

# **SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA DE EDIFÍCIOS**

Aplicação do EMPD no cálculo da humidade  
interior

**MARIA ISABEL AMARAL SANTOS PIRES AFONSO**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES**

---

Orientador: Professor Doutor Nuno Manuel Monteiro Ramos

JULHO DE 2011

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2010/2011**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2010/2011 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À minha irmã, pela grande amizade

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.

*Albert Einstein*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao concluir este trabalho gostaria de mostrar a minha gratidão a todos os que contribuíram para a sua realização.

O meu muito obrigada ao meu orientador, Professor Nuno Ramos que generosamente partilhou comigo o seu tempo, conhecimentos e materiais de pesquisa. Pela paciência, pela preocupação e conselhos sábios.

À minha mãe, pela sua escrupulosa revisão do texto e sentido crítico, esclarecendo desde já que, se ainda houver erros, serão exclusivamente meus.

Ao meu pai por todas as ajudas informáticas e técnicas, detalhes fundamentais para que tudo isto se tornasse mais simples.

A todos os meus amigos que sempre estiveram presentes e que, de uma forma ou de outra fizeram de mim o que sou hoje.

Acima de tudo, e como sempre, o meu agradecimento infinito e do coração à minha família, que sempre me apoiou e por tornar tudo isto possível.



## RESUMO

Os utilizadores dos edifícios são cada vez mais exigentes relativamente à eficiência energética e ao conforto térmico.

Um ambiente confortável é aquele em que os seus ocupantes sentem um bem-estar. Este ambiente não é apenas adequado termicamente mas também em relação às condições de humidade.

É particularmente no âmbito da higroscopicidade que se insere este trabalho. Parte-se de um edifício já existente, uma escola, e analisam-se as suas características higrotérmicas, com o intuito de resolver as principais patologias.

Para isso, utilizou-se um programa de simulação, o EnergyPlus, programa especialmente dirigido para a análise em termos energéticos e que permite, através da introdução de dados de uma perspectiva de construção física, verificar qual o comportamento do edifício em termos de variáveis como a humidade e a temperatura.

Verificaram-se as repercussões em termos higrotérmicos da introdução da inércia higroscópica no bloco escolar. Para isso, estudou-se o modelo simplificado de cálculo “effective moisture penetration depth”, modelo este que sugere que apenas uma fina camada à superfície dos materiais higroscópicos, localizados à superfície da parede interior, interage com o ar e conseqüente vapor de água nele contido.

Os resultados demonstram um pequeno aumento da inércia higroscópica motivada pela introdução de materiais com propriedades adsorventes e desadsorventes na superfície interna das paredes. Contudo, os resultados também demonstram que o modelo de cálculo é muito sensível à definição da espessura da camada de adsorção, pelo que esta deve ser definida com o máximo cuidado.

Por último, estudou-se a introdução de mais dois parâmetros, a espessura de isolamento nas paredes e o coeficiente de transmissão térmica nos envidraçados, verificando-se que um modelo conjunto resulta numa optimização do comportamento higroscópico do edifício.

**PALAVRAS-CHAVE:** Comportamento Higrotérmico, Humidade Relativa, EnergyPlus, EMPD, Inércia Higroscópica



## **ABSTRACT**

Building's users are increasingly demanding for energy efficiency and thermal comfort.

A comfortable environment is an environment where its occupants feel a well-being based on correct thermal environment. This environment is both adequate in thermal terms and also with regard to heat-humidity conditions.

This work regards specifically material's hygroscopicity. The hydrothermal existing features of an existing building, a school, are analysed in order to address its main pathologies.

In order to process data, a commercial simulation software, EnergyPlus, is used. EnergyPlus is specifically directed to an analysis in terms of energy and allows, through data entry from the perspective of physical construction, to verify the behaviour of the building in terms of variables such as humidity and temperature.

All the hygrothermal repercussions resulting from introducing additional hygroscopic inertia in school's block are analysed. The simplified model "effective moisture penetration depth" has been used. This model suggests that only a thin surface layer of hygroscopic material, located on the surface of the inner wall, interacts with the air and the resulting water vapour in it contained.

The results obtained show a slender increase of hygroscopic inertia obtained by the introduction of those materials on the inner surface of the walls. However, the results show also that the calculation model is very sensitive to the definition of the thickness of the thin adsorption layer, so it must be set with the utmost care.

Finally, the introduction of two more parameters, the thickness of insulation in walls and the glazed thermal transmission coefficient, is studied. A joint model results in optimization of the hygrothermal behaviour of the building.

