade, perfil de umidade e possível desenvolvimento de fungos, para cada um dos sistemas e direções.

### 3.1 Resultados da simulação computacional

#### 3.2.1 Teor de umidade

Abaixo, nas Figuras 10, 11, 12 e 13, estão representados os gráficos de teor de umidade para os 6 sistemas compostos pelas 3 argamassas e os 2 diferentes tipos de bloco de concreto, de acordo com as orientações Norte, Sul, Leste e Oeste

Figura 10 – Representação gráfica do teor de umidade por área de parede em  $\text{kg/m}^2$ . a) Teor de umidade para a orientação Norte. b) Teor de umidade para a orientação Norte. c) Teor de umidade para a orientação Leste. d) Teor de umidade para a orientação Oeste.



(fonte: elaborada pelo autor)

Relembrando o teor de incidência de radiação solar e de umidade, demonstrado na Figura 9, o Norte possuía a maior taxa de radiação incidente e o Sul a maior taxa de umidade. Nota-se que as figuras 10a e 10b corroboram o resultado encontrado anteriormente na Figura 9. As orientações Leste e Oeste possuem um teor de chuva incidente similar. Entretanto, quando se trata da radiação solar, o lado Oeste tem uma taxa mais elevada. Conforme a Figura 10d, isso acarreta numa evaporação maior do sistema, diminuindo o teor de umidade.

A maior taxa de chuva incidente é localizada entre as orientações Sul e Leste. Contudo, conforme pode-se observar nos gráficos 10b e 10c, o maior teor de umidade e o maior teor de chuva incidente encontra-se deslocado mais para o lado Sul. Logo, nota-se que o teor de umidade é inversamente proporcional à incidência de radiação para esse estudo.

Nota-se, ainda, que para todas as direções o sistema com argamassa estabilizada corresponde ao maior teor de umidade, o que se deve ao fato do seu índice de vazios ser menor (Tabela 2), visto que a sua isoterma é intermediária (Tabela 9), enquanto que o sistema com argamassa convencional corresponde ao menor teor de umidade, para os dois blocos. Observando detalhadamente, os sistemas compostos pelo B2 possuem um teor de umidade um pouco mais elevado do que os sistemas compostos pelo B1. Isso também se confirma pelo índice de absorção de água, conforme Tabela 1, onde o índice do B2 é maior do que do B1. Quanto a argamassa industrializada, para os dois blocos, sua taxa de umidade manteve-se sempre entre os dois extremos (argamassa estabilizada e argamassa convencional).

Por fim, o resultado mostrou que o sistema mais crítico é aquele composto pela argamassa estabilizada e pelo B2. Já, o melhor sistema é aquele composto pela argamassa convencional e pelo B1.

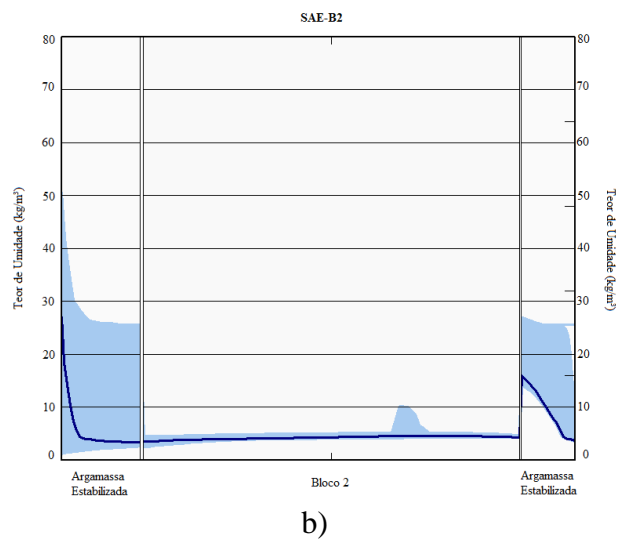
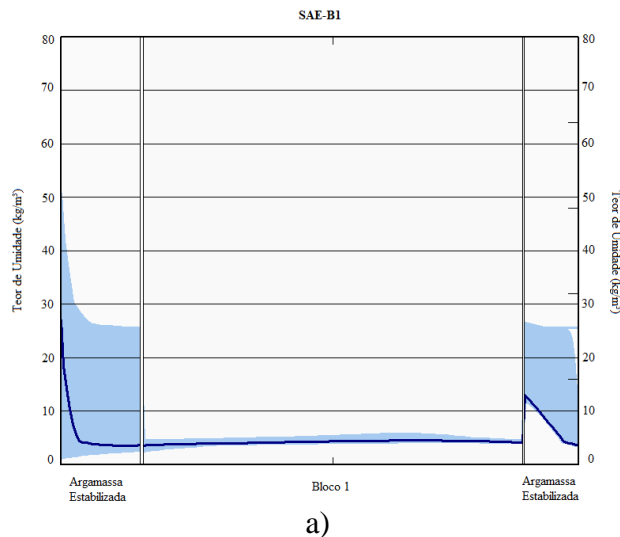
Comparando com o trabalho de Kleber (2018), nota-se o fato de que os sistemas não possuem nenhum tipo de acabamento superficial possibilita uma alta capacidade de secagem da parede, resultando em um baixo teor de umidade durante o período. Além disso, Kleber (2018) utilizou bloco cerâmico, o qual possui um índice de absorção de água maior e menor permeabilidade ao vapor, resultando em um teor de umidade mais elevado, enquanto que, neste trabalho, utilizou-se o bloco de concreto, que possui uma taxa de umidade menor devido ao seu baixo índice de absorção de água e maior permeabilidade ao vapor, comparado ao bloco cerâmico.

### 3.2.2 Perfil de umidade

O perfil de umidade foi apresentado para os casos mais críticos, isto é, para a orientação Sul, argamassa estabilizada e os blocos 1 e 2.

O perfil é composto da seguinte forma: lado externo da parede a esquerda, composto por argamassa estabilizada de 3 cm; elemento construtivo ao centro, composto pelo bloco de concreto de 14 cm; e lado interno a direita, com argamassa estabilizada de 2 cm, conforme Figura 11.

Figura 11 – Teor de umidade para a seção transversal do sistema com argamassa estabilizada e blocos de concreto (1) e (2) para a orientação Sul. a) Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e bloco 1; b) Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e bloco 2.



(fonte: elaborada pelo autor)

A parte em azul representa o teor de umidade ao longo da seção transversal da parede durante o período de tempo estipulado para a simulação. Conforme o tempo transcorre, as variações no teor de umidade determinam os limites.

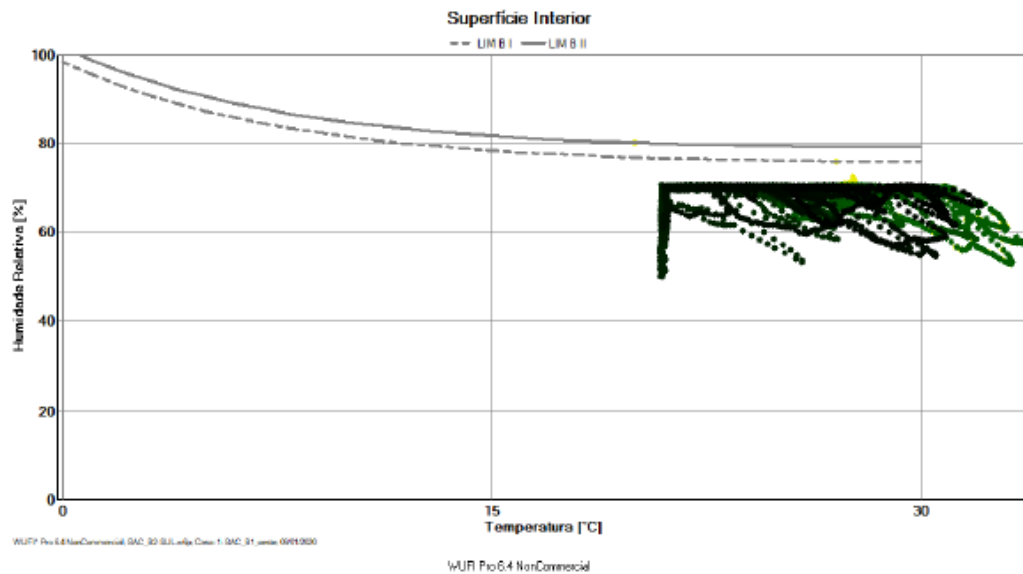
Para todos os sistemas o teor de umidade foi semelhante na parte externa e interna, como se pode observar na Figura 11a e 11b. Contudo, nota-se um teor de umidade um pouco maior no centro do sistema que constituído pela argamassa estabilizada e bloco 2, para a direção Sul, representado na Figura 11b. Isso se deve ao índice de absorção do bloco 2 ser mais elevado em relação ao bloco 1, e também, se deve ao fato do sistema de argamassa estabilizada e bloco 2 ser simulado para a orientação de maior taxa de precipitação.

### *3.2.3 Índice de desenvolvimento de fungos*

Para analisar o possível desenvolvimento de fungos no futuro, foram simulados os seis diferentes sistemas para todas as direções. Contudo, foram apresentados neste trabalho apenas os dois mais críticos vistos até agora (SAE-B1 e SAE-B2), durante um período de 10 anos, para a orientação Sul, que como visto anteriormente no item 3.2.1, é a orientação com maior teor de umidade. O WUFI VTT® permite determinar um tipo de material que, para o caso desse estudo, adotou-se um “material a base de cimento” para ambiente interno classificado como medianamente sensível de acordo com a Tabela 11.

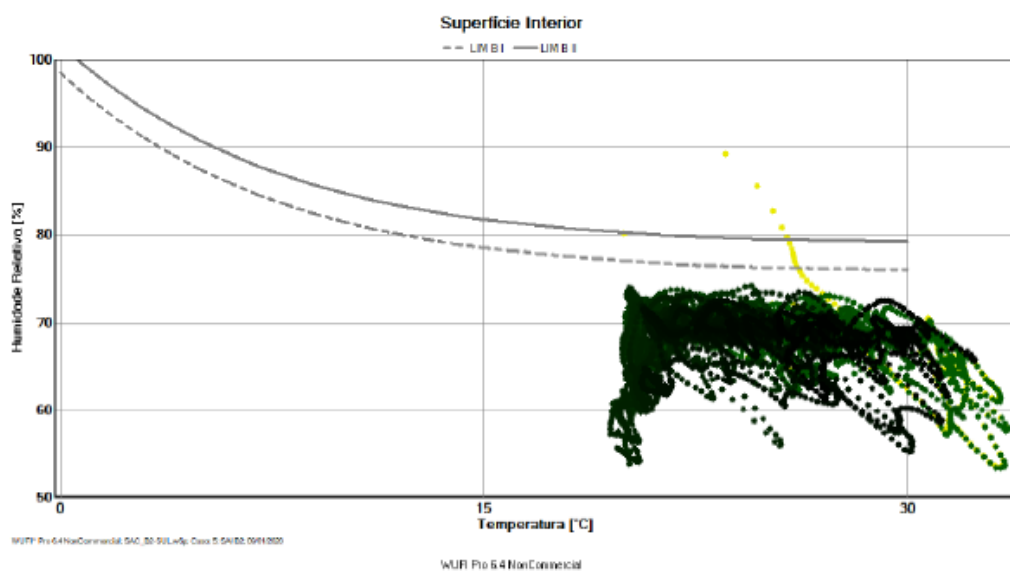
Nas Figuras 16 e 17, estão representadas as isopletras para a superfície interna para o sistema de argamassa convencional e B1, como também, para o sistema de argamassa estabilizada e bloco de concreto B2. No período inicial da simulação os pontos são amarelos, eles ficam escuros conforme se aproxima o fim do período da simulação.

Figura 16 – Isopleta da superfície interna da seção transversal para o sistema com argamassa convencional e bloco 1 para a orientação Sul.



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 17 – Isopleta da superfície interna da seção transversal para o sistema com argamassa estabilizada e blocos 2 para a orientação Sul.



A simulação foi feita para todos os sistemas, que acarretou em resultados muito similares, para o sistema de argamassa convencional e B1 para todas as direções. Já, para o restante dos sistemas: argamassa convencional e B2, argamassa industrializada e B1, argamassa industrializada e B2, argamassa estabilizada e B1 e argamassa estabilizada e B2, para todas as direções, os resultados também foram muito similares, conforme Apêndice B.

Como citado anteriormente, os pontos amarelos são referentes ao início do período de simulação e os escuros referentes ao fim do período. Observa-se que pouquíssimos pontos em amarelo estão acima do limite II. Contudo, os sistemas são muito pouco propícios ao desenvolvimento de fungos.

## 4 CONCLUSÃO

Ao realizar uma avaliação geral, os resultados gerados pelo software WUFI® Pro 6.4, de acordo com a condição climática de Porto Alegre e do desempenho higrotérmico de cada sistema, foram satisfatórios.

