

Nº 179697

Simulação de higrotérmica

Alexandre Cordeiro dos Santos

*Trabalho apresentada no
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE
TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS,
15., 2025, Porto Alegre. 14 p.*

A série “Comunicação Técnica” compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública. **PROIBIDO REPRODUÇÃO**



XV SBTA

30 anos

Simpósio Brasileiro de
Tecnologia das Argamassas



Porto Alegre/RS | Palestra
Brasil | 13.06.2025

Simulação Higrotérmica

Alexandre C. Santos

Eng. Civil Me Pesquisador, IPT SP, alexcord@ipt.br

Organização



Promoção



Objetivo desta Palestra

Mostrar, de forma prática, como a simulação higrotérmica pode auxiliar:

- Escolha do **revestimento das fachadas**
- Prevenindo patologias causadas pela umidade
- Especialmente por **chuva dirigida pelo vento**

Apresentar um estudo de caso com a seguinte abordagem:

- Análise do **desempenho higrotérmico** de **revestimentos** em dois **climas** contrastantes: **Petrolina (PE)** e **São Paulo (SP)**
- Avaliação do **teor de umidade** nas **paredes externas**, correlacionando os parâmetros: **coeficiente de absorção capilar (w)** e **resistência à difusão de vapor de água (μ e Sd)**.



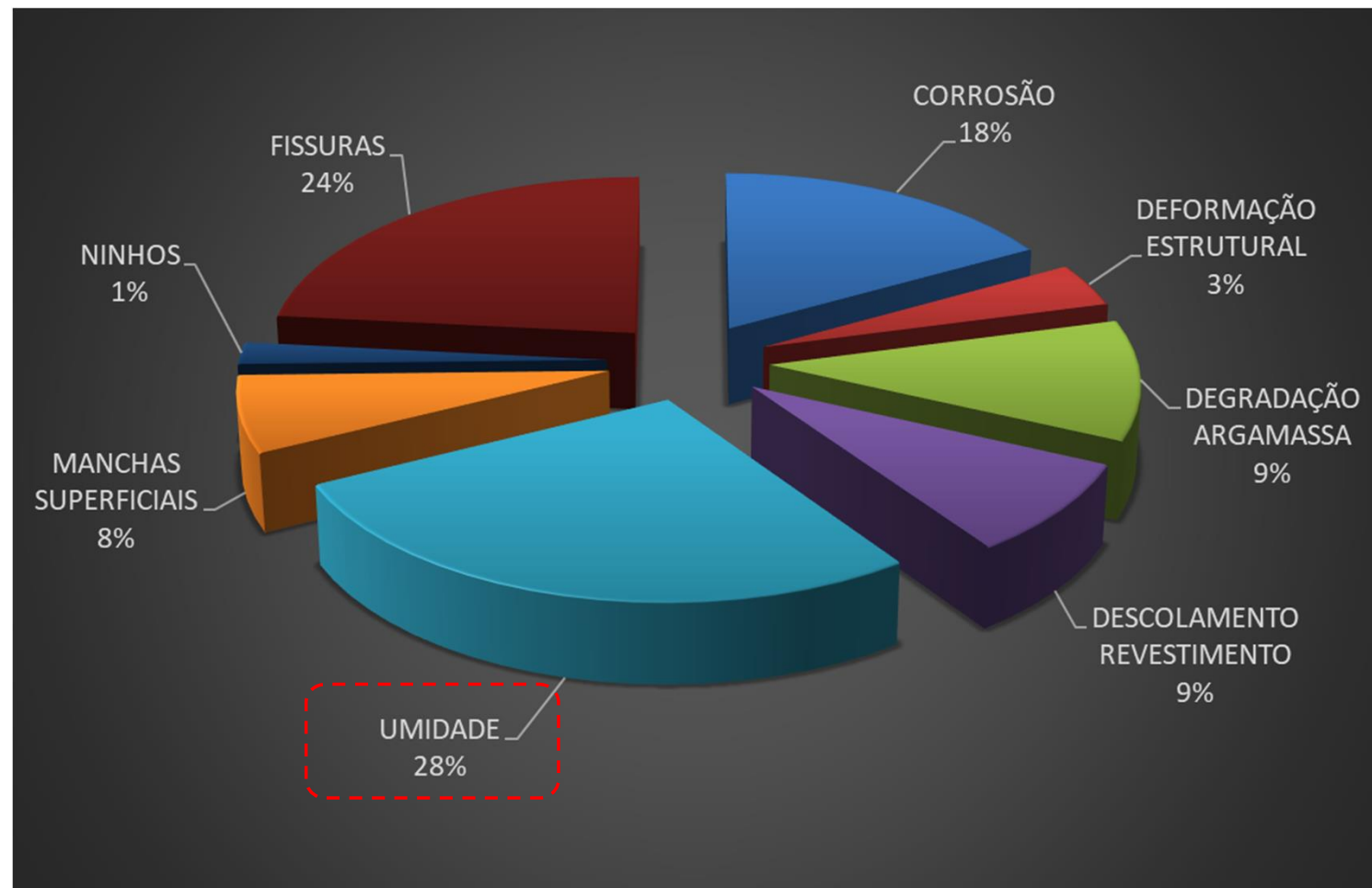
“Planeta Água” e a Dualidade da Umidade



Fonte: NASA, 2025

A Umidade Lidera o *Ranking* de Patologias

*Como prever
e mitigar
esses danos?*



Distribuição relativa da incidência de manifestações patológicas em edificações. Fonte: Sahade, R. (n = 80, 2014)

Consequências da Umidade Sem Controle

- ❖ Degradação dos materiais
- ❖ Desenvolvimento de fungos
- ❖ Salubridade dos ambientes



A Umidade: Aliada ou Vilã?



Fonte: Adaptado de Instituto Nex -
<https://conexaoplaneta.com.br>



Fonte: Autor, 2025

O Desafio do Revestimento Argamassado Externo

Nas fachadas das edificações brasileiras:



- ❖ Revestimento argamassado com tinta ou textura acrílica

- ❖ São **porosos**

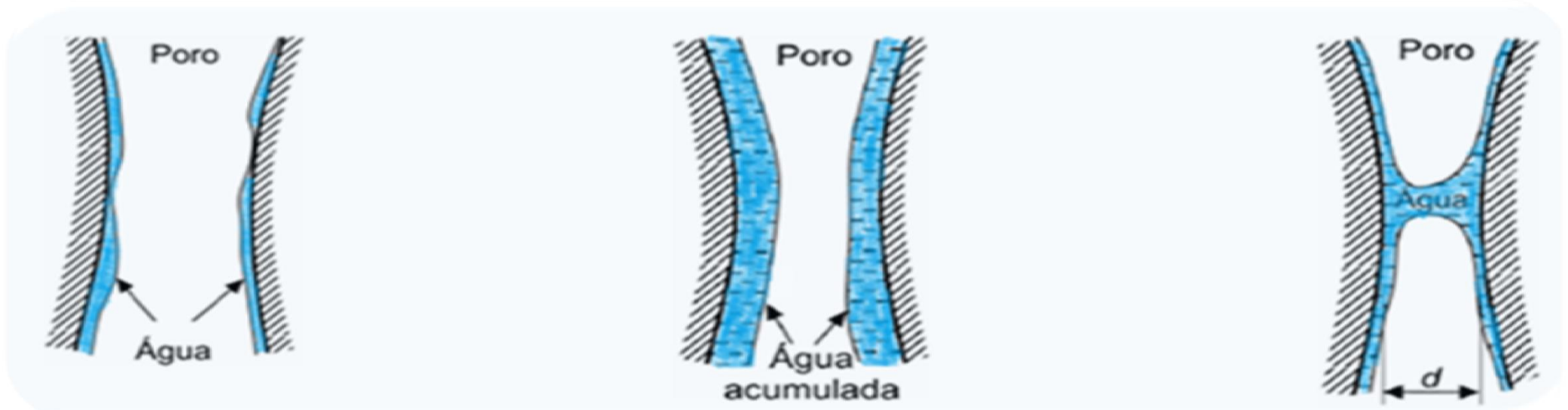
Aspectos essenciais:

- ❖ Devem ser estanques à água, mas permeáveis ao vapor

A Transferência de Umidade em um Meio Poroso

❖ Difusão de vapor (μ ou Sd)

❖ Absorção capilar (W)



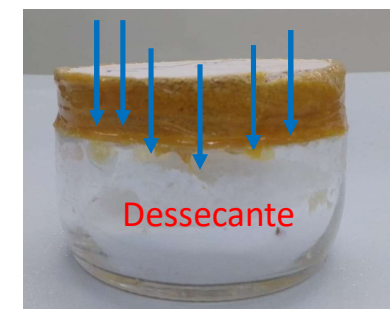
Etapas da fixação das moléculas de vapor de água nos poros de materiais.
Fonte: adaptado de Couasnet (1989, apud Ramos 2007).