**KEYWORDS:** Hydrothermal Behavior, Relative Humidity, EnergyPlus, EMPD, Hygroscopic Inertia.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. OBJECTIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	2
<b>2. MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS</b> .....	5
2.1. HUMIDADE NA CONSTRUÇÃO .....	5
2.1.1. INTRODUÇÃO.....	5
2.1.2. CONCEITOS TEÓRICOS APLICADOS.....	5
2.1.3. HIGROSCOPICIDADE .....	6
2.1.4. CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS .....	8
2.1.5. FACTORES DE INFLUENCIAM A VARIAÇÃO DA HUMIDADE.....	10
2.1.5.1. Clima exterior .....	10
2.1.5.2. Utilizadores .....	12
2.1.5.3. Sistemas de Ventilação .....	13
2.1.6. A IMPORTÂNCIA DA HUMIDADE PARA OS UTILIZADORES.....	14
2.1.6.1. Influência da Humidade no Conforto Térmico .....	14
2.1.6.2. Influência da Humidade na degradação de materiais e de elementos construtivos.....	16
2.1.6.3. Influência da Humidade na saúde dos Utilizadores .....	17
2.1.6.4. Limites ideais para a variação da Humidade Relativa .....	18
2.2. APRESENTAÇÃO GERAL DO PROGRAMA ENERGYPLUS.....	18
2.3. MODELAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM O ENERGYPLUS .....	19
2.3.1. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA TEMPERATURA INTERIOR .....	19
2.3.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR.....	21
2.4. MODELAÇÃO DA VARIAÇÃO DA HUMIDADE .....	21
2.4.1. INTRODUÇÃO.....	21

2.4.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA HUMIDADE RELATIVA INTERIOR COM O ENERGYPLUS.....	22
2.4.3. EFFECTIVE MOISTURE PENETRATION DEPTH .....	22
2.4.3.1. Introdução.....	22
2.4.3.2. Metodologia de Cálculo do EMPD com o EnergyPlus .....	23
2.4.3.3. Estudos prévios desenvolvidos.....	25

### **3. DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO.....**

<b>3.1. DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO.....</b>	<b>27</b>
3.1.1. INTRODUÇÃO.....	27
3.1.2. APRESENTAÇÃO GERAL DO EDIFÍCIO .....	27
3.1.3. ENVOLVENTE .....	28
<b>3.2. ESTUDOS PREVIAMENTE DESENVOLVIDOS.....</b>	<b>31</b>
3.2.1. INTRODUÇÃO.....	31
3.2.2. OPTIMIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DA ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS ESCOLARES.....	31
3.2.3. OPTIMIZAÇÃO DA ENVOLVENTE EXTERIOR PARA MINIMIZAÇÃO DO RISCO DE CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS .....	32

### **4. SIMULAÇÃO DO EDIFÍCIO.....**

<b>4.1. MODELAÇÃO HIGROSCÓPICA.....</b>	<b>35</b>
4.1.1. INTRODUÇÃO.....	35
4.1.2. ESCOLHA DO ALGORITMO .....	35
4.1.2.1. Material .....	36
4.1.2.2. Propriedades dos materiais higroscópicos de revestimento .....	37
<b>4.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
4.2.1. SIMULAÇÃO SEM HIGROSCOPICIDADE.....	40
4.2.2. ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO PROGRAMA AO EMPD .....	44
4.2.3. INTRODUÇÃO DO REVESTIMENTO HIGROSCÓPICO .....	45
4.2.3.1. Comparação entre os diferentes tipos de Revestimento .....	45
4.2.3.2. Simulação com Higroscopicidade – Comportamento Anual .....	46
4.2.3.3. Simulação com Higroscopicidade – Análise do mês de Janeiro .....	47
4.2.3.4. Simulação com Higroscopicidade – Análise do mês de Novembro.....	49
4.2.3.5. Simulação com Higroscopicidade – Análise do dia 4 de Janeiro .....	51
4.2.3.6. Simulação com Higroscopicidade – Análise do dia 5 de Janeiro .....	53