Por meio dos resultados apresentados ao longo desse trabalho, composto por sistemas com argamassa, bloco de concreto e sem acabamento superficial, conclui-se que dentre os sistemas estudados, a orientação Sul foi a direção que apresentou maior teor de umidade para todos os casos, sendo que o sistema com argamassa estabilizada e bloco 2 apresentou o maior teor de umidade para todas as orientações solares. Esse teor ainda é maior na orientação Sul para todos os sistemas, onde a taxa de precipitação é superior ao longo do período. Também, conclui-se, que o melhor sistema é aquele composto pela argamassa convencional e pelo bloco 1, pois para todas as orientações simuladas, o mesmo apresentou menor teor de umidade.

A maior taxa de chuva incidente é localizada entre as orientações Sul e Leste. Entretanto, o maior teor de umidade e o maior teor de chuva incidente localiza-se mais para a orientação Sul. Logo, nota-se que o teor de umidade é inversamente proporcional à incidência de radiação para esse estudo. Observou-se também que todos os sistemas simulados para a orientação Norte obtiveram o maior teor de radiação solar e, conseqüentemente, o menor teor de umidade.

Assim percebeu-se que os blocos exerceram pouca influência no teor de umidade dos sistemas testados, a maior influência foi para os tipos diferentes de argamassa.

Contudo, nota-se a importância do desenvolvimento de estudos nesta área, identificando os parâmetros higrotérmicos para os materiais utilizados na cidade de Porto Alegre. O fato de ser uma cidade com clima bastante úmido faz com que a atenção deva ser redobrada para análise de teor de umidade nos sistemas aplicados em Porto Alegre e, conseqüentemente, a futura probabilidade de fungos.

Também é importante destacar que este trabalho possibilitou o ganho de aprendizagem e experiência quanto ao tema pesquisado e na utilização das normas técnicas aplicadas.



Observou-se a existência de apenas uma norma brasileira sobre o assunto, que é a ABNT NBR 15575:2013, o que demonstra a necessidade brasileira de maior aprofundamento na área. Esse campo de pesquisa é de extrema relevância para que sejam alcançados avanços na forma de projetar e construir no futuro, aumentando o desempenho das edificações e minimizando possíveis degradações patológicas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVENARIA de blocos de concreto. **Guia para atendimento à Norma ABNT 15575**. São Paulo, p.1-40. 2014. Disponível em: <[http://www.feb.unesp.br/pbastos/alv.estrutural/Alvenaria%20blocos%20concreto\\_manualdesempenho%202014.pdf](http://www.feb.unesp.br/pbastos/alv.estrutural/Alvenaria%20blocos%20concreto_manualdesempenho%202014.pdf)>. Acesso em: 24 out 2019.

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

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.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 12188**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. ABNT, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 6136**. Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos. ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 13529**. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia. ABNT, 2013.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção**. São Paulo, 2010.

COELHO G. B. A. Análise do comportamento higrotérmico em regime variável de paredes sujeitas à acção da chuva incidente, 2015. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa.

GUERRA L.; LOPES W.; CAZAROLLI J.; LOBATO M.; MASUERO A.; DAL MOLIN D.; BENTO F.; SCHRANK A.; VAINSTEIN M. **Biodeterioration of mortar coating in historical buildings: Microclimatic characterization, material, and fungal community**. Building and Environment, p. 195-209, 2019.

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

LIVI F. Elementos do clima: o contraste de tempos frios e quentes. Atlas ambiental de Porto Alegre, 7, p. 73-74, 2018. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/atlas/>>. Acesso em: 30 junho 2018.

NASCIMENTO, M. L. M. **Aplicação da Simulação Higrotérmica na Investigação da Degradação de Fachadas de Edifícios.** Brasília, 2016. 173p. 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.labee.ufsc.br/downloads/arquivosclimaticos/formato-epw>>. Acesso em: julho de 2019.

SALOMÃO, M. C. F. **Estudo da estrutura das argamassas de revestimento e sua influência nas propriedades de transporte de água.** Brasília, 2016. 229p. Tese de doutorado – Departamento de Engenharia Civil – Universidade de Brasília.

X. Si, X. Quan. **Prevention of multi-species wastewater biofilm formation using vanillin and EPS disruptors through non-microbicidal mechanisms.** International Biodeterioration & Biodegradation, 116, p. 211-218, 2017.

SILVA H.; KINSEL L. **Região climática de Porto Alegre – revisão para um desenho inteligente e uma arquitetura adequada.** Arq texto, 9, p. 126-133, 2006.

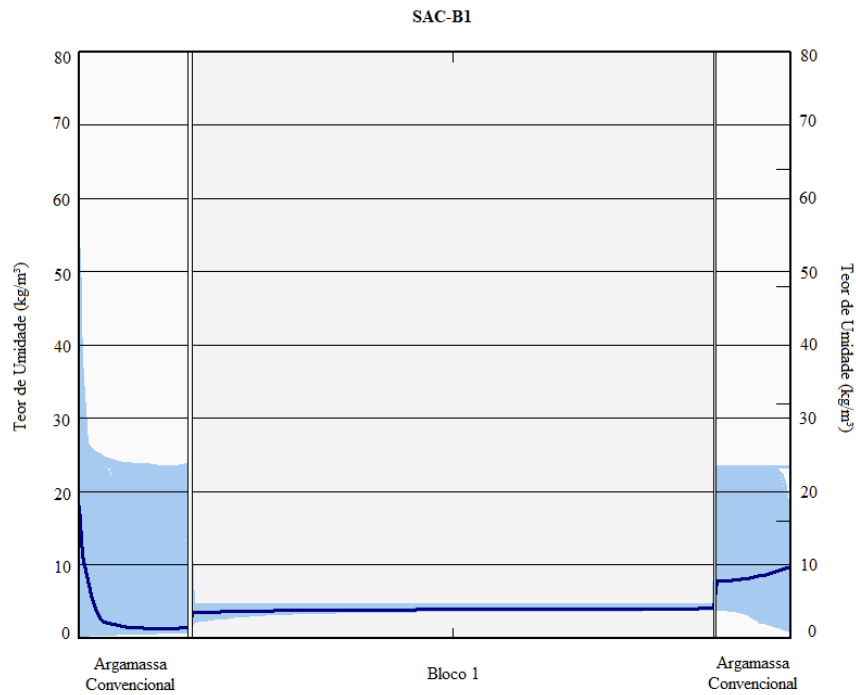
TURRA, D. G. **Contribuições para o estudo de algumas propriedades nos estados fresco e endurecido da argamassa estabilizada por 72 horas.** Porto Alegre, 2016. 70p. Trabalho de diplomação – Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Y. He, Q. Luo, P. Ge, G. Chen, H. Wang. **Review on mould contamination and hygrothermal effect in indoor environment.** Journal of Environmental Protection, 9, p. 100–110, 2018.

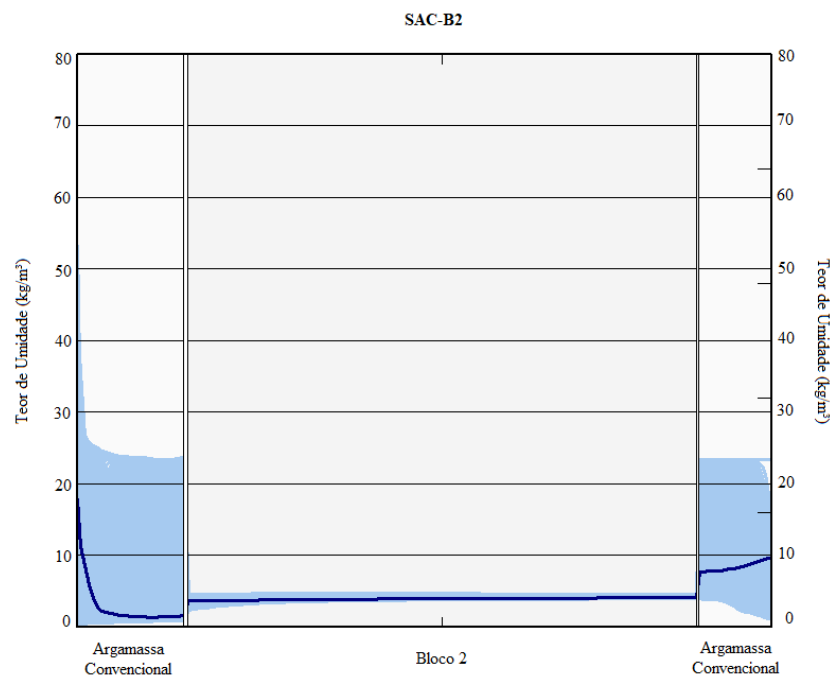
**SOLOLOSKI R.; MASUERO A. Evaluation of the efficiency of the treatment for rising damp on walls through the insertion of chemical barriers by gravity.** Construction and Building Materials, p. 661-672, 2019.

## APÊNDICE A – Perfis de teor de umidade para cada sistema e orientação

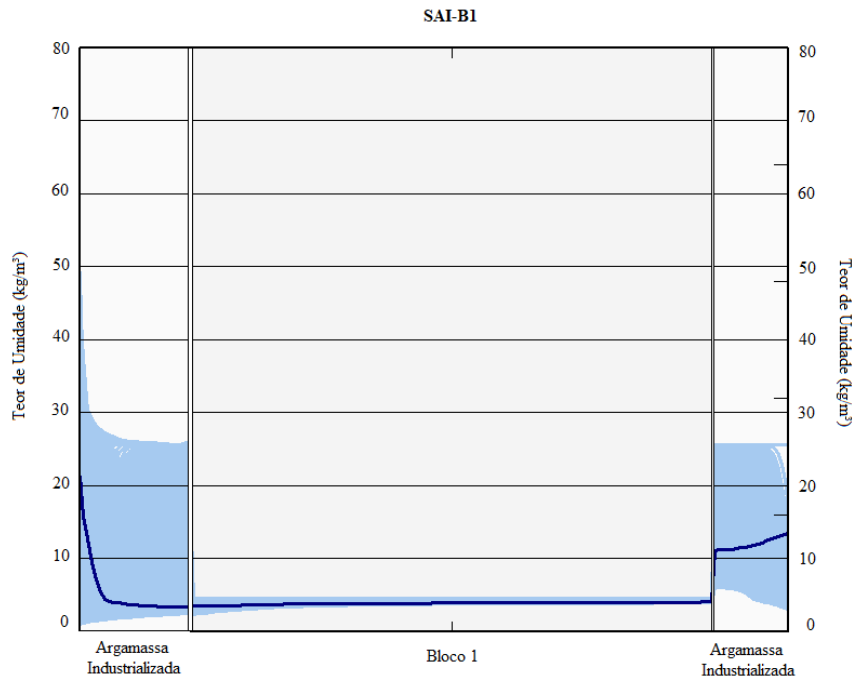
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B1 para a orientação Sul



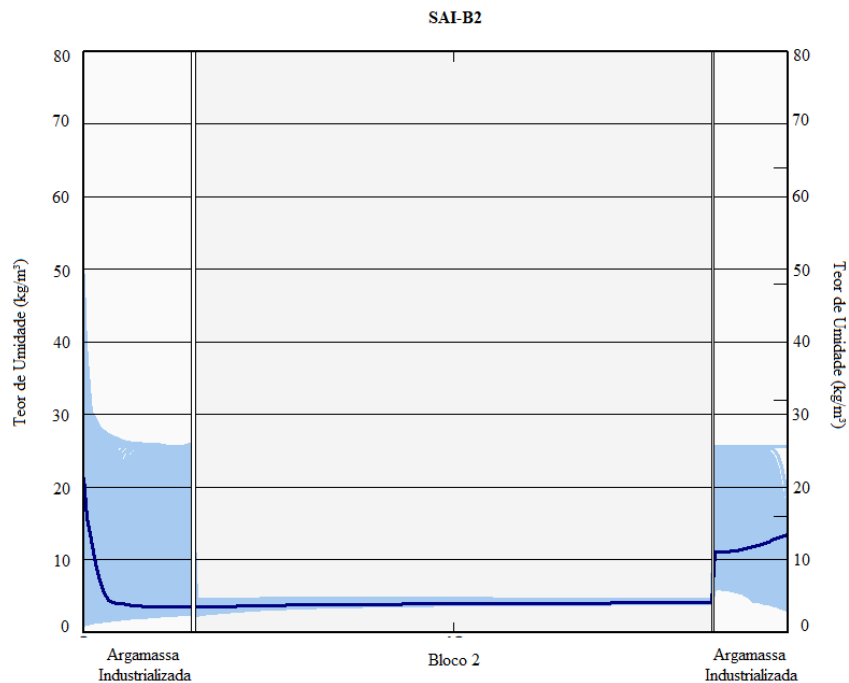
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B2 para a orientação Sul