Fator de Resistência à Difusão do Vapor de Água (μ)

- μ : indica quantas vezes é mais difícil o vapor d'água passar por um material, do que passar pelo ar parado.
- Por definição física:
- $\mu = \delta_{\text{ar}} / \delta_{\text{mat}}$ (adimensional)
- Onde:
 - δ_{ar} = permeabilidade ao vapor do ar $\cong 2 \times 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})$ a 23°C
 - δ_{mat} = permeabilidade ao vapor do material
- Como se obtém:
- ABNT NBR 13281-1 / EN ISO 12572



Fluxo do vapor de água



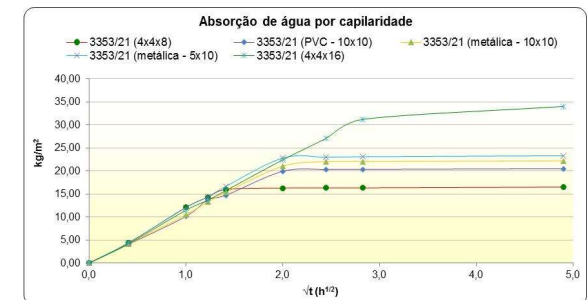
Camada de Ar de Difusão Equivalente (Sd)

- **Sd**: indica a **resistência ao vapor de água** de uma camada de **material**, convertida em **espessura de uma camada de ar parado** com resistência equivalente
- **$Sd = \mu \times e$** , em “m”
- (μ = *fator de resistência* ; e = *espessura do material*)
- **Usado para:** Filmes, membranas e tintas (materiais muito finos)
- **Como se obtém:**
- **EN ISO 12572**

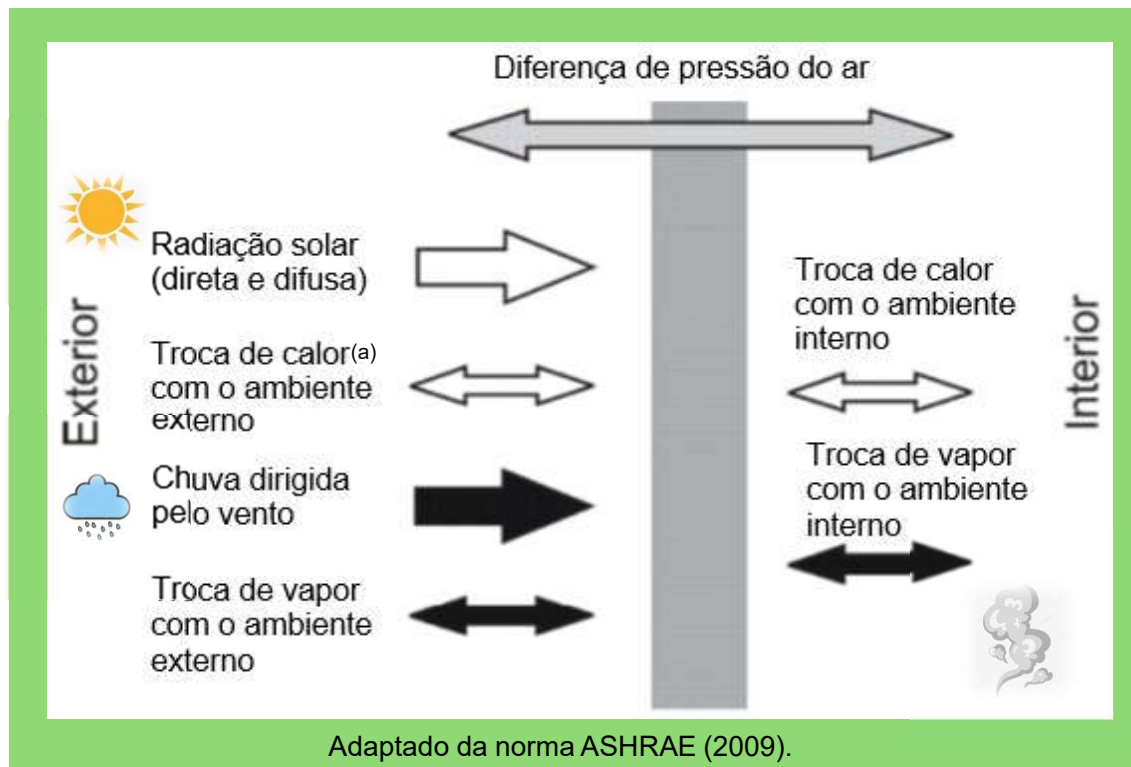


Coeficiente de Absorção de Água (W_h)

- **W:** indica a **taxa** com que um **material absorve água líquida** por **capilaridade** ao longo do tempo
- $W_h = \Delta m / (A \times \sqrt{t})$, em “kg/(m². √h)”
(Δm = massa absorvida; A = área e $\sqrt{t}$ = raiz do tempo)
- Corpo de prova é parcialmente imerso em água e se mede o ganho de massa ao longo do tempo.
- **Como se obtém:**
- **ABNT NBR 13281-1 / EN ISO 15148**

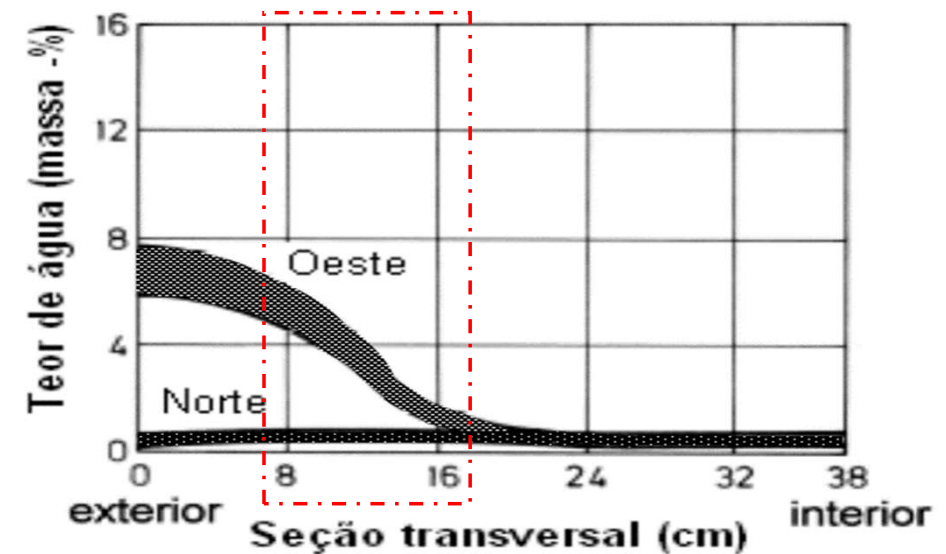


Influência das Condições Ambientais nas Envoltórias



Legenda: (a): convectiva e por radiação de onda longa

Chuva dirigida (como fonte externa de umidade)

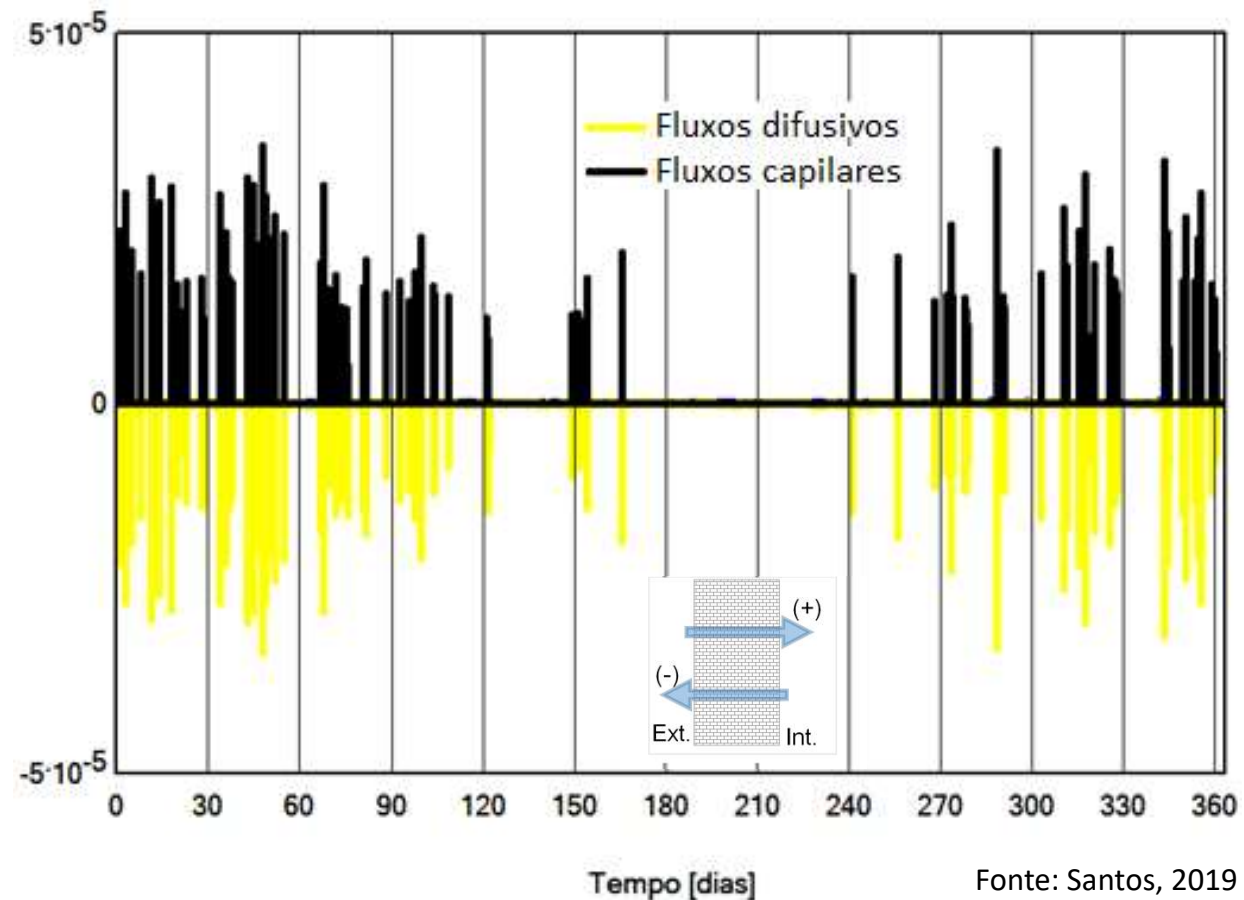


Fonte: Adaptado de Shüle (1966 apud Künzelt, H.M; Künzelt,H; Holm, 2004).