4.2.3.7. Comparação entre as diferentes paredes constituintes do bloco .....	55
4.2.4. SENSIBILIDADE DO MODELO EMPD ÀS VARIAÇÕES DE $\delta M$ .....	59
<b>4.3. SÍNTESE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>60</b>
<b>5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>63</b>
<b>5.1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>63</b>
<b>5.2. VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DOS ENVIDRAÇADOS</b> .....	<b>63</b>
<b>5.3. VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO ISOLAMENTO TÉRMICO EM CONJUNTO COM O COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DOS ENVIDRAÇADOS</b> .....	<b>65</b>
<b>5.4. CONTRIBUIÇÃO DA INÉRCIA HIGROSCÓPICA</b> .....	<b>68</b>
5.4.1. ESCOLHA DO CONJUNTO IDEAL .....	68
5.4.2. INFLUÊNCIA DA VENTILAÇÃO NO CONJUNTO .....	72
<b>5.5. SÍNTESE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>73</b>
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>75</b>
<b>6.1. CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO</b> .....	<b>75</b>
<b>6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS</b> .....	<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>79</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1: Curva higroscópica típica, correspondente à adsorção (Ramos, 2007) .....	7
Fig. 2: Diagrama Psicométrico, adaptado de (Teixeira, 2007) .....	9
Fig. 3: Zonamento Climático de Portugal Continental, para o Inverno e Verão (RCCTE, 4 de Abril 2006) .....	11
Fig. 4: Percentagem de insatisfeitos com o conforto respiratório, em função da temperatura e da humidade relativa (Ramos, 2007).....	15
Fig. 5: Efeito da Humidade relativa na Produtividade, adaptado de (Kosonen et al., 2004) .....	16
Fig. 6: Influência dos picos de humidade no crescimento dos fungos, em condições isotérmicas (Tuomo et al., 2007).....	17
Fig. 7: Zona térmica de um Edifício, adaptado de (Esteves, 2011).....	19
Fig. 8: Representação esquemática da camada de adsorção .....	23
Fig. 9: Vista aérea do edifício .....	28
Fig. 10: Planta do bloco em estudo. Adaptado de (Santos, 2010) .....	30
Fig. 11: Fachada principal do bloco (Santos, 2010) .....	30
Fig. 12: Fachada Este do bloco (Santos, 2010) .....	31
Fig. 13: Janela de introdução dos dados para o objecto <i>Heat Balance Algorithm</i> .....	36
Fig. 14: Propriedades dos materiais .....	37
Fig. 15: Ajuste das curvas .....	38
Fig. 16: Introdução dos coeficientes da equação (21) e comprimento da camada de adsorção, $\delta M$ ...	39
Fig. 17: Colocação do revestimento nas paredes interiores .....	40
Fig. 18: Representação esquemática do gradiente de temperaturas.....	41
Fig. 19: Evolução das temperaturas durante um ano, sem higroscopicidade .....	42
Fig. 20: Evolução da humidade relativa durante um ano.....	42
Fig. 21: Evolução da pressão parcial de vapor ao longo do ano.....	44
Fig. 22: Simulação de verificação da sensibilidade do programa .....	44
Fig. 23: Humidade Relativa no interior do bloco, sem revestimento e com os diferentes gessos. Representação anual .....	45
Fig. 24: Comparação entre simulações com e sem higroscopicidade. Gráfico anual da humidade relativa superficial interior.....	46
Fig. 25: Humidade relativa interior e superficial interior, durante um ano.....	46
Fig. 26: Comparação entre simulações com e sem higroscopicidade. Gráfico para o mês de Janeiro da humidade relativa superficial interior.....	48
Fig. 27: Humidade relativa superficial interior e interior para o mês de Janeiro .....	48

Fig. 28: Evolução das temperaturas interior e exterior para o mês de Janeiro.....	49
Fig. 29: Comparação entre simulações com e sem higroscopicidade. Gráfico para o mês de Novembro da humidade relativa superficial interior .....	50
Fig. 30: Humidade relativa superficial interior e exterior para o mês de Novembro.....	50
Fig. 31: Evolução das temperaturas interior e exterior para o mês de Novembro.....	51
Fig. 32: Evolução da humidade relativa para o dia 4 de Janeiro .....	52
Fig. 33: Evolução da temperatura para o dia 4 de Janeiro .....	53
Fig. 34: Evolução da pressão parcial de vapor para o dia 4 de Janeiro.....	53
Fig. 35: Evolução da humidade relativa para o dia 5 de Janeiro .....	54
Fig. 36: Evolução da temperatura para o dia 5 de Janeiro .....	54
Fig. 37: Evolução da pressão parcial de vapor para o dia 5 de Janeiro.....	55
Fig. 38: Evolução da Humidade Relativa à superfície das paredes, durante um ano.....	56
Fig. 39: Evolução da Humidade Relativa à superfície das paredes, no mês de Janeiro .....	56
Fig. 40: Evolução horária da Humidade Relativa à superfície das paredes, no dia 4 de Janeiro.....	57
Fig. 41: Evolução horária da Temperatura à superfície das paredes, no dia 4 de Janeiro .....	57
Fig. 42: Evolução horária da Humidade Relativa à superfície das paredes, no dia 5 de Janeiro.....	58
Fig. 43: Evolução horária da Temperatura à superfície das paredes, para o dia 5 de Janeiro .....	58
Fig. 44: Evolução da Humidade Relativa interior do edifício, no mês de Janeiro, variando $\delta M$ .....	59
Fig. 45: Evolução da Temperatura interior no mês de Janeiro, variando $\delta M$ .....	60
Fig. 46: Evolução da humidade relativa à superfície da parede interior do edifício, para o mês de Janeiro, apenas variando o coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados .....	64
Fig. 47: Evolução da humidade relativa superficial no mês de Janeiro para 1 cm de isolamento e variando o coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados .....	65
Fig. 48: Evolução da temperatura superficial no mês de Janeiro para 1 cm de isolamento e variando o coeficiente de transmissão térmica .....	66
Fig. 49: Evolução da humidade relativa superficial no dia 5 de Janeiro para 1 cm de isolamento e variando o coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados .....	66
Fig. 50: Evolução da humidade relativa superficial para o mês de Janeiro, variando a espessura de isolamento .....	67
Fig. 51: Frequências acumuladas da variação da humidade relativa à superfície da parede ao longo de um ano .....	68
Fig. 52: Evolução da humidade relativa superficial para o mês de Janeiro. Comparação de gráficos sem e com EMPD.....	69
Fig. 53: Frequências acumuladas da variação da humidade relativa à superfície da parede ao longo do mês de Janeiro .....	70
Fig. 54: Evolução da humidade relativa superficial no interior do edifício para o dia 5 de Janeiro.....	71