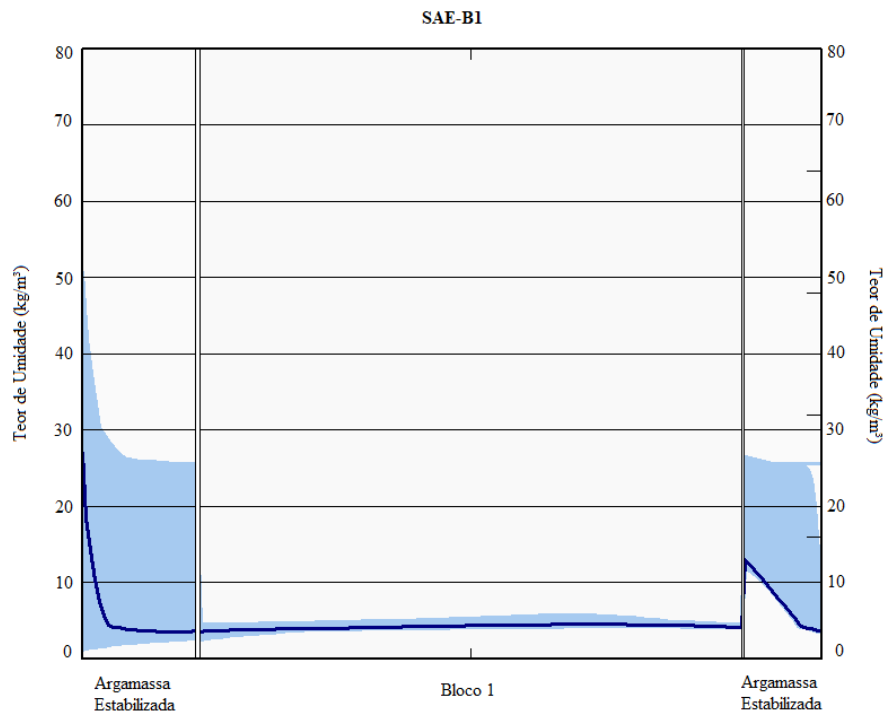
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B1 para a orientação Sul



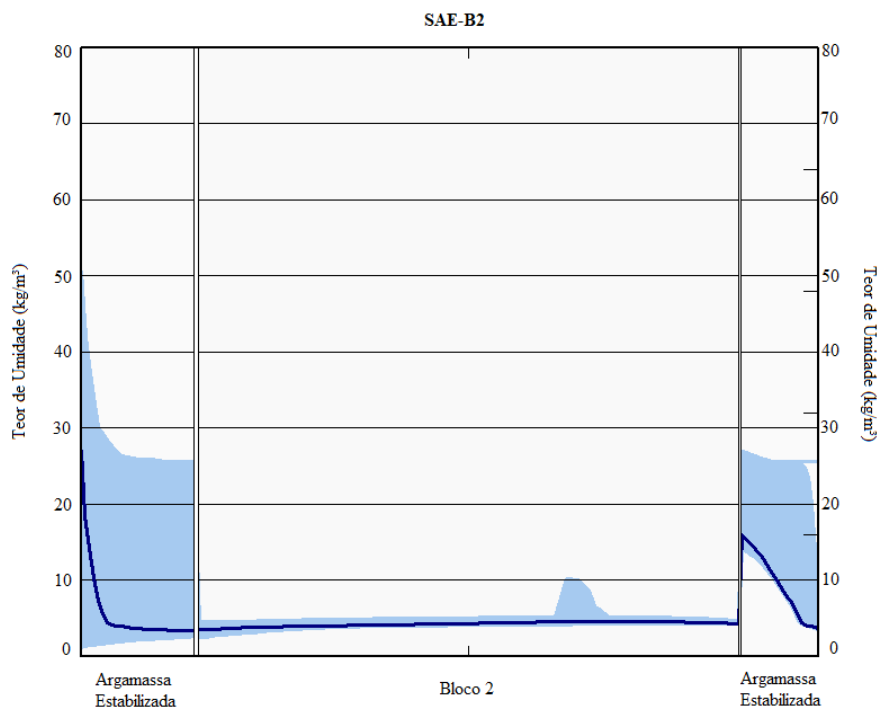
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B2 para a orientação Sul



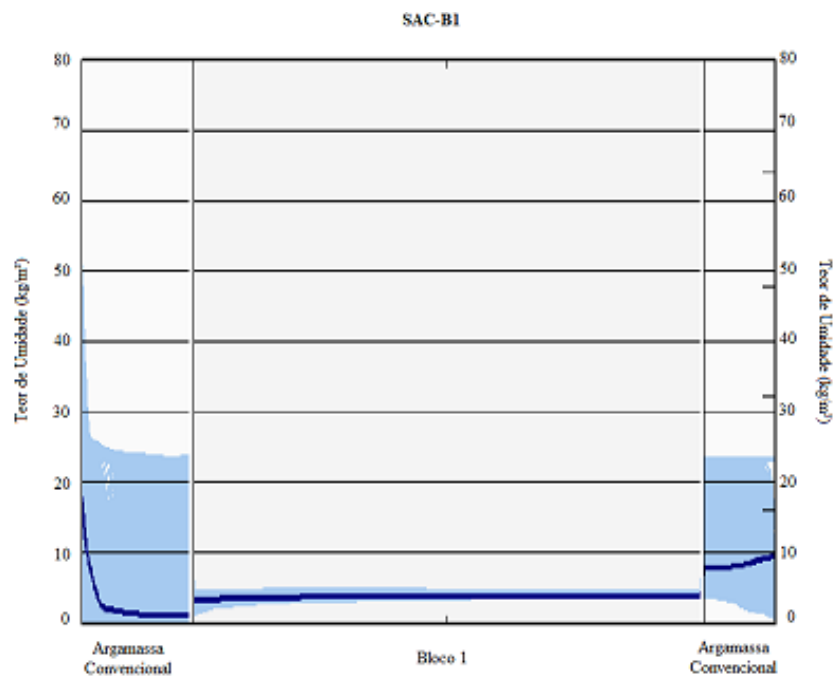
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B1 para a orientação Sul



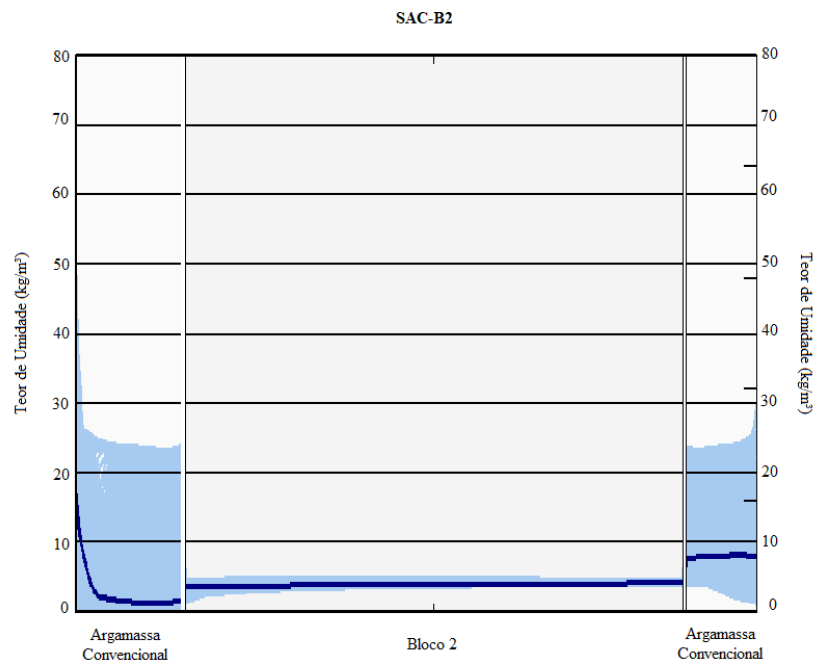
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B2 para a orientação Sul



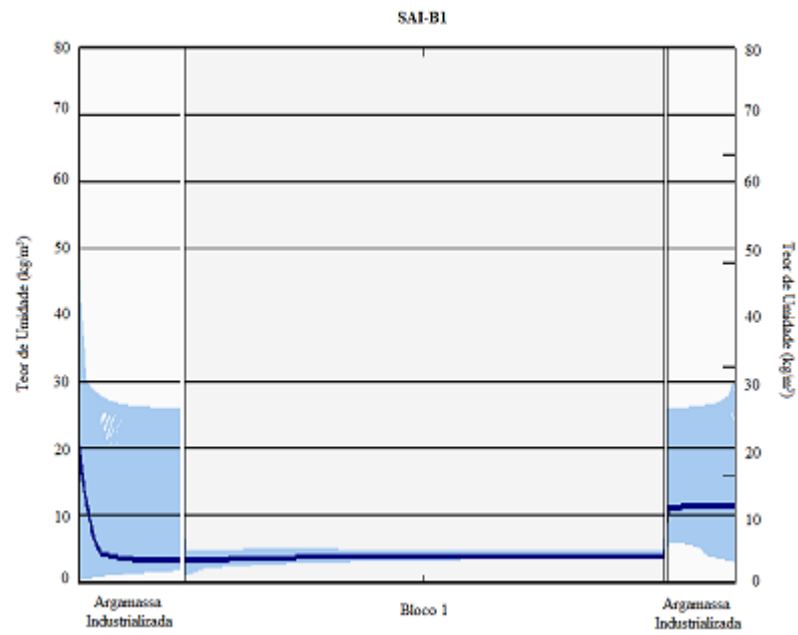
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B1 para a orientação Norte



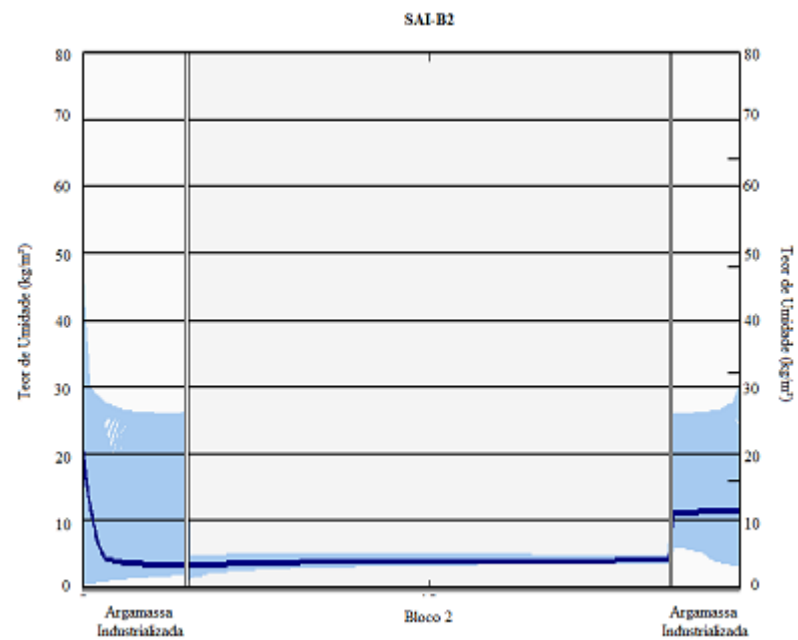
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B2 para a orientação Norte



Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B1 para a orientação Norte

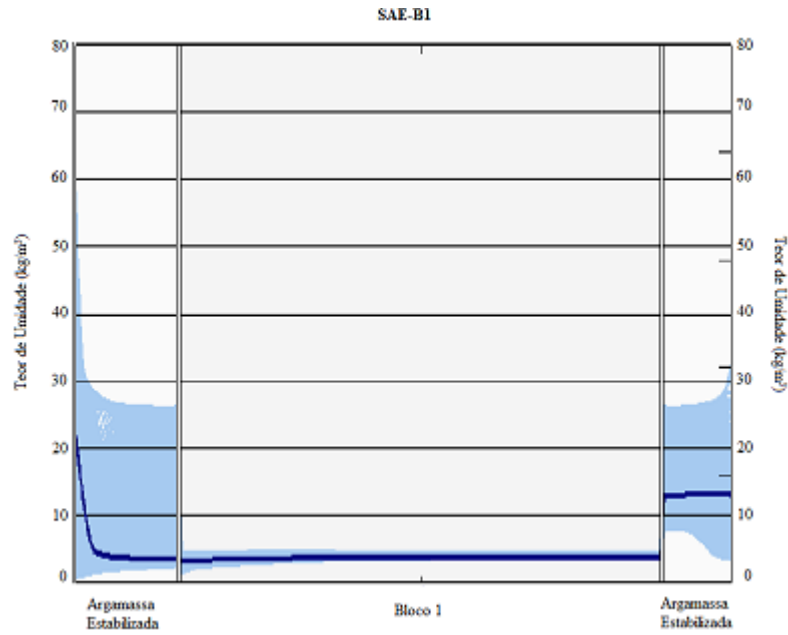


Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B2 para a orientação Norte

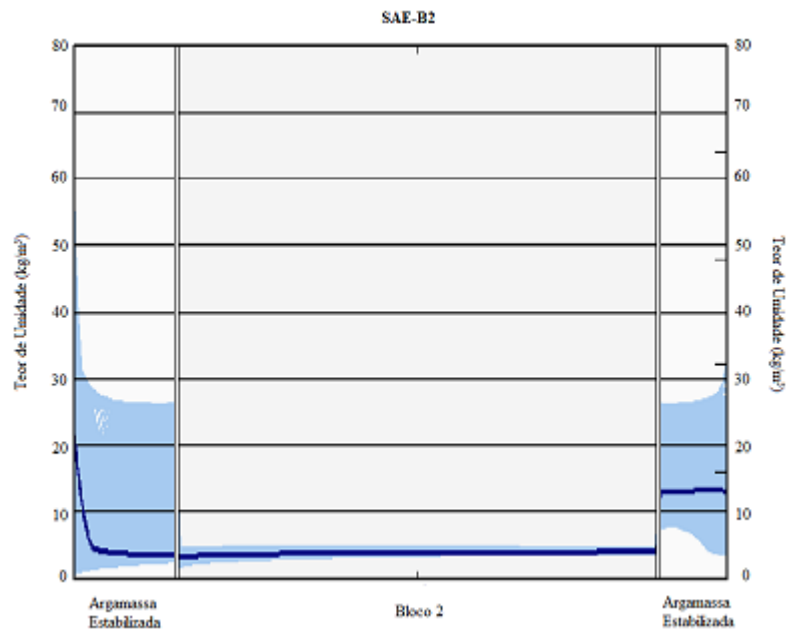




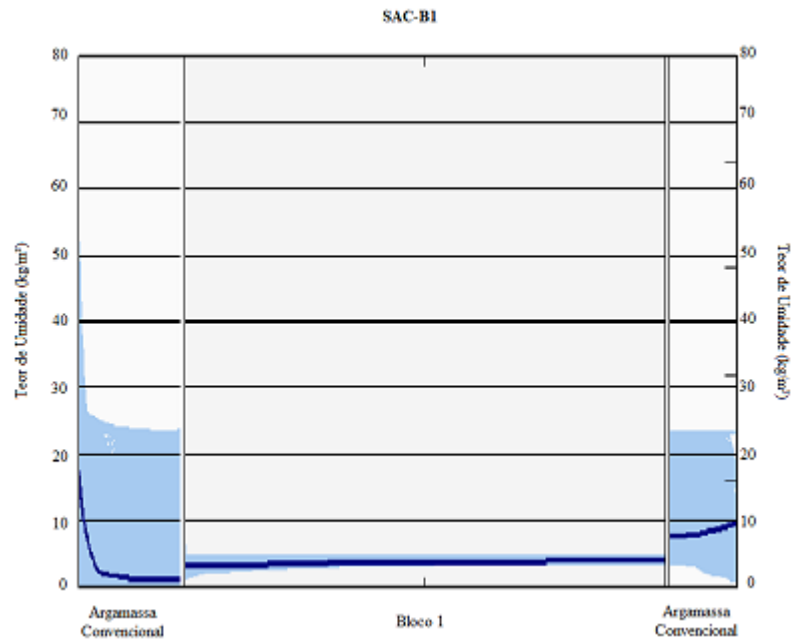
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B1 para a orientação Norte



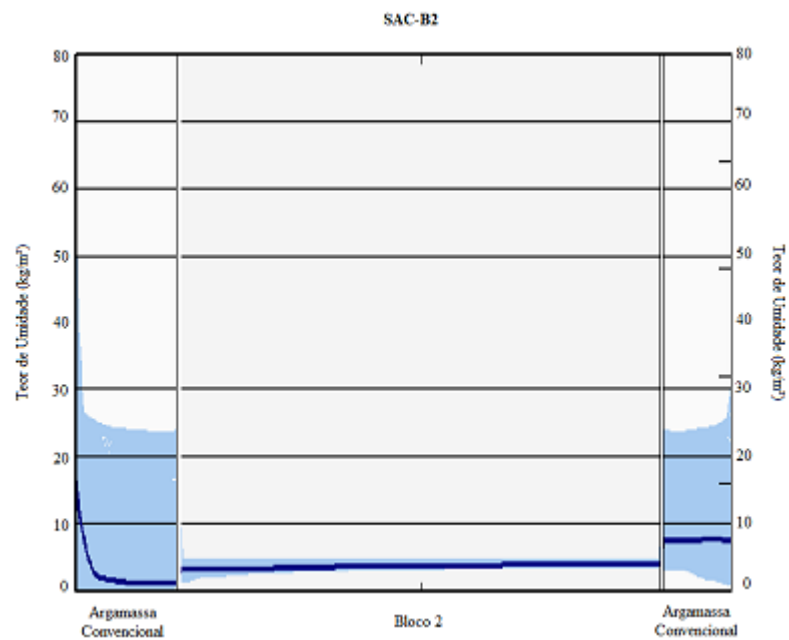
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B2 para a orientação Norte



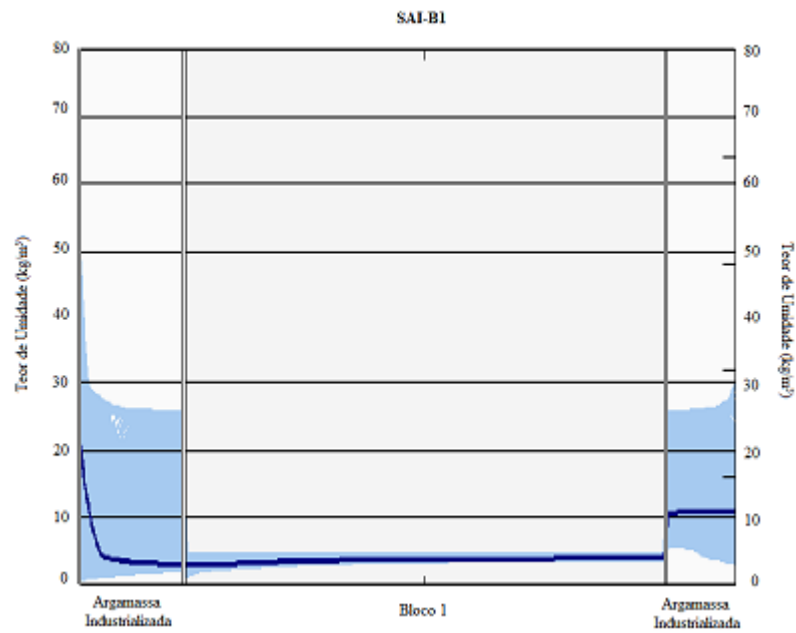
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B1 para a orientação Leste



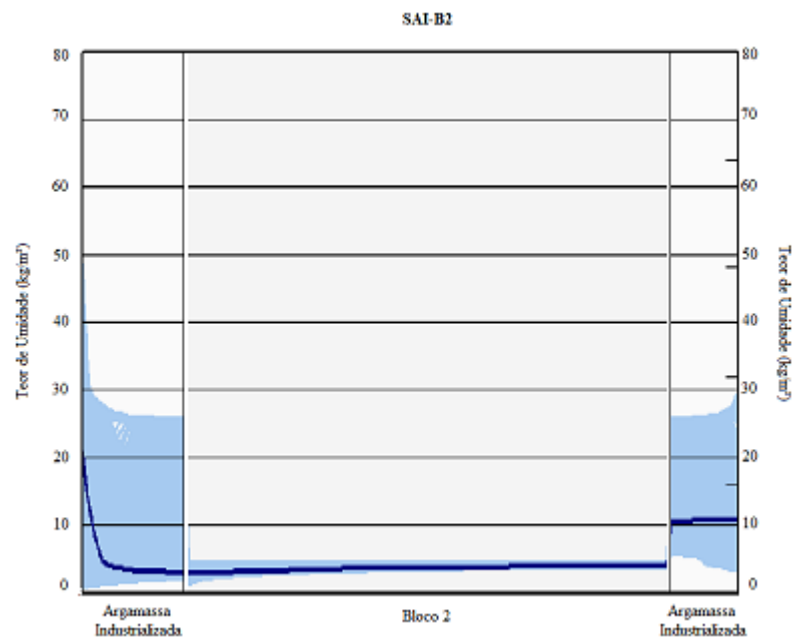
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B2 para a orientação Leste



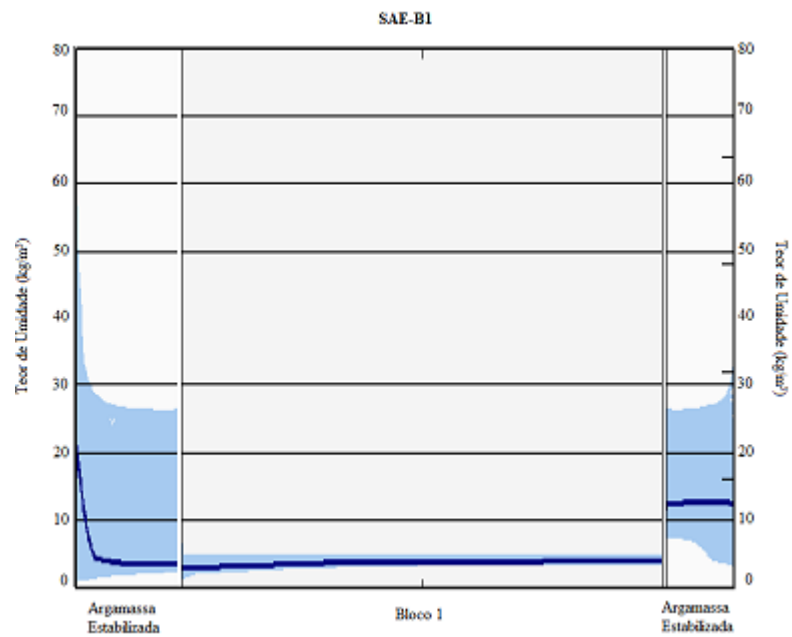
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B1 para a orientação Leste



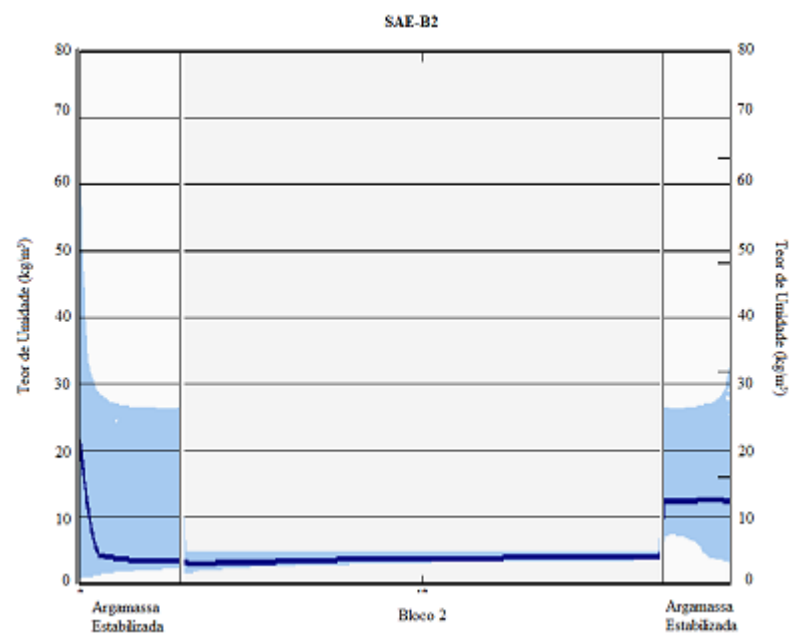
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B2 para a orientação Leste



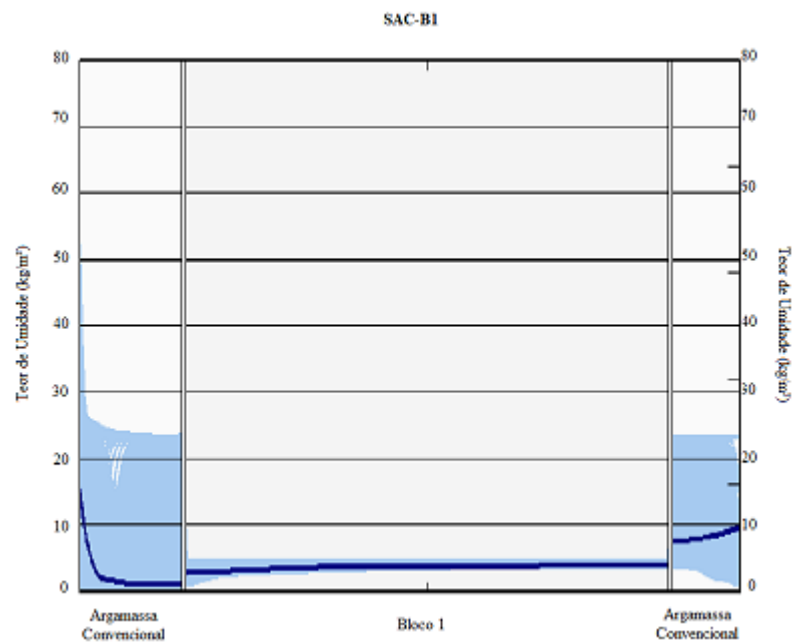
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B1 para a orientação Leste