Importância do Balanço Higrotérmico na Fachada

Equilíbrio Higrotérmico (controle dos fluxos de umidade):

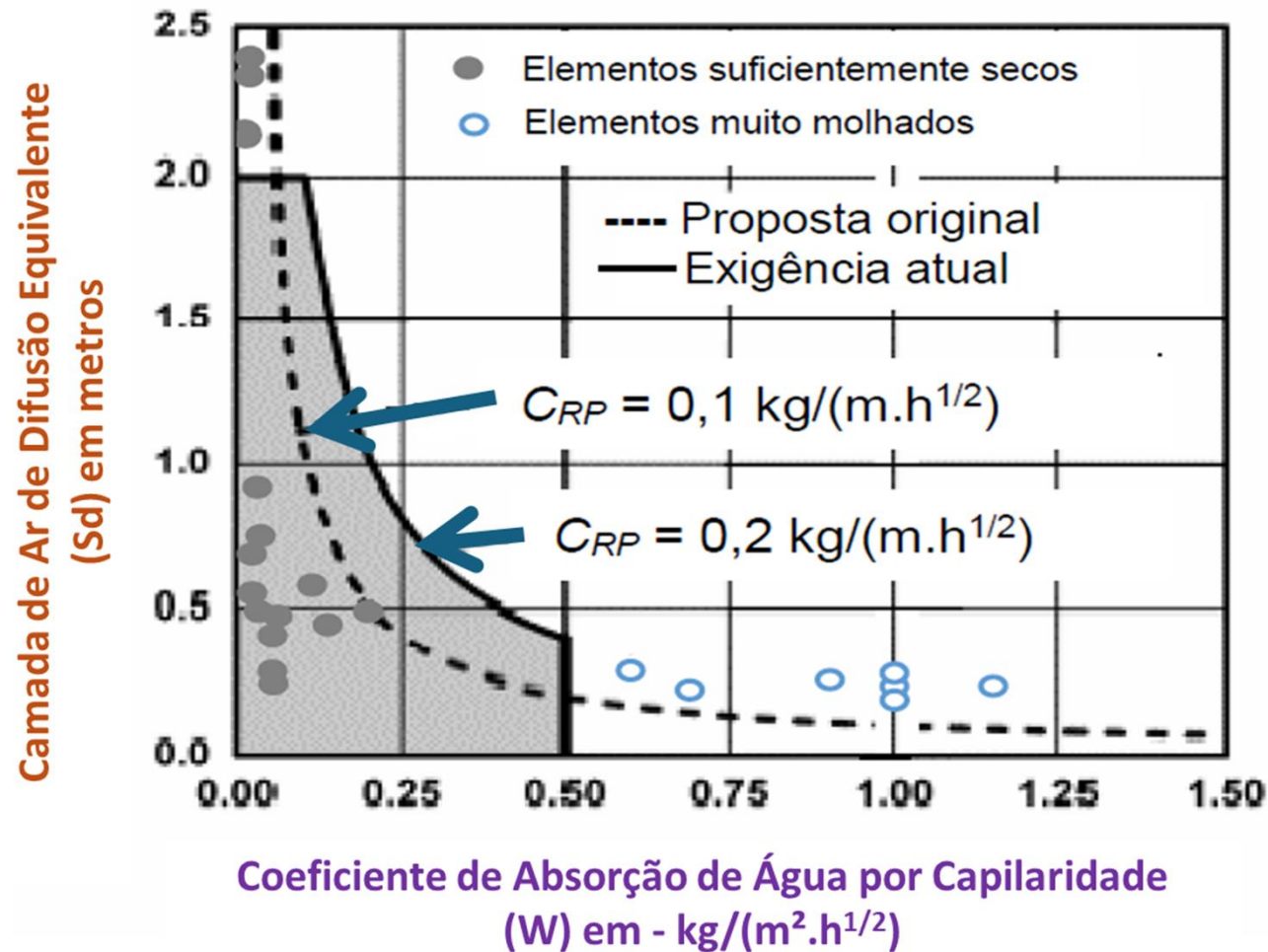
- Absorção capilar (W)
- Difusão de vapor (Sd)



Fonte: Santos, 2019



Parâmetros do Balanço Higrotérmico na Fachada

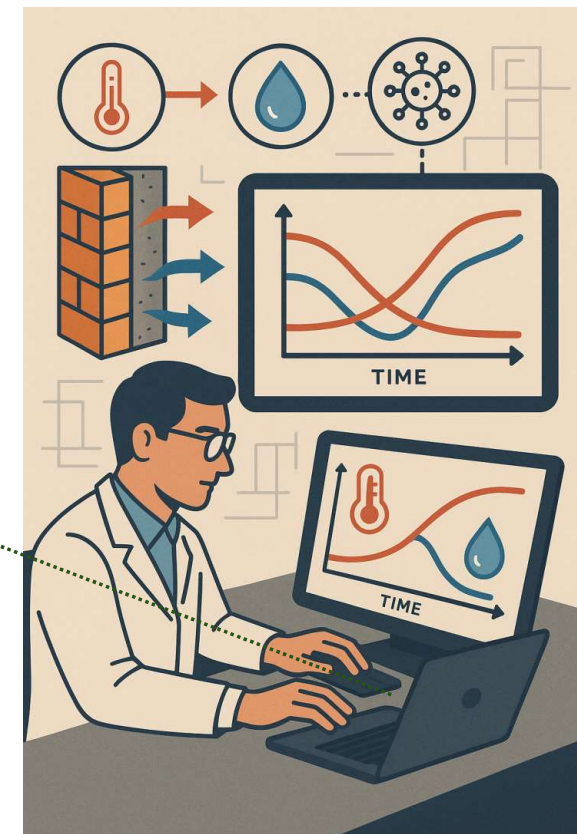
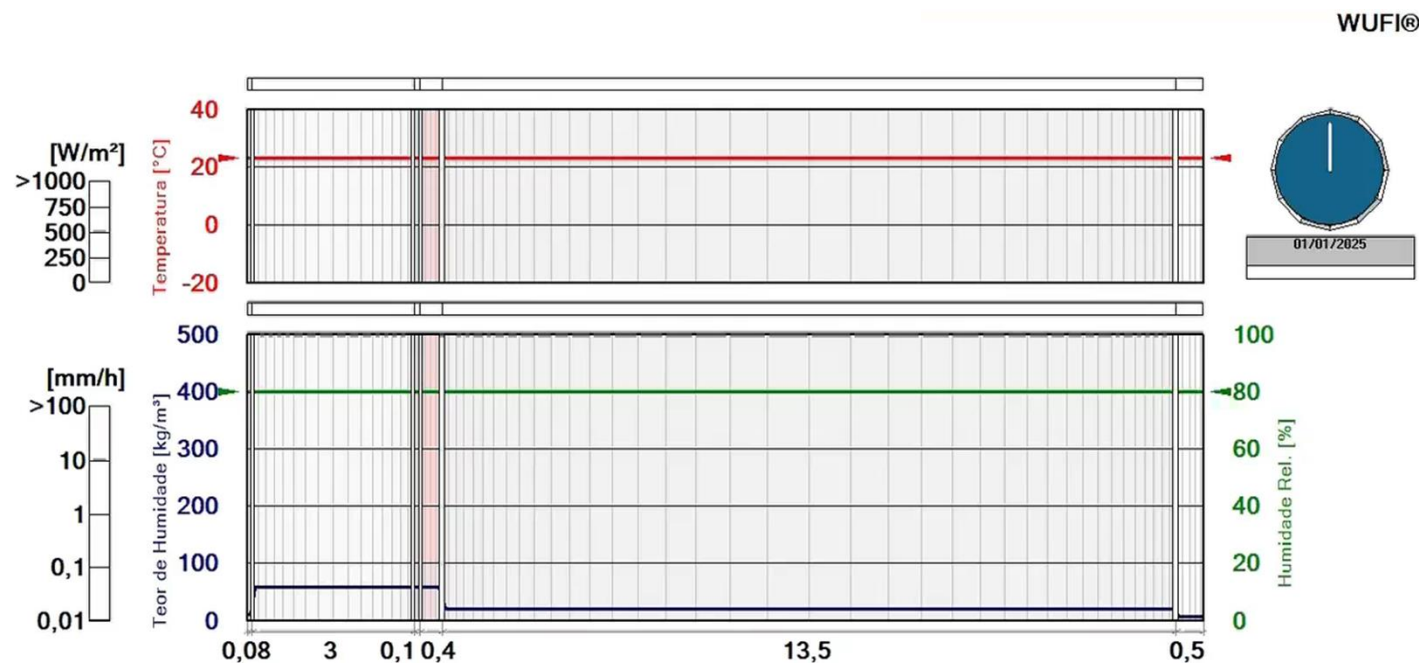


Fonte: Adaptado de *Rain Protection of Stucco Facades* – Künzeli et al. (2004) – Fraunhofer IBP, Alemanha

Fachadas: Itens-Chave no Controle da Umidade



O Que é Simulação Higrotérmica?



Ferramenta que modela a transferência simultânea de **calor** e **umidade** em materiais porosos ao longo do tempo

Linha do Tempo de Desenvolvimentos de Modelos

Antes de 1900

Antes de 1900, algumas observações significativas de fluxo insaturado, incluindo fluxo preferencial **fluxo (Schumacher, 1882), retenção capilar de água do solo (observada por Schumacher em 1864); efeitos dinâmicos da capilaridade nos solos (Johnson em 1878, King em 1889) e teoria do fluxo saturado de Darcy (1856)**

Teoria do fluxo insaturado
(Buckingham, 1907)

Equação de fluxo
transiente
(Richards, 1931)

Teoria do fluxo de umidade
não isotérmico nas fases
líquida e de vapor (Philip e
De Vries, 1957)

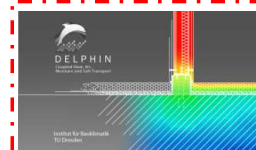
Sistema geral de equações
diferenciais parciais
para transferência de calor
e massa em um corpo poroso
capilar (Luikov, 1966-1974)

Modelo de transferência de
umidade em níveis macroscópicos e
microscópicos baseado no
comportamento do volume médio
local (Whitaker, 1977)

O modelo de fluxo não
isotérmico de Philip e de Vries
foi adaptado à abordagem
mais geral baseada em pressão
(ou carga matricial).
(Marios Sophocleous, 1979)

Modelo de Rode
implementado no
software MATCH e
considerando a histerese de
sorção do conteúdo
de água.

WUFI®
Nova forma de modelo de
transferência acoplada
de calor e umidade com
umidade como potencial
de condução. (Kunzel, 1995)



O modelo de Grunewald
baseado na formulação de pressão
capilar foi aplicado no software
DELPHIN versão 5, posteriormente
desenvolvido por Andreas Nicolai
durante sua tese de doutorado.

Recentemente, novos
modelos foram desenvolvidos
para considerar a transferência de ar,
o vento que impulsiona a chuva,
o efeito de histerese, como o modelo
HAM-Lea e o modelo HAM-fit,
o modelo Fang e
ainda desenvolvimentos.