Fig. 55: Frequências acumuladas da variação da humidade relativa à superfície da parede para os dias mais críticos do ano: 4 e 5 de Janeiro .....71

Fig. 56: Evolução da humidade relativa à superfície para uma ventilação de 2.2 renovações por hora 72

Fig. 57 Evolução da humidade relativa à superfície para uma ventilação de 1.0 renovações por hora .73



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Valores da produção de vapor em edifícios.....	12
Quadro 2: Média de produção de vapor por casa, consoante o número de crianças, <i>Kg/dia</i> .....	12
Quadro 3: Calendário escolar 2009/10 (Santos, 2010) .....	29
Quadro 4: Interrupções lectivas 2009/10 (Santos, 2010).....	29
Quadro 5: Parâmetros de ajuste da função da curva higroscópica, adaptado de (Ramos, 2007).....	37
Quadro 6: Resumo dos ajustes .....	38
Quadro 7: Propriedades dos materiais necessárias à obtenção de $\delta M$ , adaptado de (Ramos, 2007).38	
Quadro 8: Resultados da aplicação da equação (27).....	39
Quadro 9: Temperaturas exterior, superficial interior e interior.....	41
Quadro 10: Valores médios e percentis da Humidade Relativa.....	43
Quadro 11: Valores médios e percentis da Humidade Relativa.....	47
Quadro 12: Temperaturas médias à superfície das paredes, em Janeiro.....	64
Quadro 13: Percentil 90 da Humidade para o mês de Janeiro .....	64
Quadro 14: Percentil 90 da Humidade para o mês de Janeiro .....	65
Quadro 15: Comparação entre valores com e sem revestimento higroscópico.....	69
Quadro 16: Influência dos diferentes parâmetros estudados na humidade relativa à superfície da parede .....	74



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AVAC – aquecimento, ventilação e ar-condicionado

BLAST – Building Loads Analysis and System Thermodynamics

$C_p$  – Calor específico [ $J/kg.K$ ]

DOE – Department of Energy

EMPD – Effective Moisture Penetration Depth

$L$  – Espessura total da camada higroscópica [ $m$ ]

$m$  – Massa [ $kg$ ]

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico

$p_{ar}$  – Pressão total do ar [ $Pa$ ]

$p_v$  – Pressão parcial de vapor no ar [ $Pa$ ]

$p_{v,sat}$  – Pressão de saturação de vapor [ $Pa$ ]

$R_v$  – Constante universal dos gases [ $J/(kg.K)$ ]

$R_{si}$  – Resistência superficial interior [ $m^2C/W$ ]

TMPD – True Moisture Penetration Depth

$T$  – Temperatura [ $^{\circ}C$ ]

$T_{si}$  – Temperatura superficial interior [ $^{\circ}C$ ]

$T_i$  – Temperatura interior [ $^{\circ}C$ ]

$T_e$  – Temperatura exterior [ $^{\circ}C$ ]

$T_{MM}$  – Temperatura média mensal [ $^{\circ}C$ ]

$T_{po}$  – Temperatura de ponto de orvalho [ $^{\circ}C$ ]

$t_p$  – Período de um ciclo de variação de Humidade [ $s$ ]

$U$  – Coeficiente de transmissão térmica [ $W/m^2C$ ]