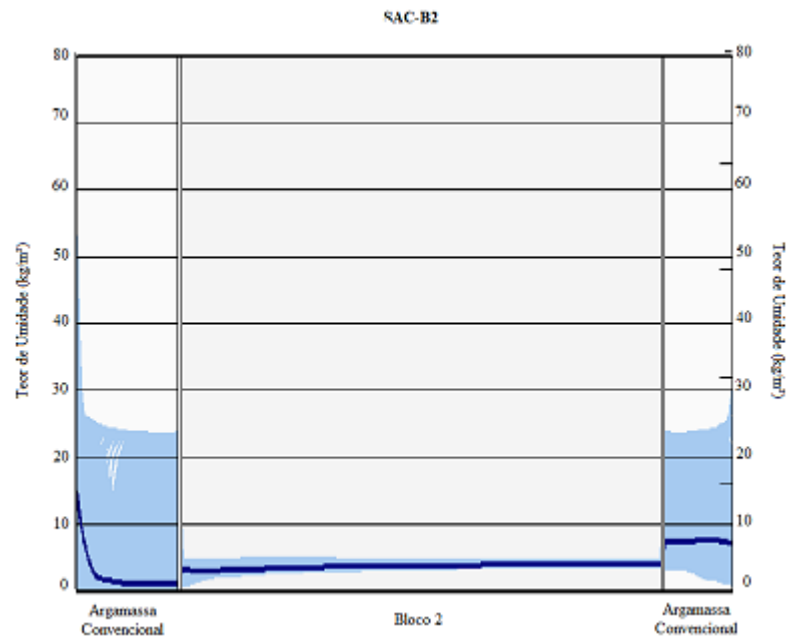
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B2 para a orientação Leste



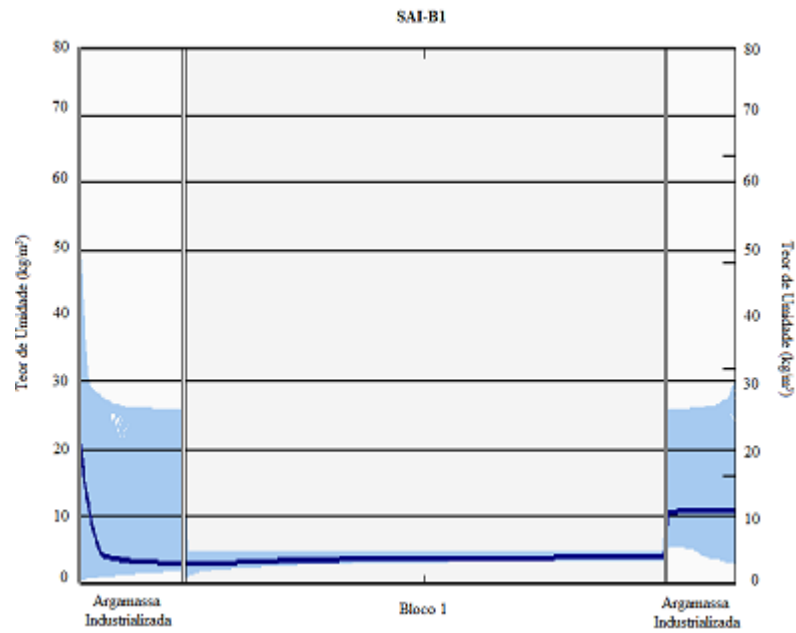
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B1 para a orientação Oeste



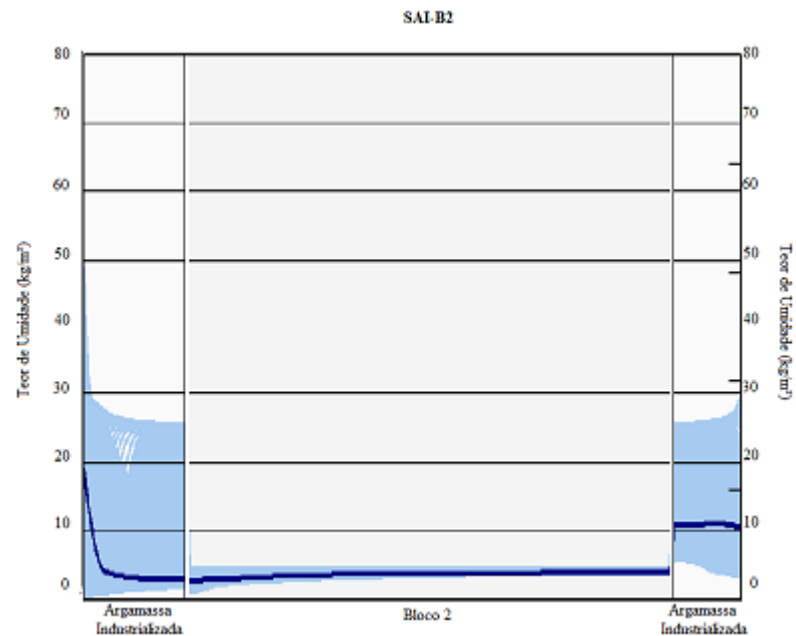
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B2 para a orientação Oeste



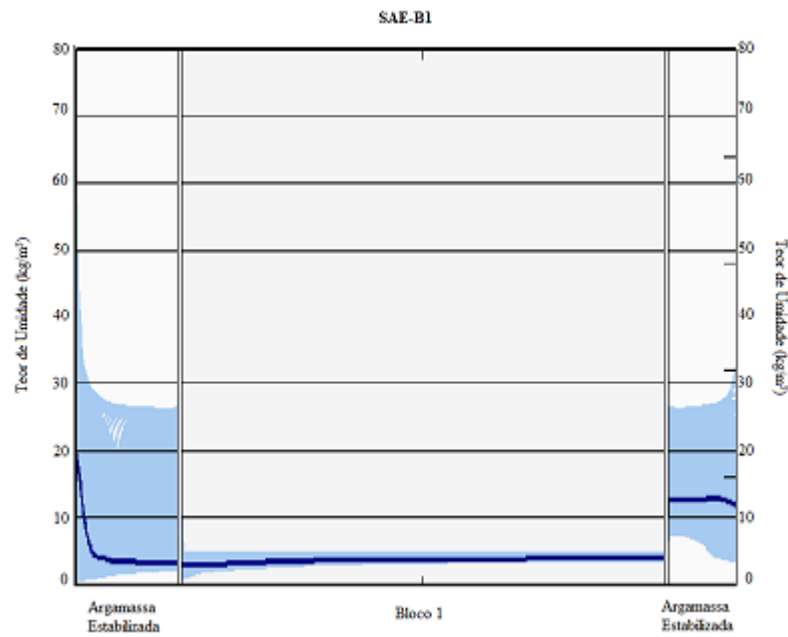
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B1 para a orientação Oeste



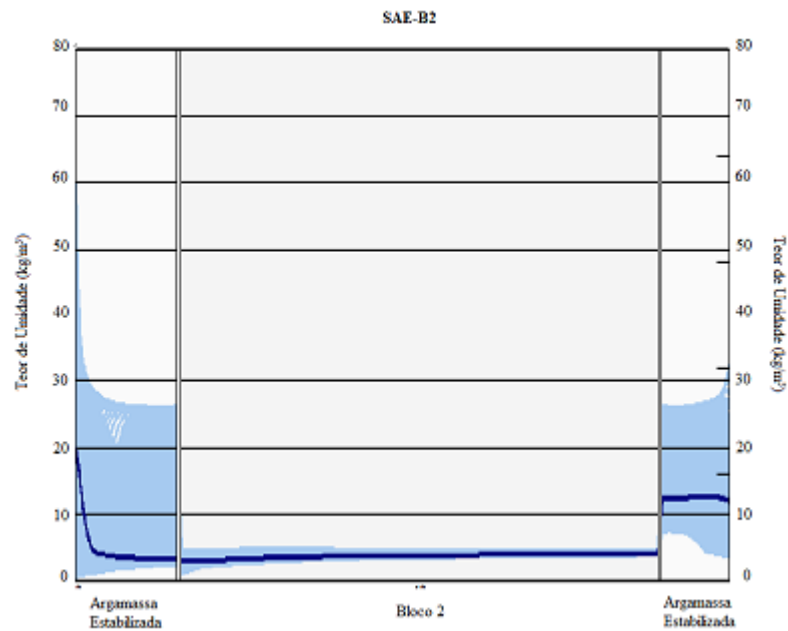
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B2 para a orientação Oeste



Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B1 para a orientação Oeste

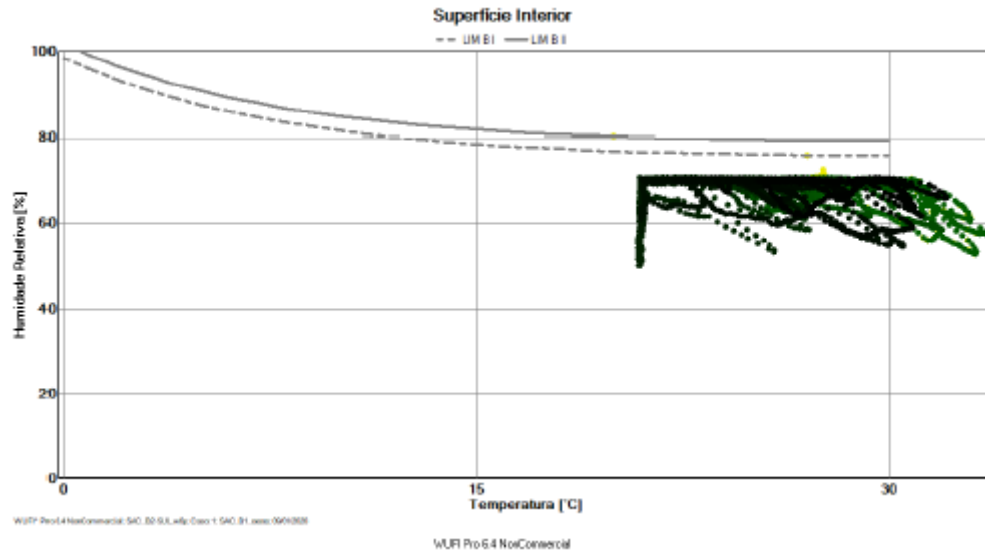


Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B2 para a orientação Oeste

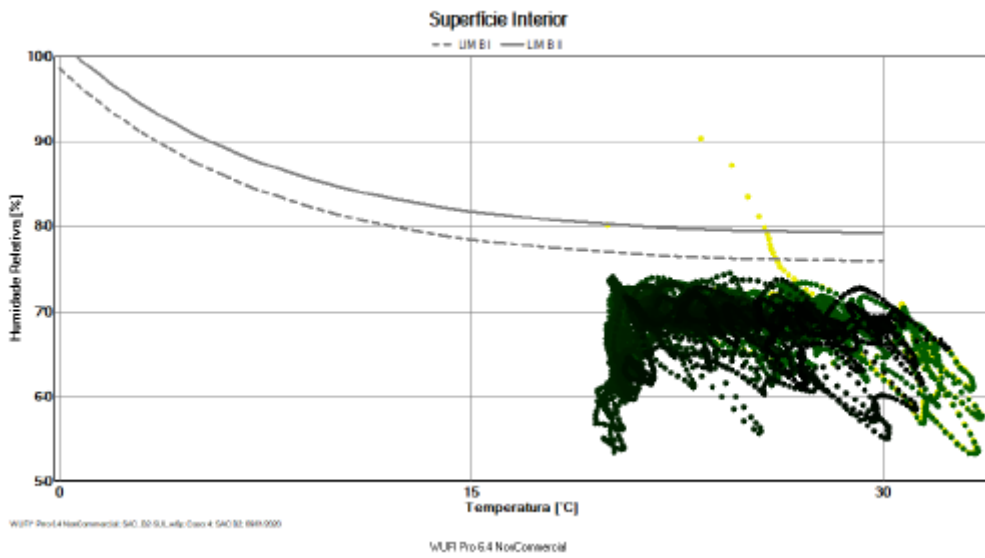


## APÊNDICE B – Potencial de desenvolvimento de fungos para cada sistema e orientação

Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B1 para a orientação Sul.