Década de 1990

Fonte: Adaptado de Jalili, Ouahbi, Eid, Taibi e Hamrouni (2024)



Processo da Simulação Higrotérmica



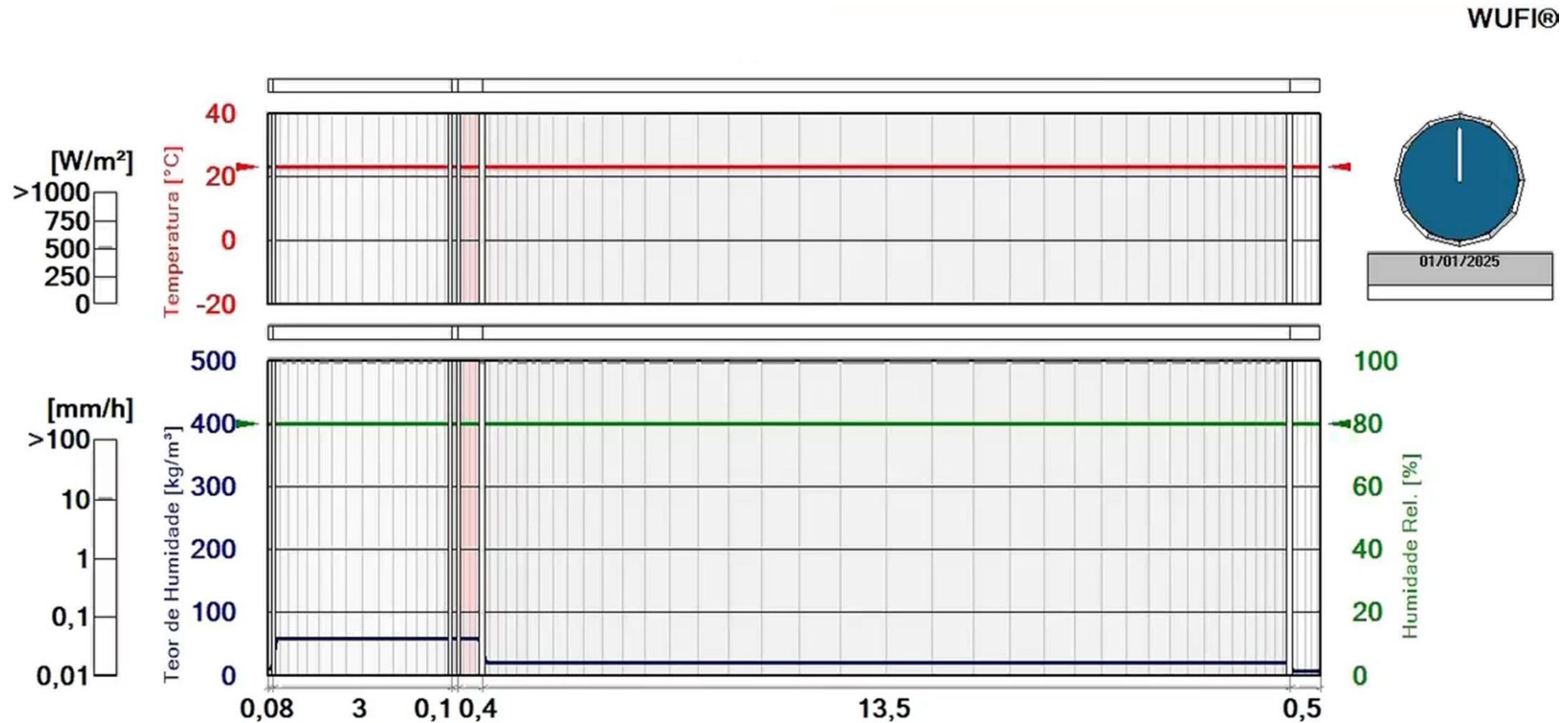
Fonte: Adaptado da norma BS EN ISO 15206

Aplicações Práticas da Simulação Higrotérmica

- Avaliar riscos como acúmulo de umidade, condensação e patologias
- **Escolha de materiais, componentes e sistemas mais adequados**
- Apoio à manutenção preventiva (antes que vire patologia)
- Redução de custos com patologias



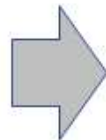
Exemplo Prático do Uso da Simulação Higrotérmica



Estudo de Caso: Decisão no Projeto de Fachada



Um projetista de fachadas do Nordeste, após assistir à palestra no XV SBTA, decidiu aplicar a simulação higrotérmica num projeto de fachada de um edifício de 10 andares em **Petrolina (PE)**



Etapas do Processo



Escolheu uma argamassa ARV-II classificada com **W3** pela **ABNT NBR 13281-1**



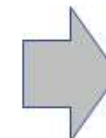
Selecionou um **revestimento sintético texturizado externo (textura) local**



Enviou os materiais para **ensaios** no IPT e obteve os dados reais de **propriedades higrotérmicas**



Realizou as simulações. **Resultado:** O sistema funcionaria bem no clima de Petrolina (PE) – **Execução autorizada**



Nova Situação: Projeto em São Paulo



Decisão técnica:
Trocar a argamassa **ARV-II (W-)** ou a **textura (Sd↓ W-)** em São Paulo (SP)?



Vamos descobrir!

Fonte: Autor, 2025

Detalhes Básicos do Edifício

Edificação:

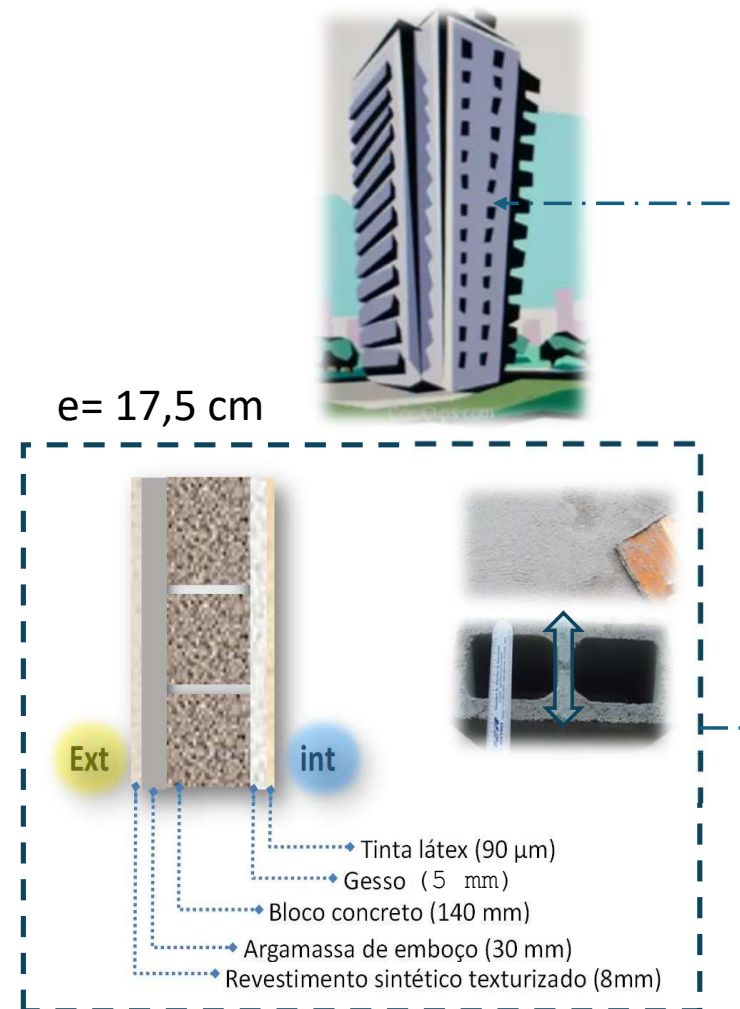
- Prédio residencial de 10 andares ($h \sim 30$ m)
- Substrato:
 - Bloco de concreto (fbk 4 MPa)

Face externa:

- Argamassa inorgânica:
- ARV-II W3 = $c / W = 6,8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ e $\mu = 17$
- Texturas acrílicas:
 - A: $c / W = 0,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ e $S_d = 0,10 \text{ m}$ ($\mu = 13$)
 - B: $c / W = 0,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ e $S_d = 0,24 \text{ m}$ ($\mu = 30$)

Face interna:

- Gesso + pintura acrílica



Propriedades Higrotérmicas dos Materiais

- ❖ Densidade de massa aparente no estado endurecido
- ❖ Porosidade

- ❖ Coeficiente de absorção de água líquida (W)

- ❖ Fator de resistência à difusão do vapor de água (μ)

- ❖ Curvas higroscópicas

- ❖ Teor de umidade de referência

- ❖ Umidade de saturação livre

- ❖ Calor específico

- ❖ Condutividade térmica

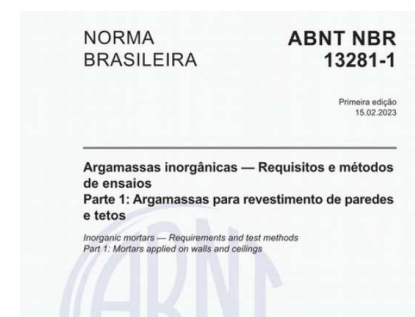


Tabela 11 – Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Classe	Coeficiente de absorção de água por capilaridade (W_h) ^a kg/(m ² ·h ^{0,5})	Método de ensaio
W1	$W_h \geq 8,5$	EN ISO 15148 e Anexo A
W2	$7,0 \leq W_h < 8,5$	
W3	$5,5 \leq W_h < 7,0$	
W4	$4,0 \leq W_h < 5,5$	
W5	$2,5 \leq W_h < 4,0$	
W6	$1,0 \leq W_h < 2,5$	
W7	$W_h < 1,0$	

^a O coeficiente de absorção de água (W) é determinado para um tempo específico de ensaio, em horas (h), conforme estabelecido na EN ISO 15148.