$U_{env}$  – Coeficiente de transmissão térmica do envidraçado [ $W/m^2C$ ]

$u$  – Teor de humidade em massa de um material [ $kg/kg$ ]

$u_h$  – Teor de humidade crítico [ $kg/kg$ ]

$V$  – Volume [ $m^3$ ]

$v$  – Concentração de vapor no ar [ $kg/m^3$ ]

$x_{ar}$  – Humidade absoluta do ar [ $kg/kg$ ]

XPS – Poliestireno Extrudido

$w$  – Teor de humidade em volume aparente de um material [ $kg/m^3$ ]

$w_{cr}$  – Teor de humidade crítico [ $kg/m^3$ ]

$w_{sat}$  – Teor de humidade máximo [ $kg/m^3$ ]

$\delta$  – Permeabilidade ao vapor [ $kg/m \cdot s \cdot Pa$ ]

$\delta_M$  – Camada de adsorção [ $m$ ]

$\xi$  – Capacidade higroscópica específica [ $kg/kg$ ]

$\lambda$  – Condutibilidade térmica [ $W/m \cdot K$ ]

$\rho_{ar}$  – Massa volúmica do ar [ $kg/m^3$ ]

$\rho_s$  – Massa volúmica do material “s” [ $kg/m^3$ ]

$\varphi$  – Humidade relativa [%]

$\varphi_{si}$  – Humidade relativa superficial interior [%]

$\varphi_i$  – Humidade relativa interior [%]

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

A preocupação com a eficiência energética e o conforto térmico dos edifícios tem vindo a crescer ao longo dos anos devido ao crescente nível de exigência por parte dos utilizadores.

Ao mesmo tempo que surge a necessidade de baixar o custo energético dos edifícios, procura-se dotá-los de equipamentos que optimizem o conforto térmico.

O problema das humidades nos edifícios é uma patologia cada vez mais frequente nos nossos dias. A condensação à superfície das paredes é, talvez, a patologia típica dos edifícios que se constroem actualmente, sendo até descrita como a doença moderna dos edifícios, (Mendonça, 2005).

A humidade relativa interior dos edifícios é, portanto, um parâmetro fundamental para a avaliação do seu desempenho, contribuindo directamente para a definição das exigências de conforto higrotérmico.

O aparecimento de bolores nos edifícios está directamente relacionado com as condições de humidade e de temperatura no interior do edifício, pelo que se deve controlar activamente esses parâmetros de modo a responder às exigências de qualidade do ar e de durabilidade das construções.

Estas preocupações crescentes dizem não só respeito às construções novas. É também importante intervir de forma adaptada nos edifícios já existentes, procurando ainda assim responder às exigências dos utilizadores.

Existem para isso ferramentas de simulação à disposição dos projectistas, que fornecem uma ajuda fundamental na avaliação do comportamento higrotérmico dos edifícios, permitindo-lhes estudar várias alternativas de concepção para responder aos objectivos, tanto construtivos como a nível de reparação e manutenção no futuro.

No contexto da reabilitação das escolas, neste momento estão a realizar-se grandes esforços governamentais com o objectivo de dotar as escolas de equipamentos e construções com conforto e qualidade suficiente para facilitar a actividade de aprendizagem.

É neste contexto que surge esta dissertação, em que se recorreu a uma ferramenta de simulação higrotérmica, o EnergyPlus, para avaliar o comportamento de um bloco escolar localizado na freguesia de Gueifães, concelho da Maia.

Este trabalho constitui a continuação de dois estudos anteriores: (Esteves, 2011; Santos, 2010). Centrando-se na avaliação da contribuição de revestimentos interiores para a inércia higroscópica, inclui a avaliação do desempenho higrotérmico geral do bloco.

Serão simulados vários cenários possíveis, sugerindo diferentes combinações de parâmetros que optimizem o comportamento higrotérmico do bloco.

## **1.2. OBJECTIVOS**

Este trabalho tem como objectivo principal a avaliação de um modelo de cálculo de simulação higrotérmica respeitante à interacção entre o ar interior e materiais com higroscopicidade.

Com a modelação pretende-se estudar a participação da higroscopicidade de materiais constituintes na superfície das paredes interiores, constituintes do bloco escolar, na optimização do comportamento higrotérmico do edifício.