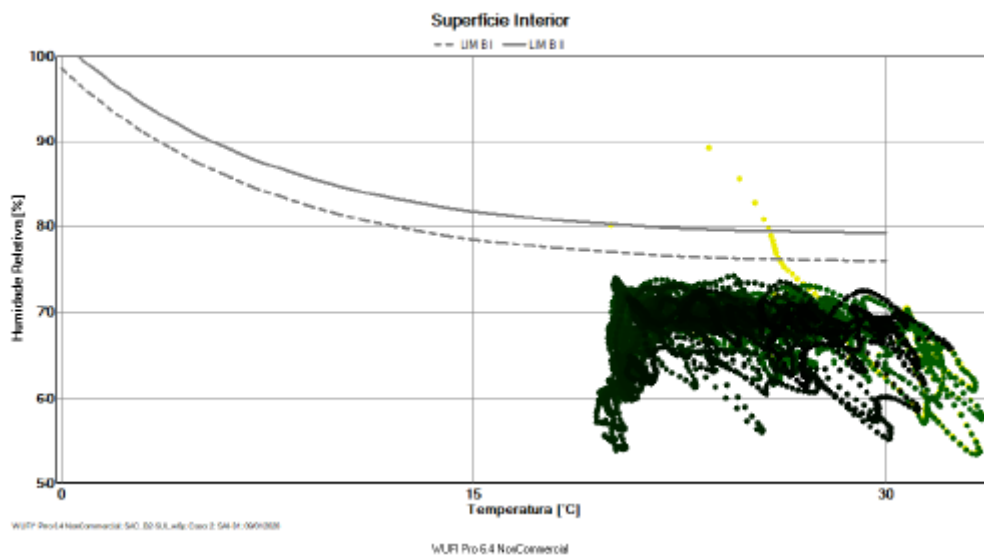


Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B2 para a orientação Sul.

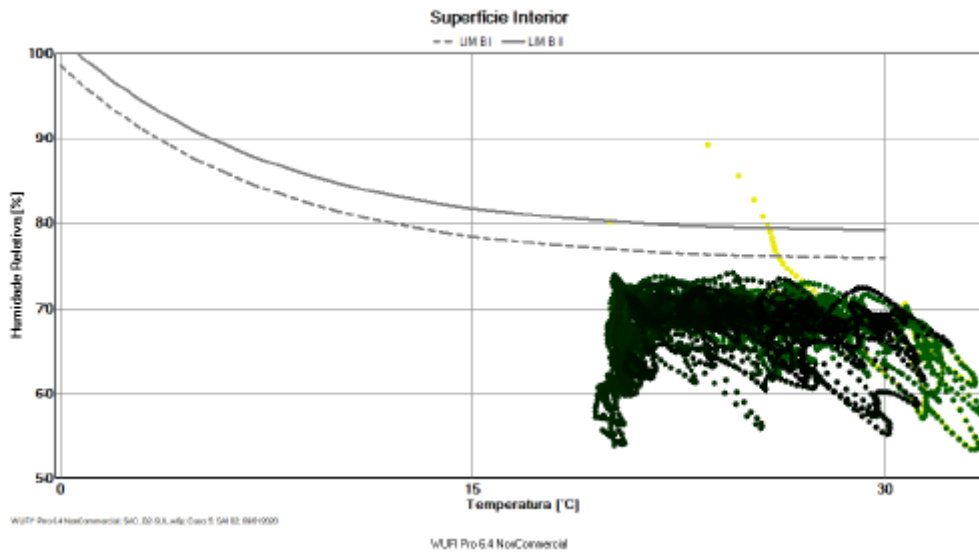




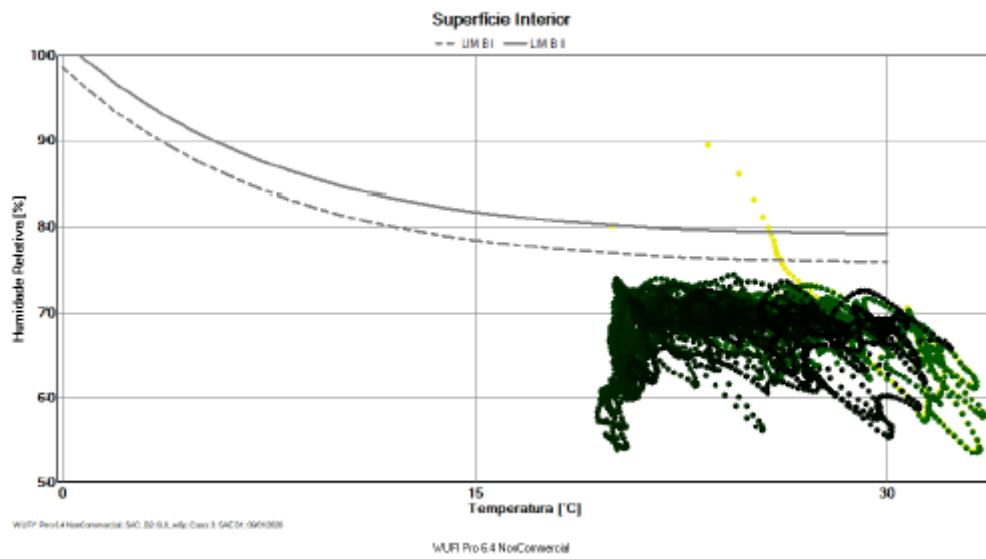
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B1 para a orientação Sul.



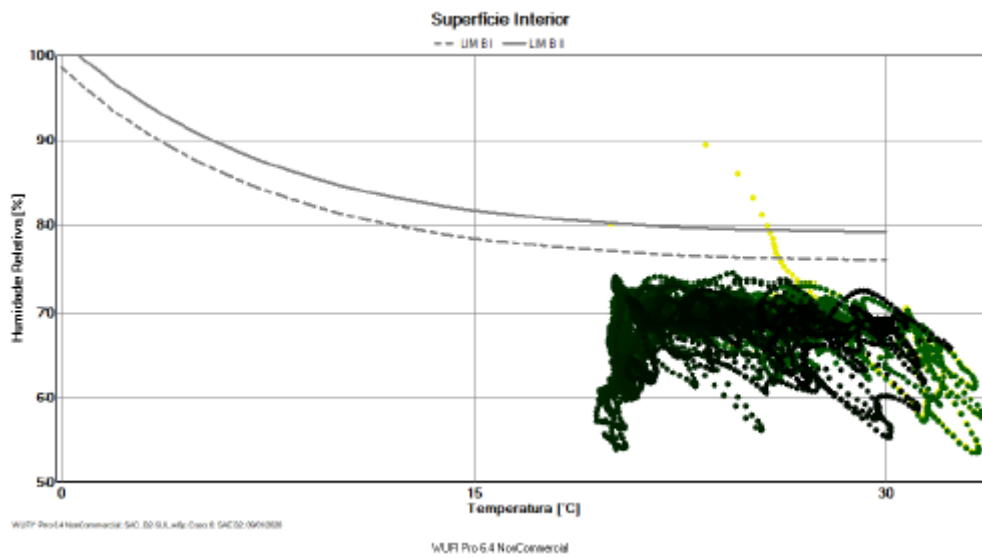
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B2 para a orientação Sul.



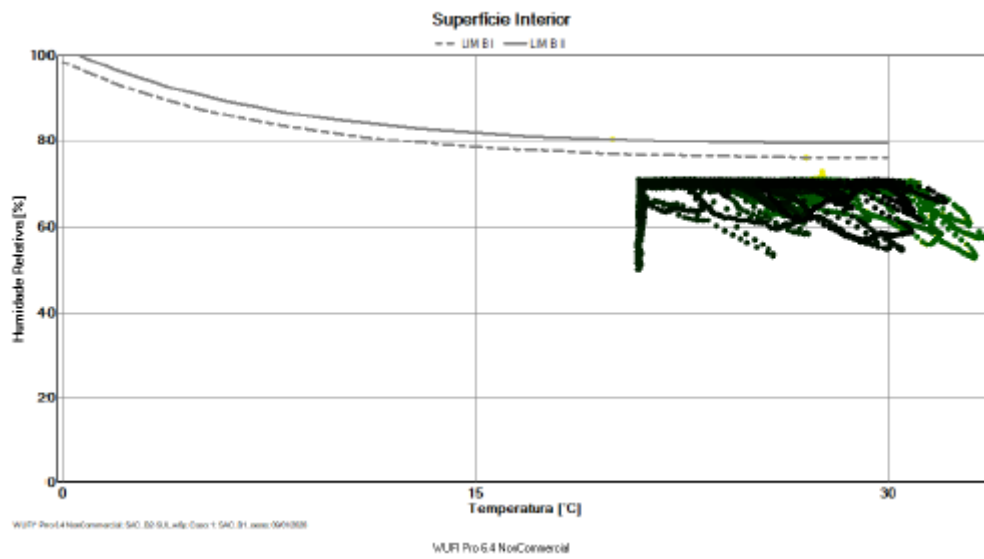
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B1 para a orientação Sul.



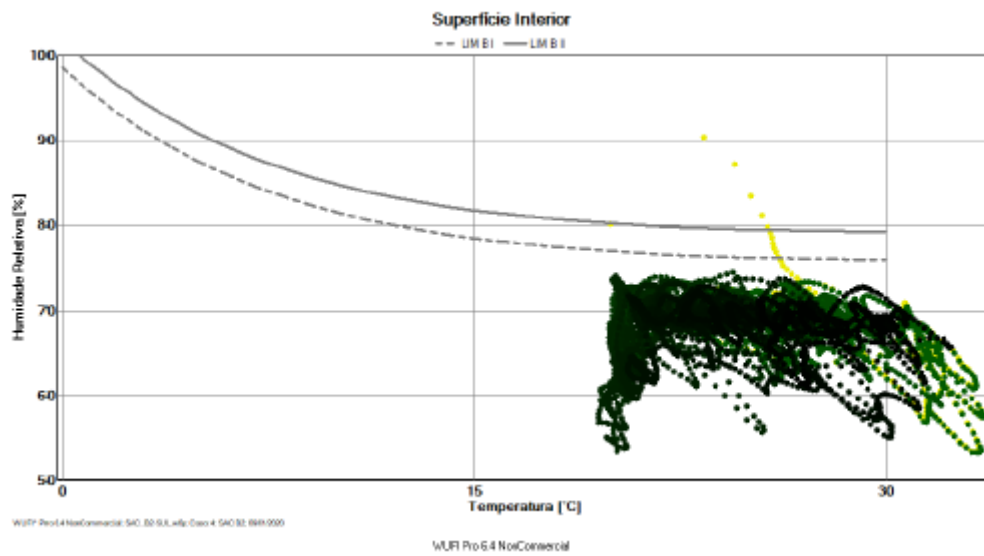
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B2 para a orientação Sul.



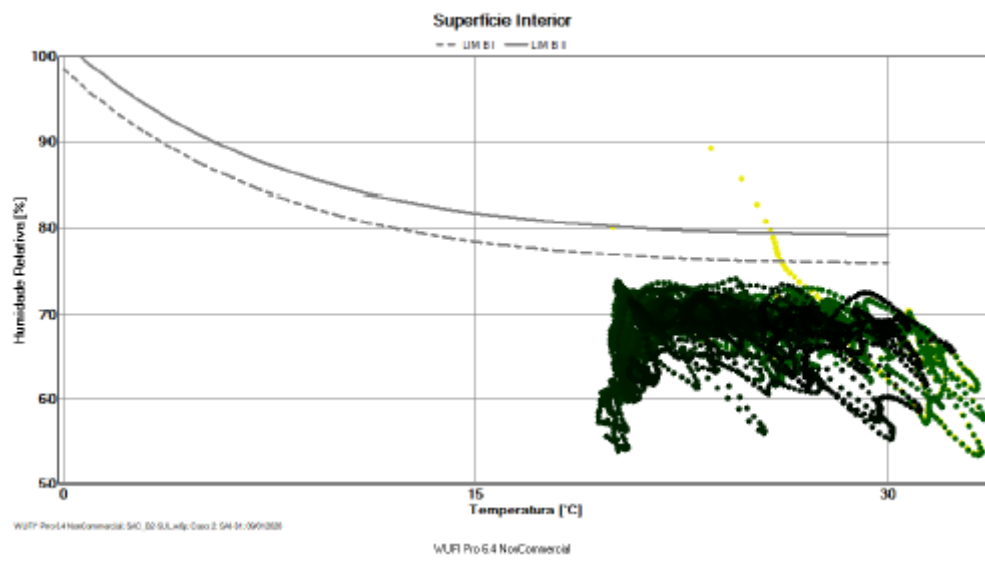
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B1 para a orientação Norte.