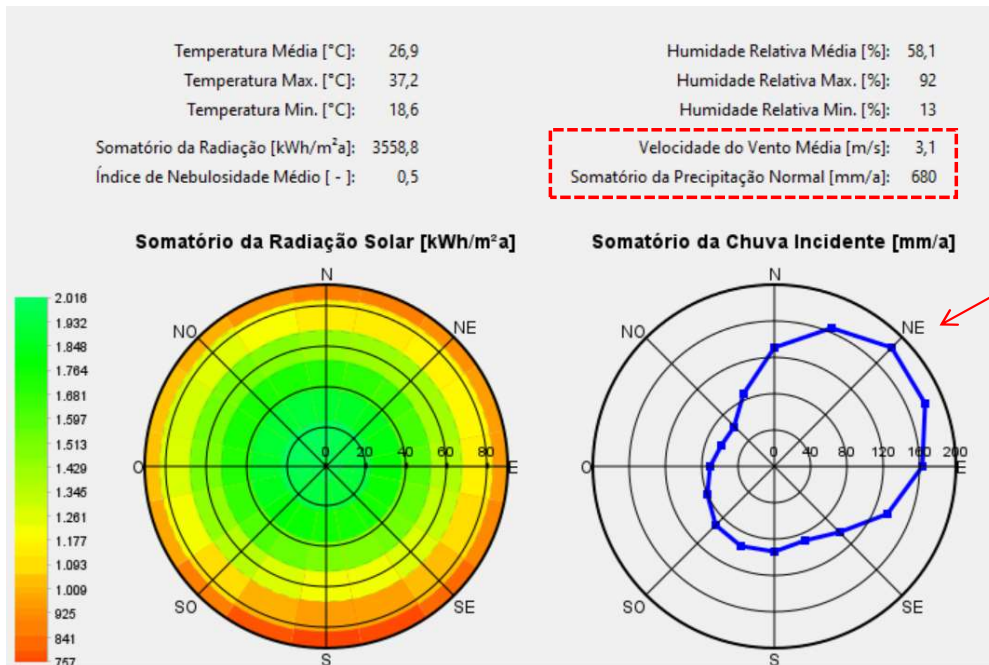
Tabela 12 – Fator de resistência à difusão de vapor de água (μ)

Classe	Fator de resistência à difusão μ	Método de ensaio
DV0	$\mu > 30$	EN ISO 12572 e Anexo B
DV1	$20 < \mu \leq 30$	
DV2	$\mu \leq 20$	

Clima e Orientação da Fachada

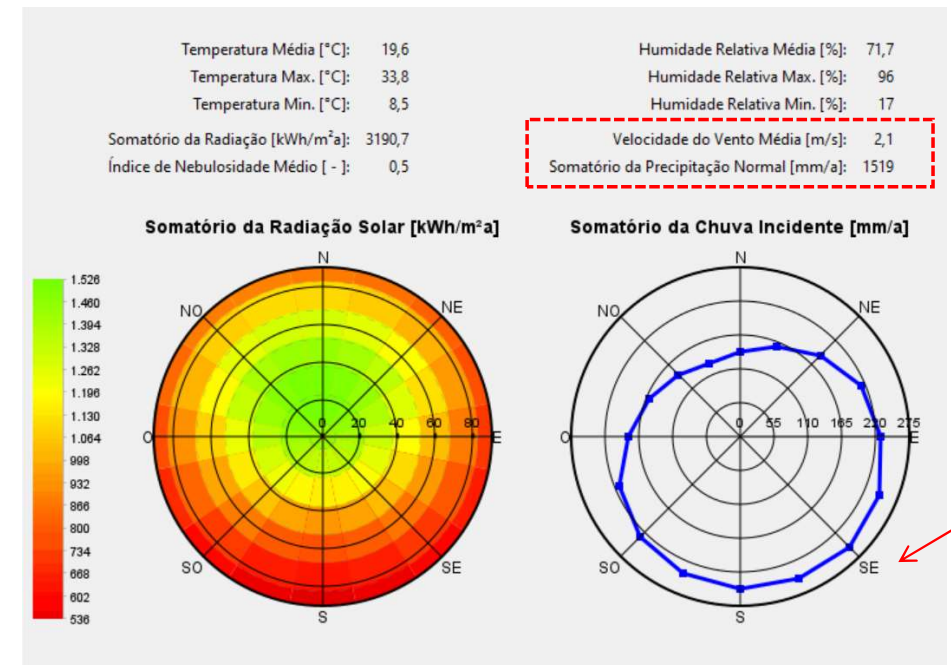
Petrolina (PE):

- Clima semiárido (muito sol, pouca chuva, alta temperatura)

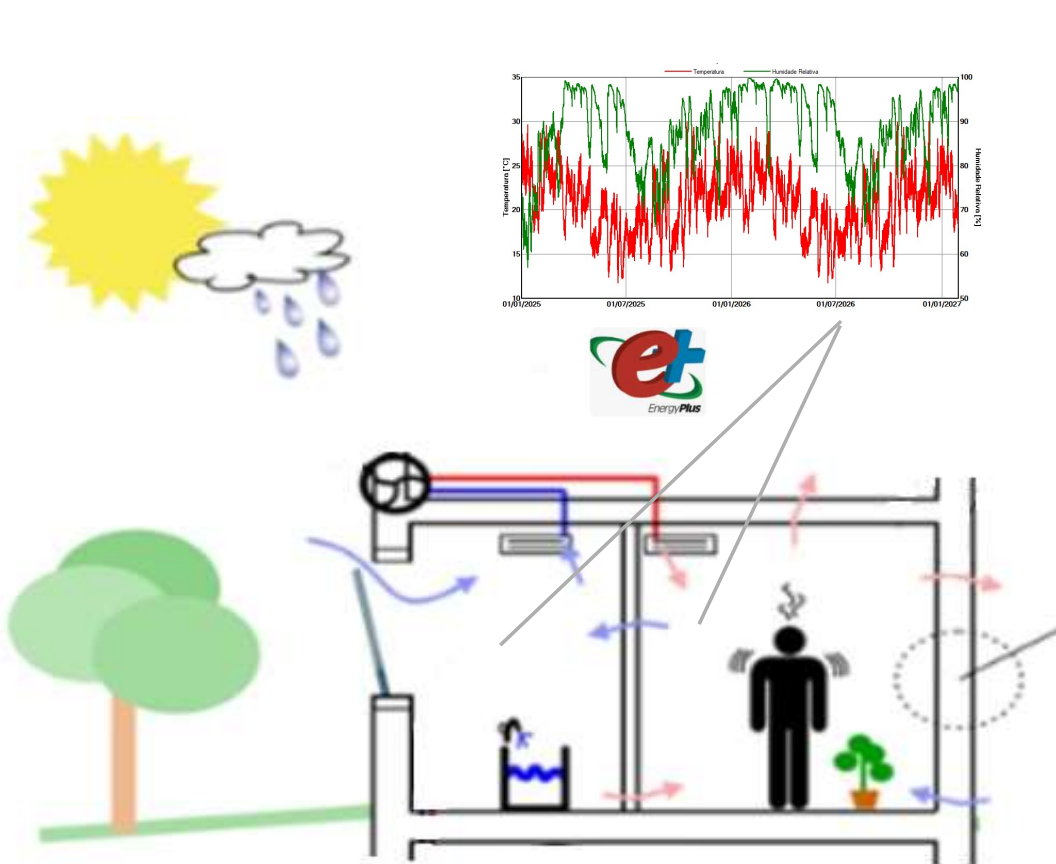


São Paulo (SP):

- Clima úmido-subtropical (muita umidade, chuvas bem distribuídas)