Com o objectivo estabelecido, definiram-se um conjunto de metas necessárias para o alcançar. Dessas metas parciais formuladas nomeiam-se as principais:

- O estudo do modelo existente do bloco escolar, preparado para o programa EnergyPlus;
- Estudo do modelo simplificado de simulação, a sua formulação matemática, compreendendo quais as simplificações adoptadas, e quais as propriedades dos materiais que devem ser conhecidas à partida;
- Exploração do programa EnergyPlus e a formulação matemática das principais variáveis das simulações;
- Com vista à reabilitação do edifício, estudo de qual o modelo ideal, em termos de materiais e suas propriedades, que optimizem o comportamento higrotérmico do bloco escolar.

## **1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos.

No Capítulo 1 procede-se à apresentação do enquadramento do tema, definem-se os objectivos do estudo e indica-se a estrutura fundamental do trabalho.

O Capítulo 2 subdivide-se em quatro partes: na primeira são expostos os conceitos teóricos necessários à perfeita compreensão do tema desenvolvido. Na segunda parte expõe-se de uma forma geral o que é o programa EnergyPlus, qual o seu âmbito de utilização, bem como as vantagens e simplificações utilizadas no seu modelo. Numa terceira parte expõe-se a metodologia de cálculo do EnergyPlus, no que respeita à transferência de calor. Por último, na quarta parte, faz-se uma exposição da modelação da variação da humidade, referindo a metodologia de cálculo da humidade relativa e expondo o modelo simplificado de cálculo inerente à simulação da interacção entre o ar interior e os materiais higroscópicos. Nesta fase, referem-se ainda alguns estudos desenvolvidos neste tema.

O Capítulo 3 é dedicado ao caso em estudo e está subdividido em duas partes. Na primeira, faz-se referência às características do bloco em estudo e da sua envolvente. Numa segunda parte apresentam-se outros estudos desenvolvidos anteriormente por Santos (2010) e Esteves (2011), destacando-se as principais conclusões retiradas de cada um.

No Capítulo 4 apresenta-se a simulação concreta do edifício e está subdividido em duas partes. Na primeira parte apresenta-se a metodologia de introdução dos novos dados no programa EnergyPlus, afectos à simulação higroscópica em estudo. Numa segunda fase apresentam-se os resultados das simulações, fazendo-se uma separação entre as simulações sem higroscopicidade e as simulações com higroscopicidade.

O Capítulo 5 subdivide-se em três partes e faz uma análise comparativa e conjunta de todos os estudos desenvolvidos até ao momento, relativamente à escola de Gueifães. Numa primeira parte estuda-se isoladamente a influência do coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados. De seguida faz-se uma análise conjugada da influência da espessura do isolamento térmico com o coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados já otimizados. Finalmente, introduz-se higroscopicidade a um modelo com espessura de isolamento e coeficiente de transmissão térmica nos envidraçados, analisando quais as melhorias. Nesta última fase faz-se ainda uma análise da influência da ventilação no comportamento higroscópico do edifício.

Finalmente, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho desenvolvido, bem como alguns possíveis desenvolvimentos futuros dentro do tema.



# 2

## MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE EDIFÍCIOS

### 2.1. HUMIDADE NA CONSTRUÇÃO

#### 2.1.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo pretende-se fazer uma exposição geral das noções teóricas necessárias a uma melhor compreensão dos conceitos abordados neste trabalho.

Sendo esta dissertação uma continuação de duas realizadas anteriormente (Esteves, 2011; Santos, 2010), deve-se referir que não serão aqui abordados em profundidade os conceitos expostos anteriormente.

#### 2.1.2. CONCEITOS TEÓRICOS APLICADOS

Os materiais que constituem a superfície interior das alvenarias estão em contacto com a atmosfera, constituída por uma mistura de ar seco com vapor de água. Estes materiais são, regra geral, porosos e são, portanto, formados, não só pela sua estrutura sólida mas também por uma fase líquida, compreendo a água, livre e adsorvida, e a fase gasosa, o próprio ar. Ambas as fases estão contidas na estrutura porosa do material (Ramos, 2007).

Admitindo que os gases constituintes da atmosfera, ar e vapor de água, se comportam de forma ideal, poder-se-á aplicar a lei geral dos gases para relacionar a pressão parcial de vapor no ar,  $p_v$ , e a concentração de vapor no ar,  $v$ , com a expressão (Hagentoft, 2001):

$$\frac{p_v}{v} = R_v \cdot (T + 273.15) \quad (1)$$

Onde a temperatura é definida em °C e a constante universal dos gases,  $R_v$ , tem o valor de 461.4 J/(kg.K).

O ar não é capaz de concentrar mais que um determinado limite de moléculas de água na sua estrutura, limite este definido como o ponto de saturação. Este valor está intimamente relacionado com a temperatura.