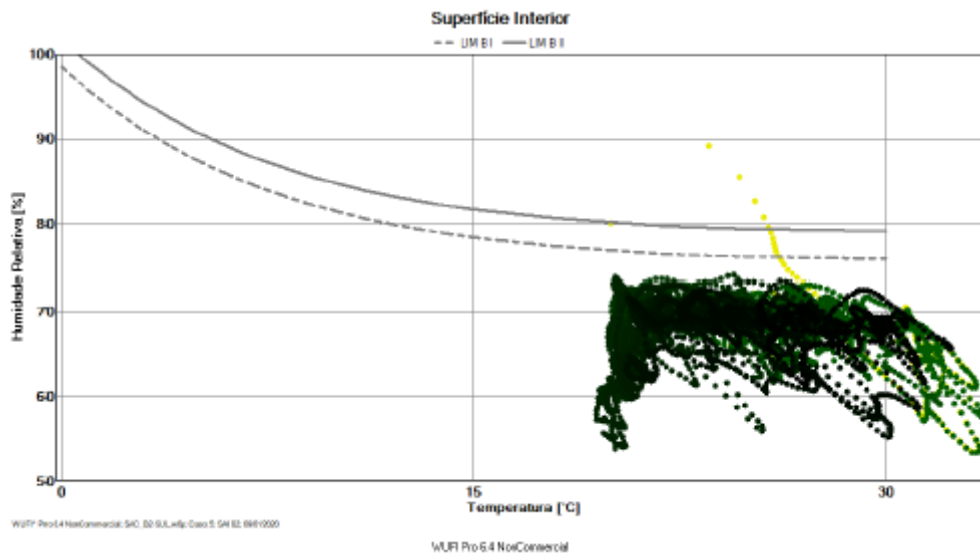
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B2 para a orientação Norte.



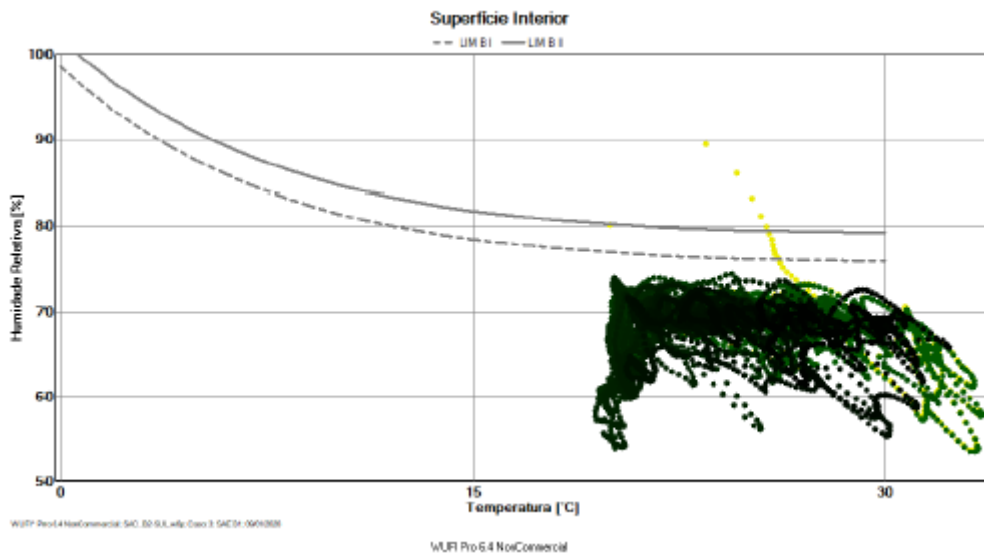
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B1 para a orientação Norte.



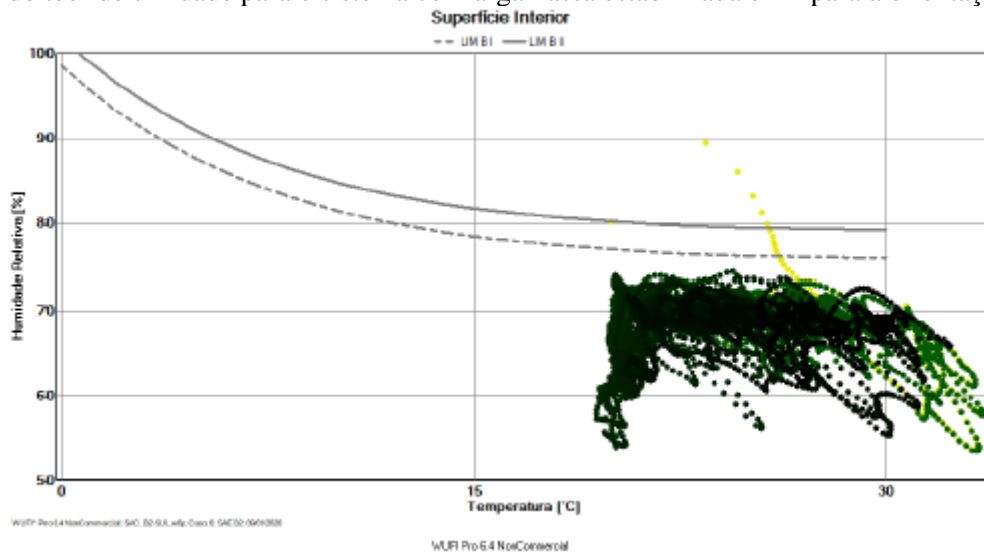
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B2 para a orientação Norte.



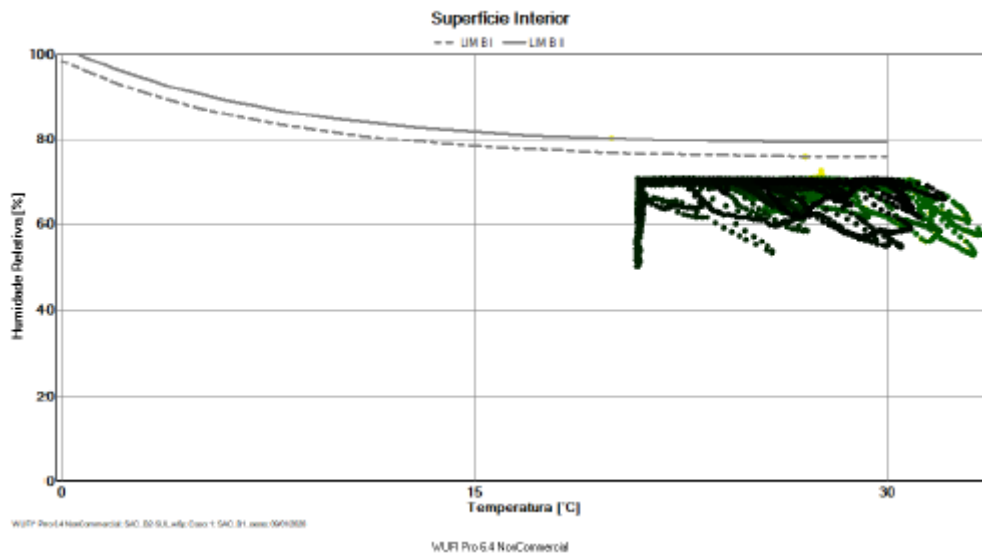
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B1 para a orientação Norte.



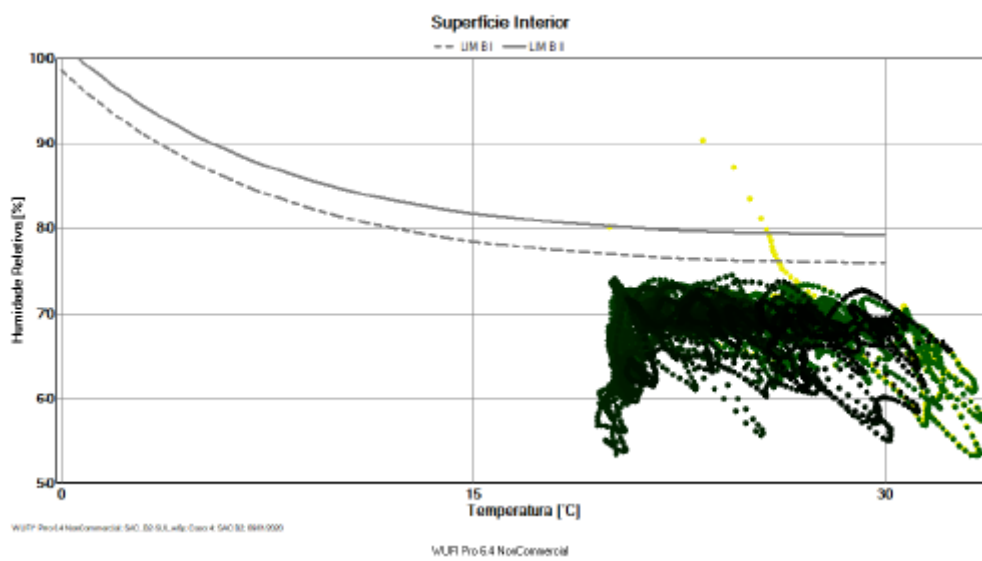
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B2 para a orientação Norte.



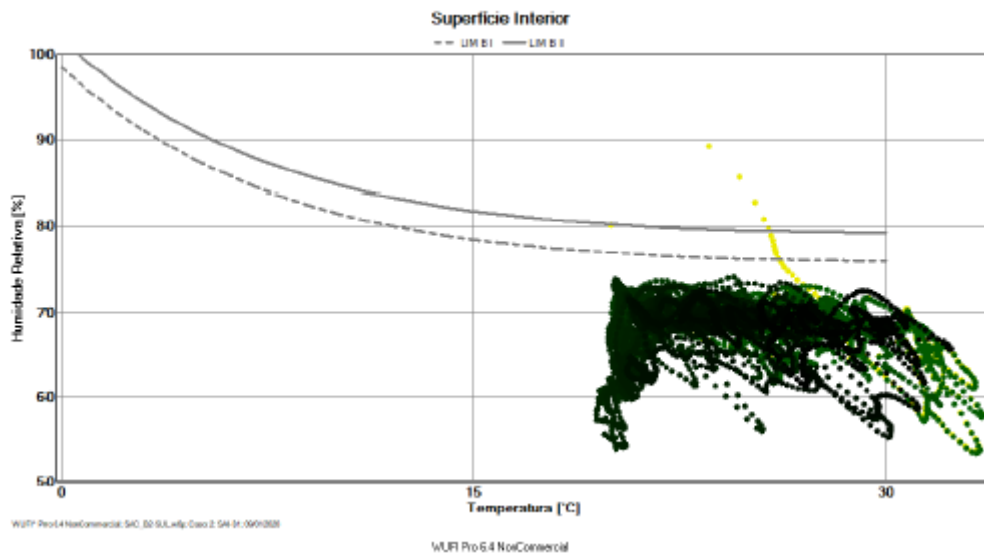
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B1 para a orientação Leste.



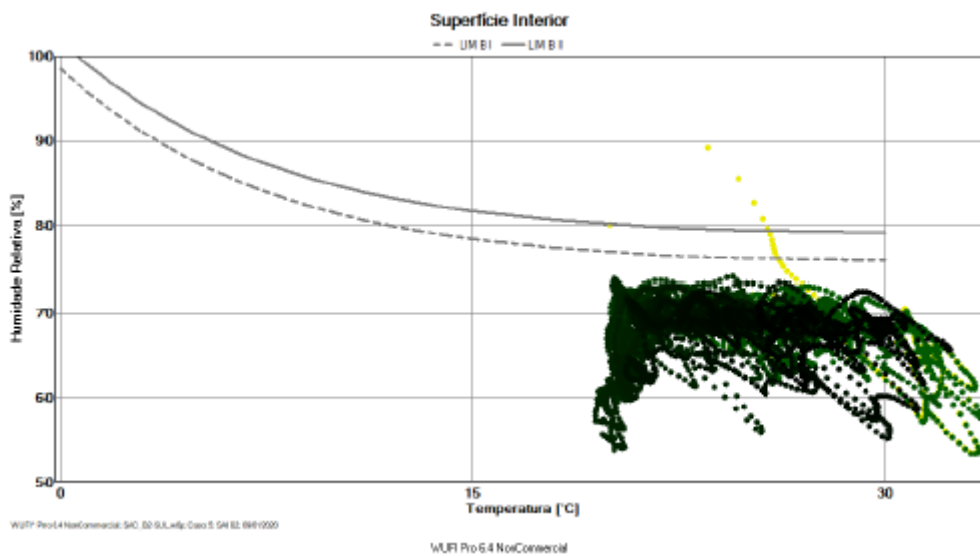
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B2 para a orientação Leste.