Detalhes Básicos da Modelagem nas Simulações



Fonte: Adaptado de WUFI, 2025

Critério de aceitação

Teor de umidade total da parede e no emboço: $\leq 5\%$ em massa

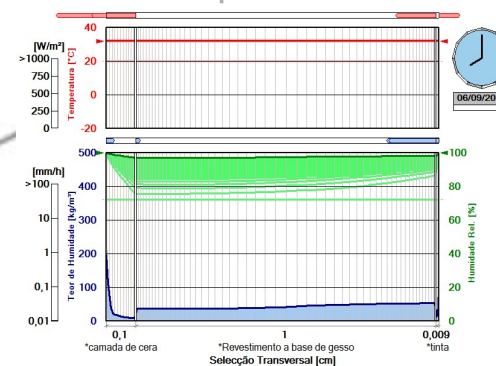
ipt
INSTITUTO DE
PESQUISAS
TECNOLÓGICAS
HABITAÇÃO E EDIFICAÇÕES



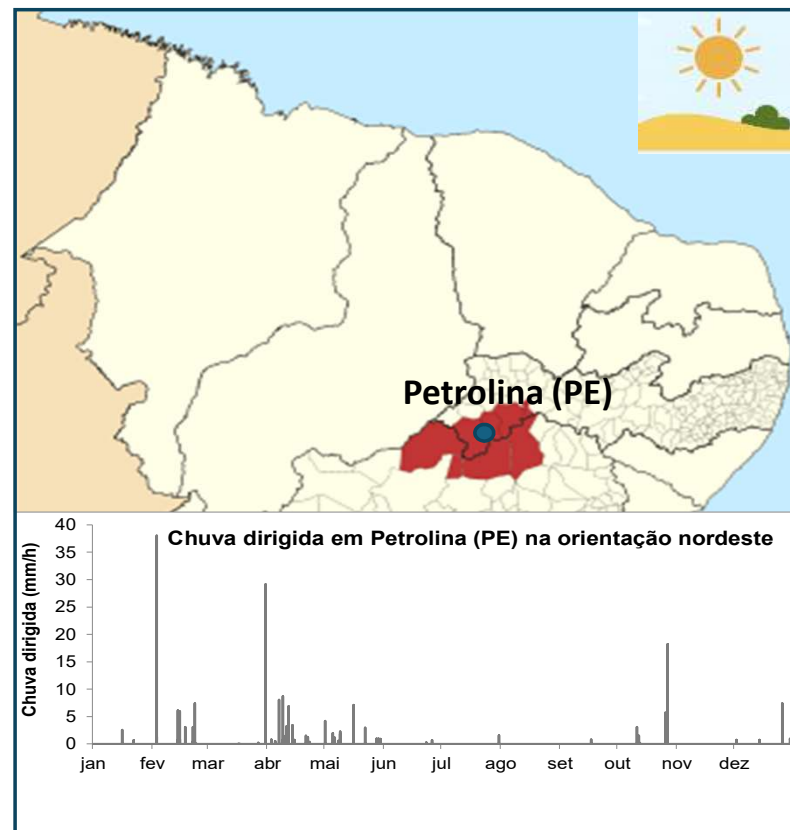
$\leq 5\%$



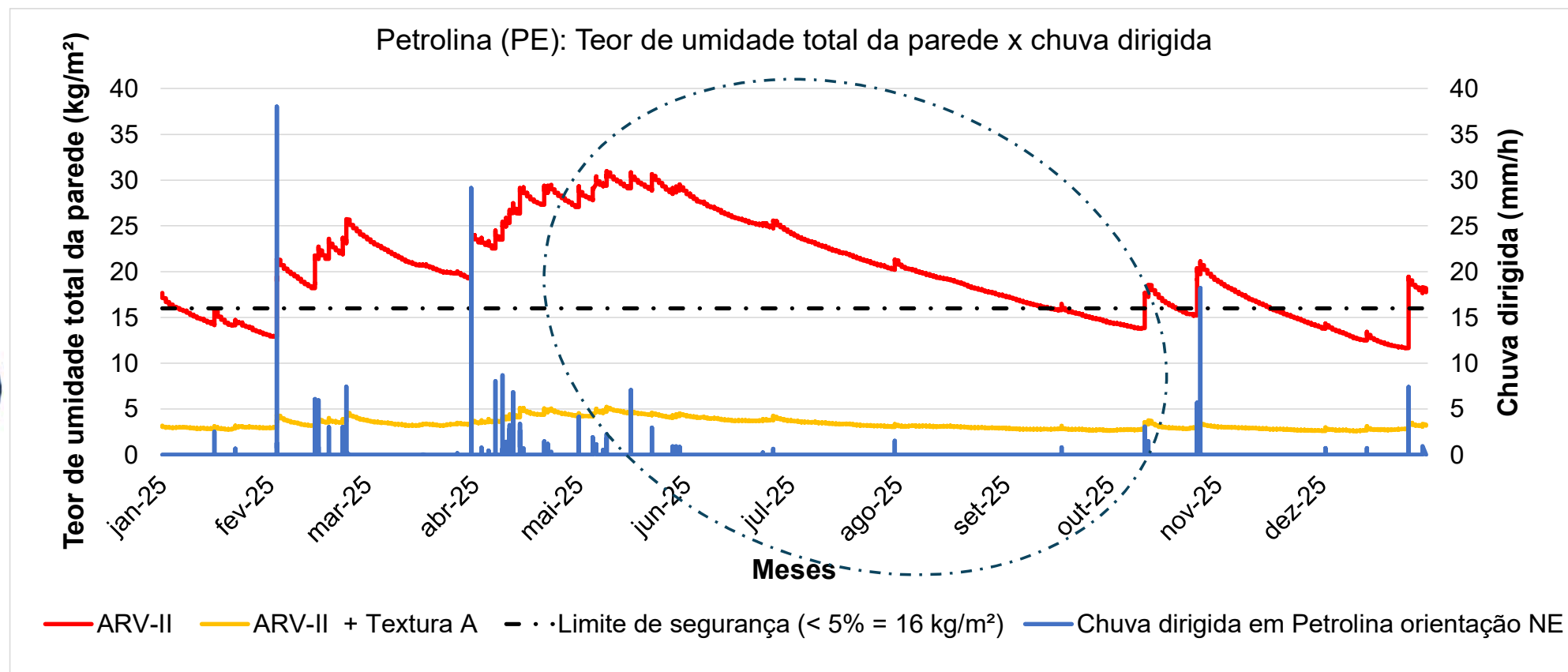
$> 5\%$



Resultados das Simulações em Petrolina (PE)

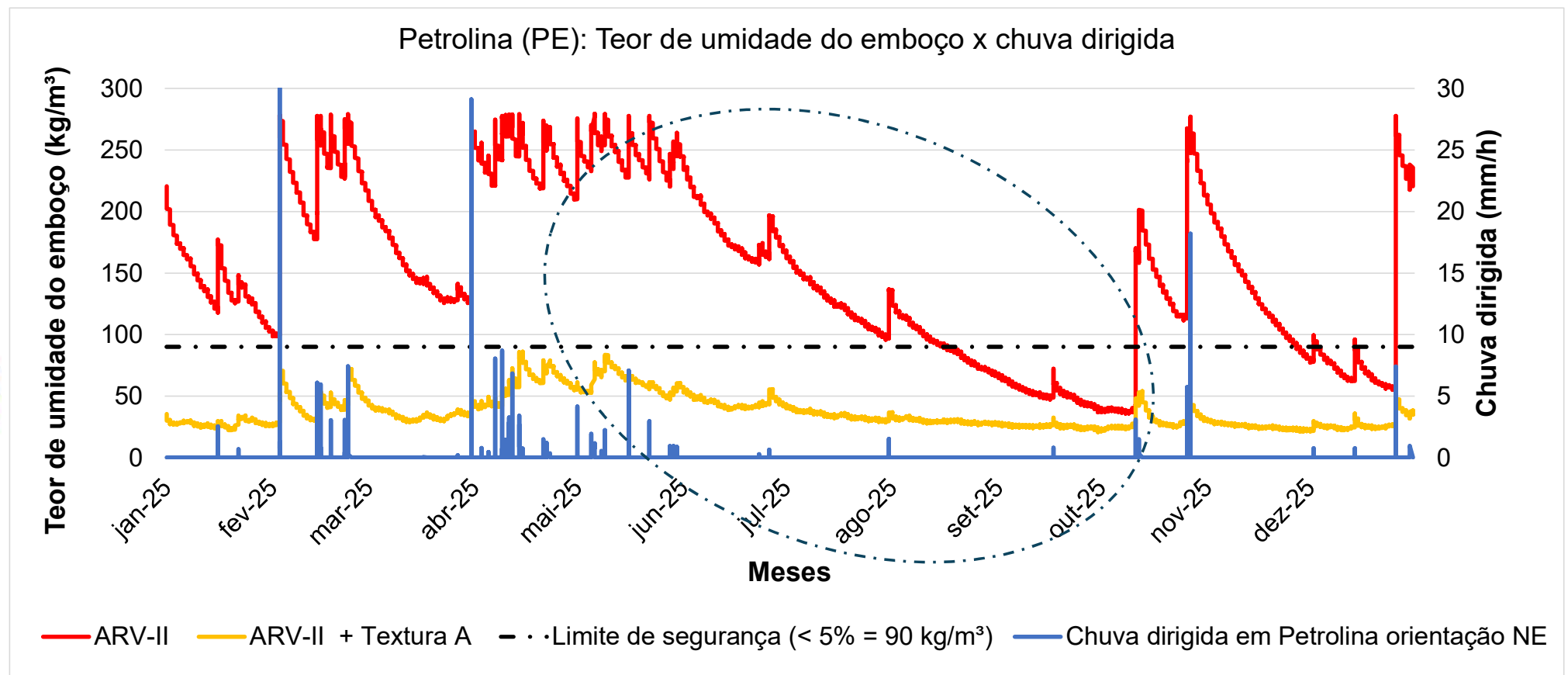


Análise do teor de umidade da parede em Petrolina



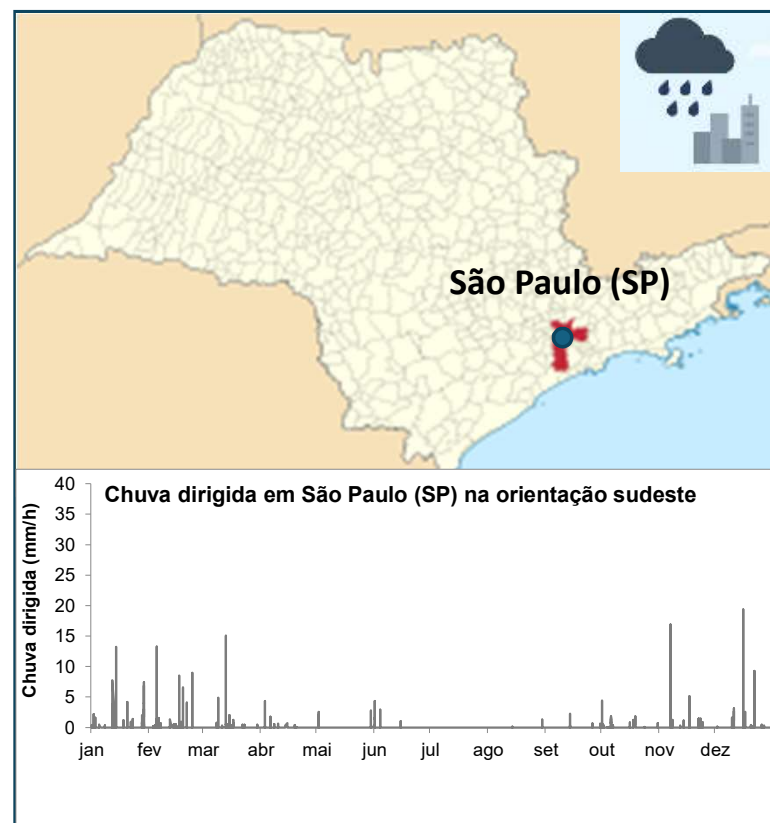
Umidade total da parede (kg/m^2) – representa o acúmulo de água por metro quadrado de fachada, somando todas as camadas