As equações que traduzem os valores de pressão de saturação,  $p_{v,sat}$ , respectivamente para temperaturas negativas e positivas são (Hens, 1991):

$$p_{v,sat} = 611 \times e^{(82.9 \cdot 10^{-3} - 288.1 \cdot 10^{-6} \times T^2 + 4.403 \cdot 10^{-6} \times T^3)}, -30^{\circ}C \leq T \leq 0^{\circ}C \quad (2)$$

$$p_{v,sat} = e^{(23.5771 - \frac{4042.9}{T+273.15-37.58})}, 0^{\circ}C \leq T \leq 80^{\circ}C \quad (3)$$

Existe um parâmetro que relaciona a pressão de vapor com a pressão de saturação do ar. Este parâmetro tem o nome de Humidade Relativa,  $\varphi$ , a qual é expressa em percentagem e traduz-se na razão entre a pressão parcial de vapor e a pressão de saturação. Tem a seguinte expressão (4):

$$\varphi = 100 \times \frac{p_v}{p_{v,sat}} \quad (4)$$

Uma outra grandeza que exprime a quantidade de vapor de água contida num metro cúbico de ar é a humidade absoluta, referida também como a densidade de água num determinado ponto da atmosfera (Kalagasidis, 2004):

$$x_{ar} = \frac{0.621 \cdot p_v}{p_{ar} - 0.379 \cdot p_v} \approx 6.21 \times 10^{-6} \cdot p_v \quad (5)$$

Onde  $p_{ar}$  representa a pressão atmosférica e está definida em  $Pa$ .

Uma outra expressão que permite realizar um cálculo expedito do teor de água do material, em massa,  $u$  [ $kg/kg$ ], é a seguinte:

$$u = \frac{\rho_s \times V}{m} = \frac{m_{mat.} - m_{mat. seco}}{m_{mat.}} \quad (6)$$

Onde  $\rho_s$  [ $kg/m^3$ ] representa a massa volúmica do material,  $V$  [ $m^3$ ] o seu volume e  $m$  [ $kg$ ] a massa.

Este teor pode ser também ser definido em volume,  $w$  [ $Kg/m^3$ ], se a equação (6) for substituída pelo quociente de massa de água do material pelo seu volume aparente. A relação ente as duas grandezas é, então, a seguinte:

$$w = \rho_s \times u \quad (7)$$

O teor de humidade pode variar desde o zero absoluto até um valor máximo, que corresponde ao ponto em que todos os poros do material estão cheios de água.

As formas de manifestação da humidade mais importantes são (Freitas et al., 2008):

- Higroscopicidade;
- Condensações superficiais e internas;
- Fuga nas instalações;
- Humidade de construção;
- Capilaridade ou humidade ascensional.

Esta dissertação aborda essencialmente as patologias associadas a condensações superficiais.

### 2.1.3. HIGROSCOPICIDADE

A higroscopicidade caracteriza-se como a capacidade de um determinado material fixar moléculas de água por adsorção, isto é, a capacidade de o material poroso reter moléculas de vapor de água na superfície dos poros, por forças químicas e físicas (Freitas et al., 2008).

Esta capacidade de adsorção de água é recíproca, ou seja, o material também é capaz de retribuir a água adsorvida ao meio ambiente, dependendo das variações de humidade relativa do mesmo. Este fenómeno, inverso da adsorção, denomina-se de desadsorção.

A maioria dos materiais utilizados em Engenharia Civil são higroscópicos. Quer isto dizer que, quando são colocados numa ambiência em que a humidade relativa varia, o seu teor de humidade varia também. Este fenómeno pode ser representado graficamente pela Fig. 1.