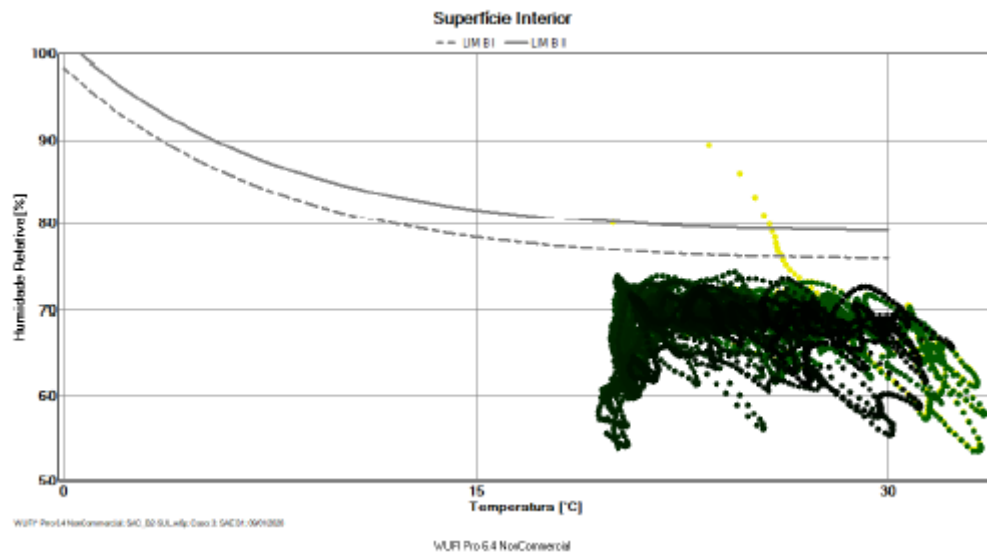
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B1 para a orientação Leste.



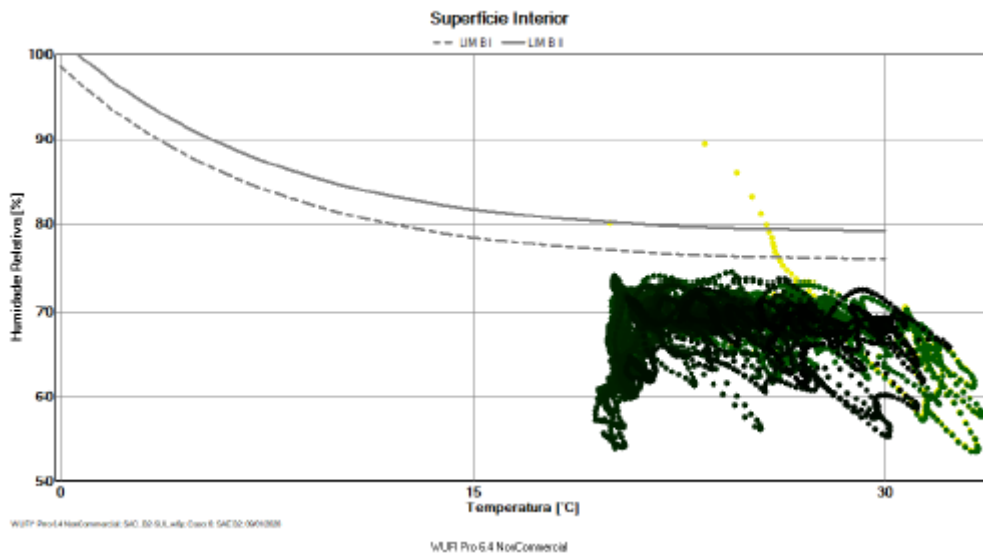
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B2 para a orientação Leste.



Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B1 para a orientação Leste.

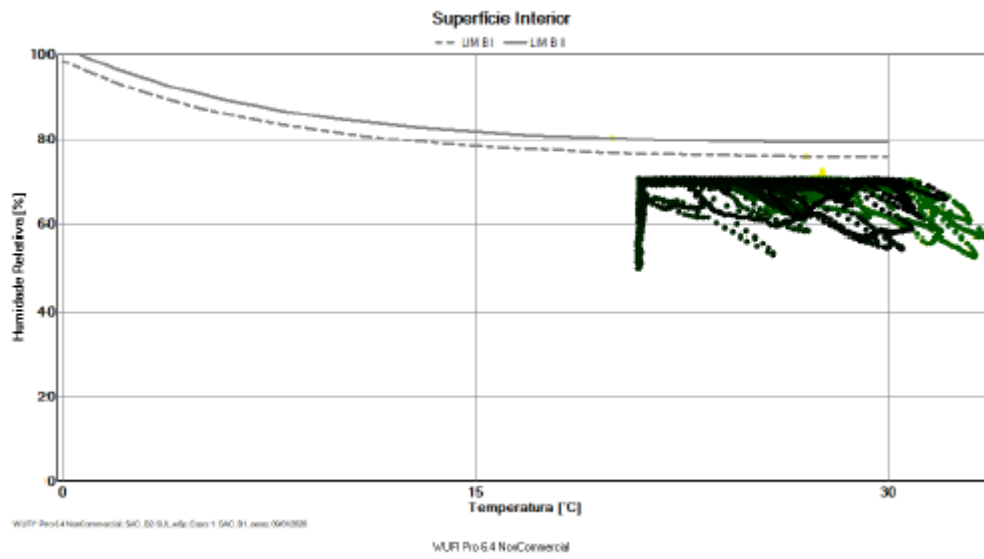


Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B2 para a orientação Leste.

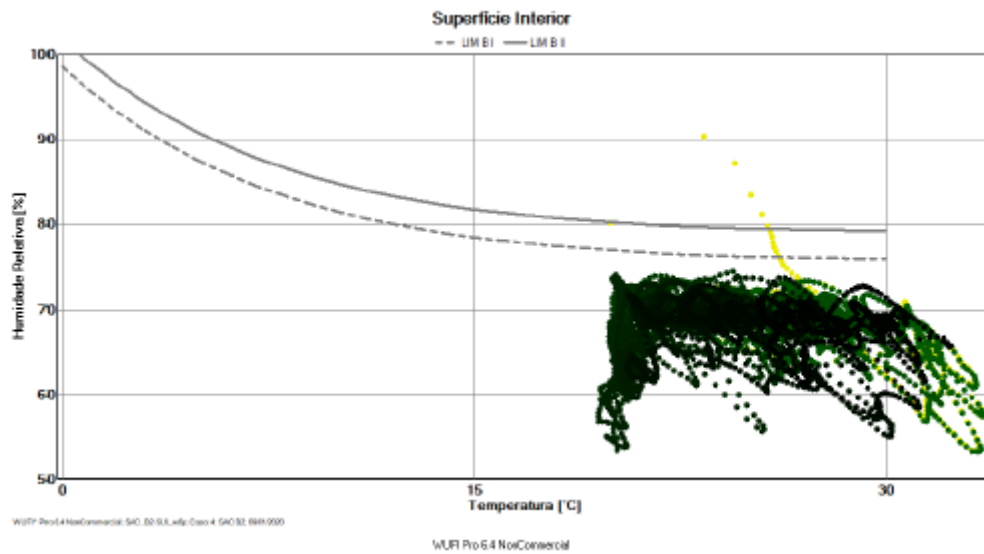




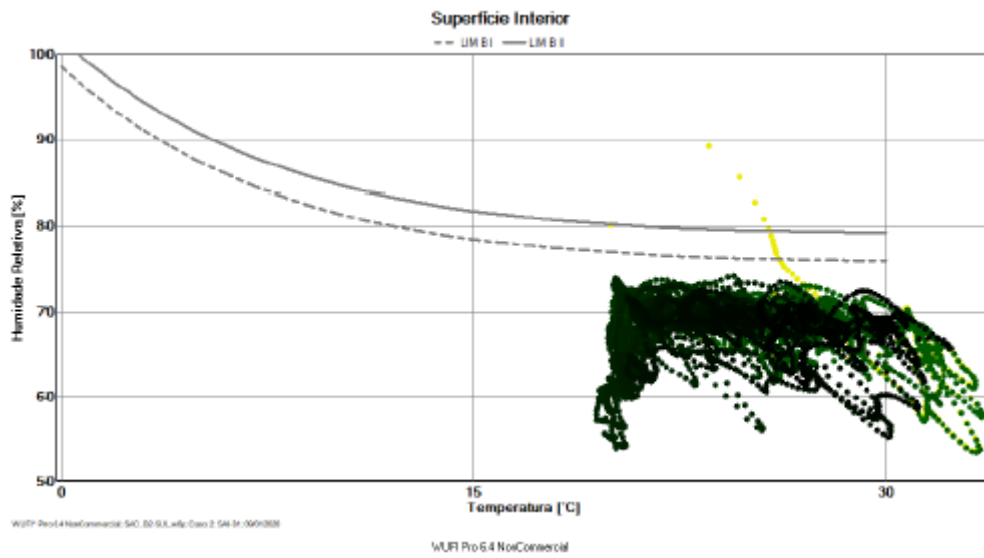
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B1 para a orientação Oeste.



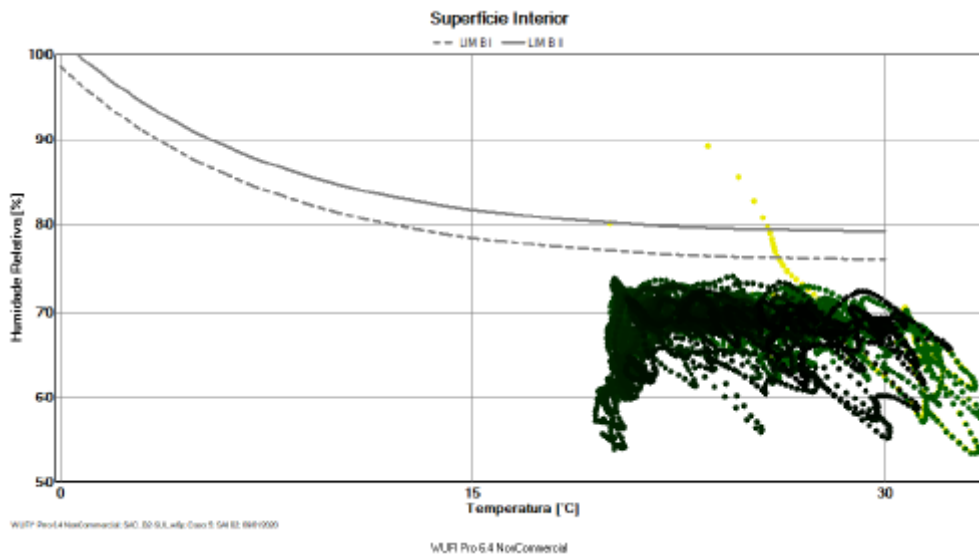
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa convencional e B2 para a orientação Oeste.



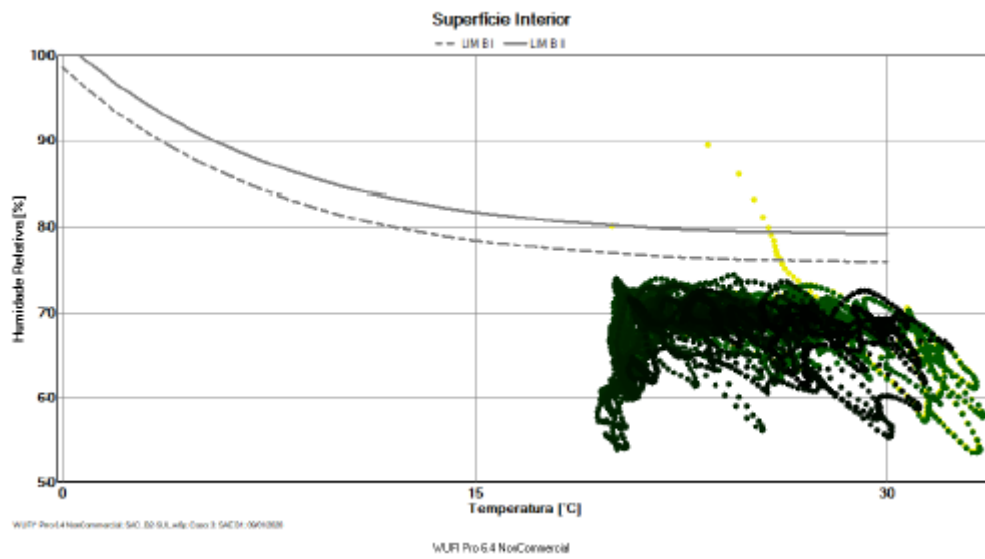
Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B1 para a orientação Oeste.



Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa industrializada e B2 para a orientação Oeste.



Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B1 para a orientação Oeste.



Perfil do teor de umidade para o sistema com argamassa estabilizada e B2 para a orientação Oeste.