Análise do teor de umidade do emboço em Petrolina

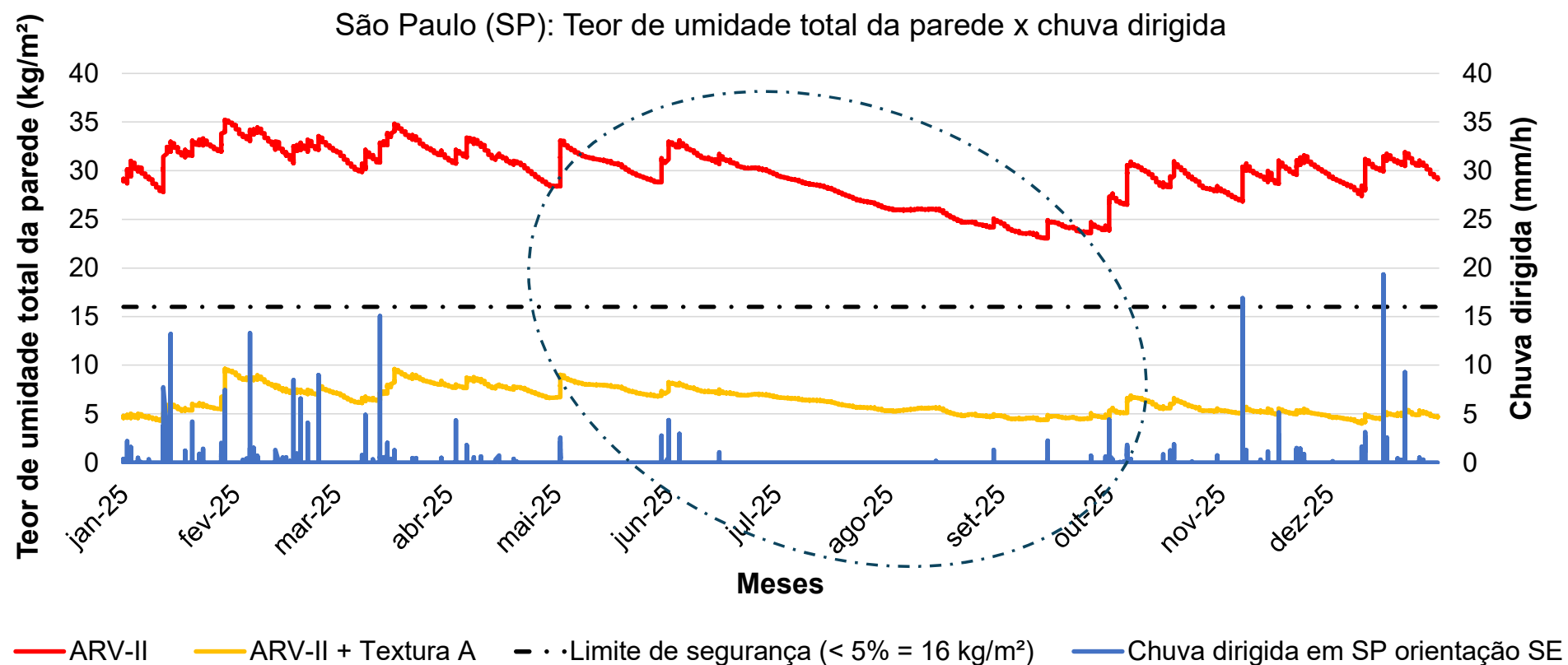


Umidade do emboço (kg/m³) – corresponde à quantidade de água por metro cúbico de argamassa

Resultados das Simulações em São Paulo (SP)

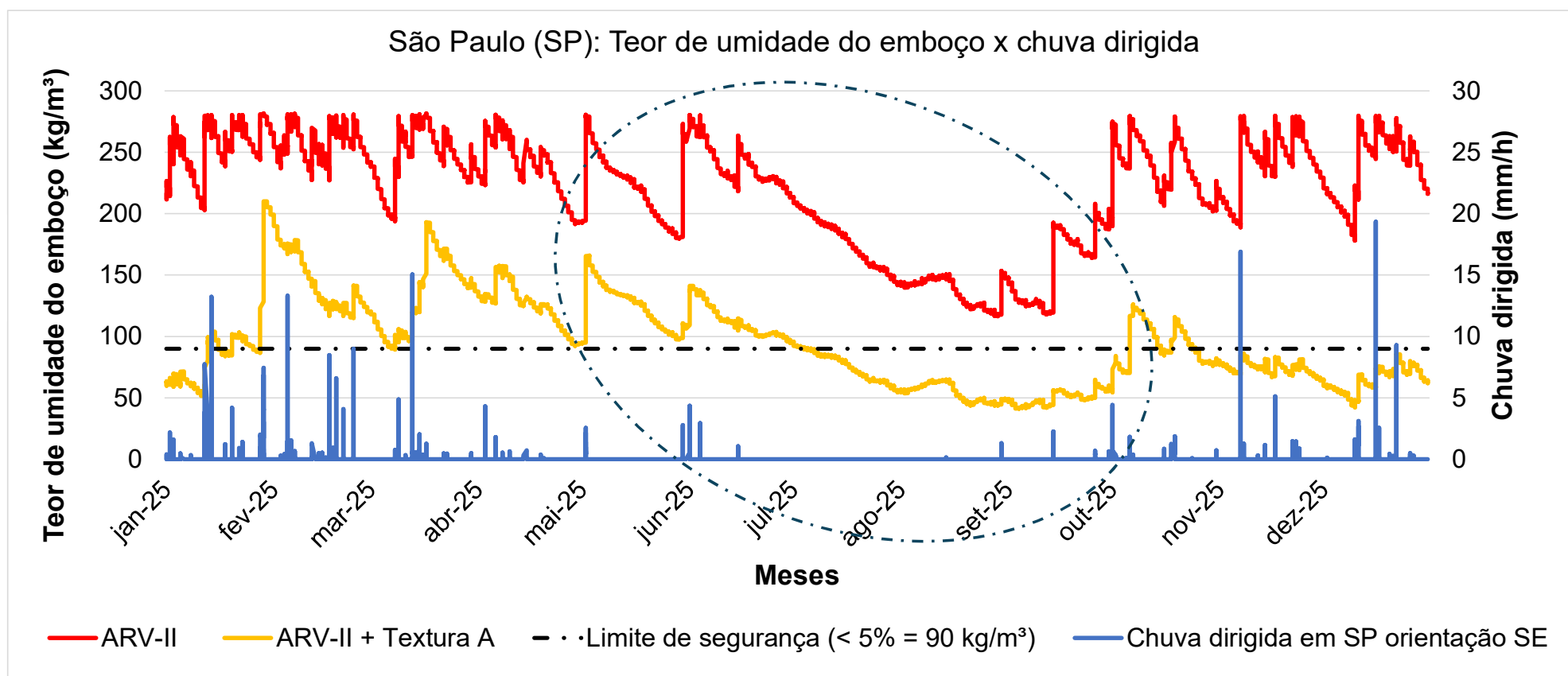


Análise do teor de umidade da parede em São Paulo



Umidade total da parede (kg/m²) – representa o acúmulo de água por metro quadrado de fachada, somando todas as camadas

Análise do teor de umidade do emboço em São Paulo



Umidade do emboço (kg/m^3) – corresponde à quantidade de água por metro cúbico de argamassa

Decisão Técnica Para o Projeto em São Paulo (SP)

O que fazer?

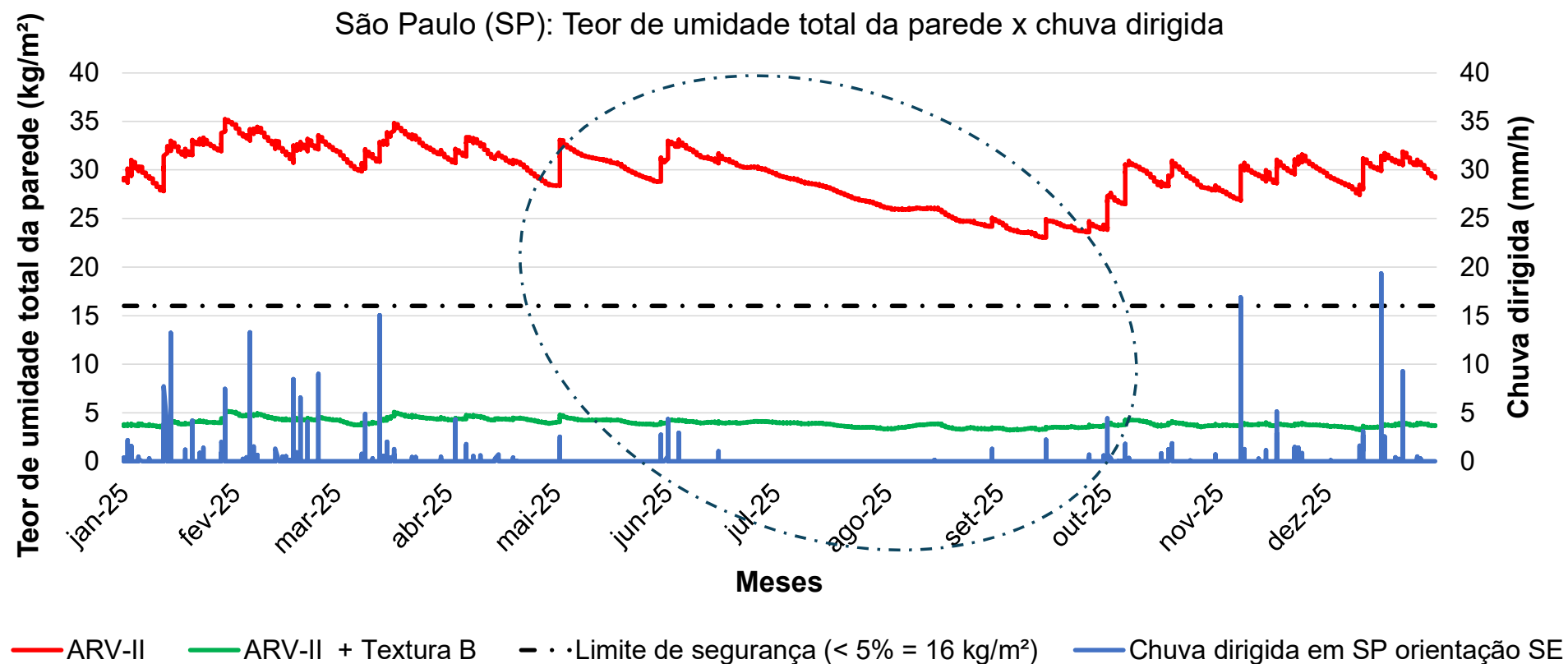


- **Substituir a argamassa atual?**
(menor absorção capilar: W–)

ou

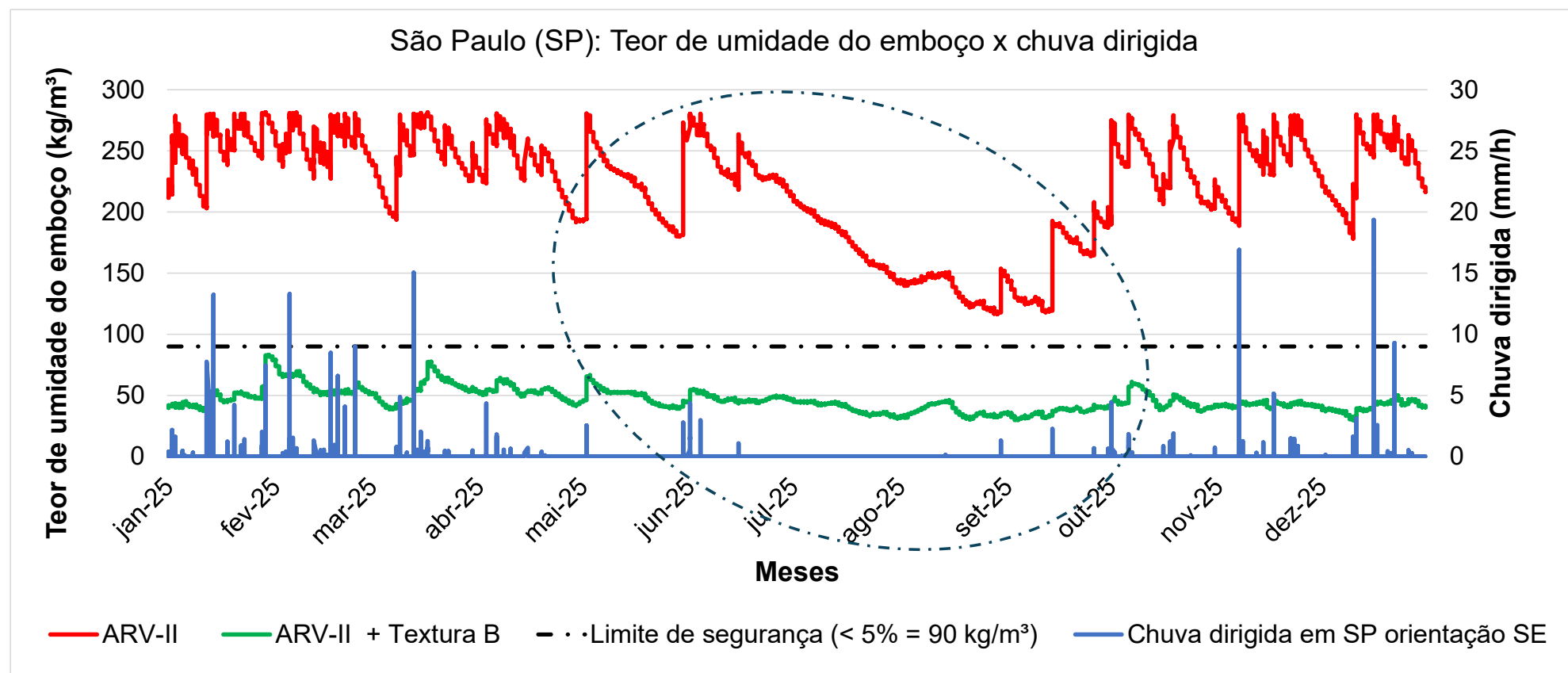
- **Substituir a textura atual?**
(menor absorção capilar e permeável ao vapor de água: W– Sd↓)

Análise do teor de umidade da parede em São Paulo



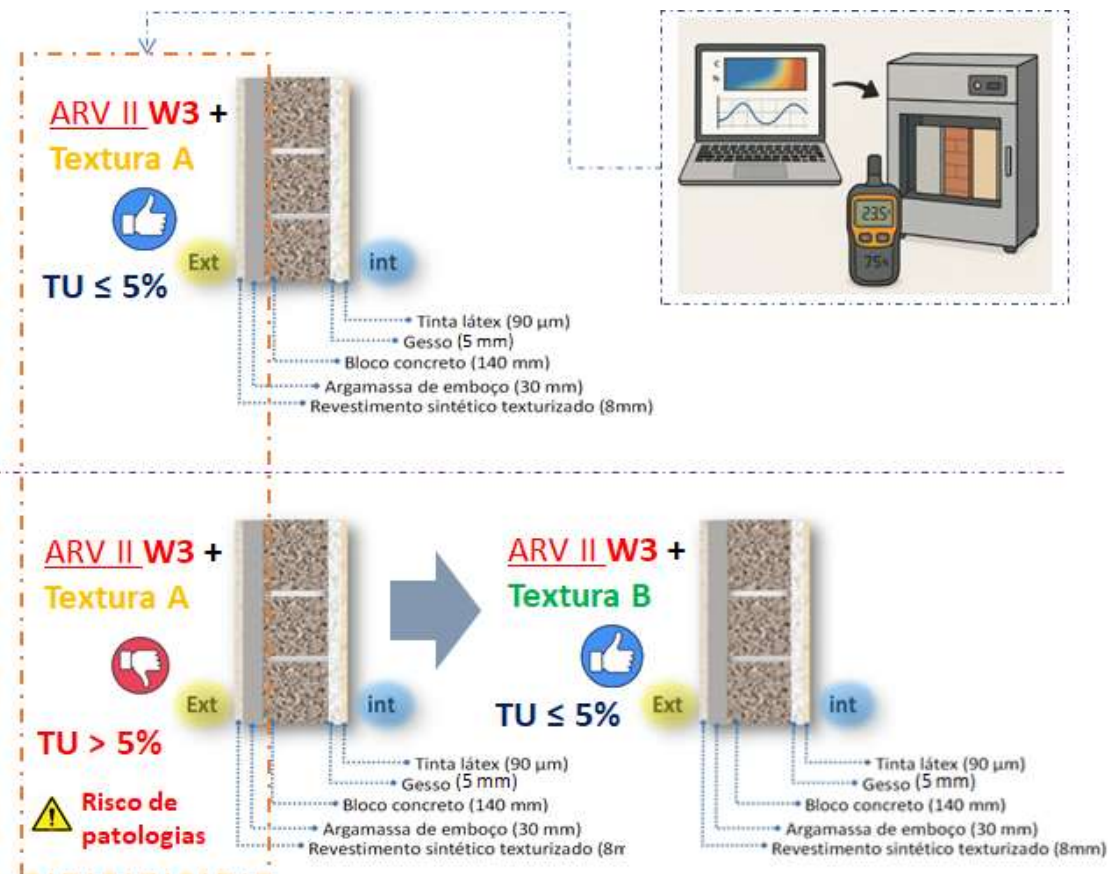
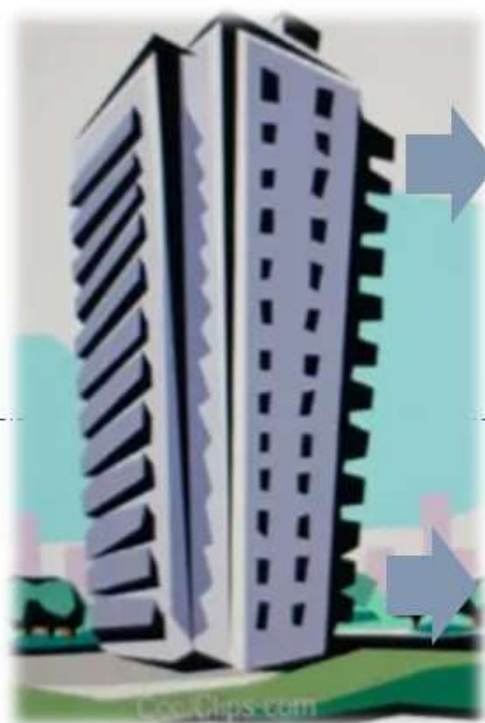
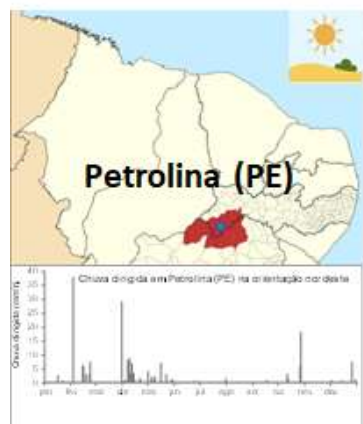
Umidade total da parede (kg/m^2) – representa o acúmulo de água por metro quadrado de fachada, somando todas as camadas

Análise do teor de umidade do emboço em São Paulo



Umidade do emboço (kg/m³) – corresponde à quantidade de água por metro cúbico de argamassa

Aprendizados do Estudo de Caso



Fonte: Autor, 2025

Considerações Importantes



A Simulação Não Substitui Ensaaios Laboratoriais

◆ Modelos são aproximações

→ Representam o comportamento físico real, mas simplificam realidades complexas

◆ Dependência da qualidade dos dados

→ Propriedades dos materiais, clima e condições de contorno precisam ser bem caracterizados

◆ Fenômenos difíceis de simular

→ Microfissuras, execução real, variações locais de carga de vento e exposição

◆ Exigências normativas

→ Ensaios físicos (ex.: estanqueidade, aderência) são obrigatórios para comprovação de desempenho segundo normas (ex.: ABNT NBR 15575)



A Simulação é um Diferencial no Projeto

❑ Avaliação dinâmica e a longo prazo

→ Condições reais de sol, chuva, vento, variação de temperatura e umidade

❑ Análise de alternativas construtivas

→ Comparação entre diferentes revestimentos ou camadas de sistemas de fachada

❑ Apoio à decisão de projeto

→ Identificação precoce de riscos de patologias e suporte ao projeto baseado em desempenho

❑ Complemento para otimizar ensaios

→ Reduz número de protótipos físicos e direciona melhor as análises necessárias



Conclusão: Prever é Melhor que Remediar

A **simulação higrotérmica computacional** permite **avaliar o comportamento da envoltória da edificação frente à umidade** ao longo do tempo, considerando o **clima local**, a **orientação** da fachada e as **propriedades** dos materiais que compõem o **sistema de revestimento**.

Com base nesses dados, a ferramenta possibilita:

- ✓ **Selecionar materiais mais adequados ao clima local** e às condições específicas de exposição;
- ✓ **Prever o risco de ocorrência de patologias** relacionadas à umidade, como eflorescências, destacamentos e crescimento biológico;
- ✓ **Dar suporte técnico fundamentado às decisões de projeto**, especialmente na especificação de sistemas de revestimento para fachadas expostas.



Considerações Finais

Que essa palestra não sirva apenas para aprender a **mitigar** patologias construtivas, mas também para inspirar o cuidado e o bem-estar coletivo com aquilo que nos foi confiado.



Fonte: Autor, 2025

XV SBTA

30 anos

Simpósio Brasileiro de
Tecnologia das Argamassas

Obrigado!

Porto Alegre/RS | Palestra
Brasil | 13.06.2025

Simulação higrotérmica na prevenção de patologias decorrentes da umidade em revestimento argamassado texturizado em fachadas



Palestrante: Eng. Civil Me. Alexandre C. Santos

E-mail: alexcord@ipt.br

LinkedIn: <https://br.linkedin.com/school/iptsp/>

Organização



Promoção