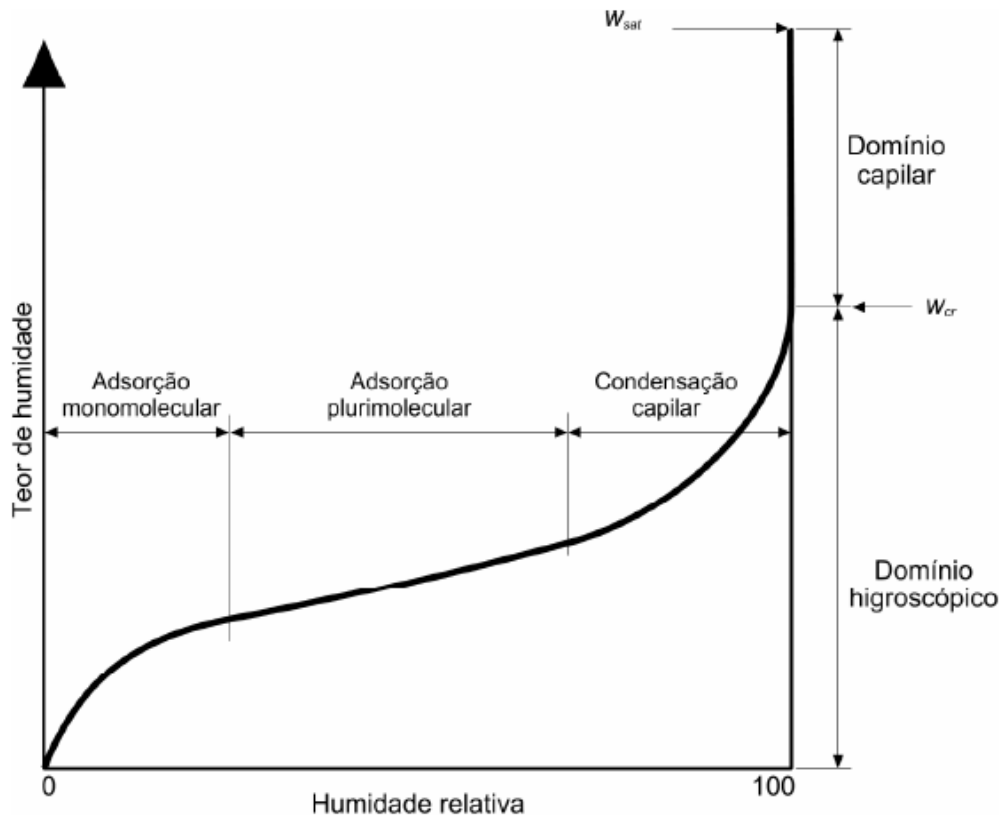


Fig. 1: Curva higroscópica típica, correspondente à adsorção (Ramos, 2007)

Este fenómeno tem explicação na teoria das forças intermoleculares ou forças de *Van der Waals*, em que a adsorção é devida a estas forças, que actuam na interface sólido-fluido no interior dos poros (Freitas et al., 2008).

Deste processo podem-se identificar três etapas: a fase da adsorção monomolecular, onde ocorre a fixação de uma camada de moléculas de água na superfície interior dos poros, a fase de adsorção plurimolecular, caracterizada pela deposição de várias camadas de moléculas sobre o estrato anterior e, finalmente, a fase de condensação capilar, em que há uma junção das camadas plurimoleculares. Esta fase apenas existe no caso de o diâmetro dos poros ser suficientemente pequeno.

De referir, ainda, os valores correspondentes ao teor de humidade crítico,  $w_{cr}$ , e o teor de humidade máximo,  $w_{sat}$ .

Estes dois valores diferenciam-se, na medida em que o primeiro,  $w_{cr}$ , corresponde ao limite do domínio higroscópico, e representa o teor de humidade que um material apresenta quando em contacto com um ambiente saturado, durante longos períodos.

Uma maior quantidade de humidade pode ser fixada por um material, se este for posto em contacto com água líquida, atingindo no limite o valor de  $w_{sat}$ . Este valor é, no entanto, difícil de ser atingido, dada a facilidade com que o ar fica aprisionado no interior da estrutura porosa.

Por último, deve-se ainda fazer referência a uma propriedade dos compartimentos devida aos materiais higroscópicos: a inércia higroscópica. Esta propriedade define-se como a capacidade que um compartimento ou edifício tem de moderar as variações da humidade relativa do ambiente interior através do armazenamento de vapor de água pelos revestimentos interiores (Ferreira, 2008). Este efeito pode ser diário, denominando-se inércia higroscópica diária, ou a longo prazo, reflectindo-se na evolução das pressões de vapor e humidade relativa e terá então o nome de inércia higroscópica sazonal (Ramos, 2007).

#### 2.1.4. CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS

A ocorrência de condensações internas dá origem ao aparecimento não programado de água nos elementos construtivos, podendo resultar no desenvolvimento de diversas formas de degradação de gravidade variável.

A ocorrência de condensações em elementos construtivos é um fenómeno que depende da sua constituição, das condições climáticas existentes e dos mecanismos de comportamento do ar húmido. Sempre que, em determinadas condições, o ar contacta com superfícies mais frias e a sua humidade absoluta atinge o limite de saturação para a temperatura em causa, ocorrerão condensações.

O comportamento do ar húmido depende da temperatura e da humidade absoluta, a qual exerce uma determinada pressão ( $p_v$ ), que será tanto maior quanto mais vapor de água existir. Mas quando esta concentração atinge a capacidade máxima, ou seja, a pressão de saturação, o ar já não tem capacidade para absorver vapor de água, condensando as quantidades em excesso.

Esta questão é, porém, um pouco mais complicada, uma vez que o limite de saturação, e sua respectiva pressão, não é constante, variando com a temperatura. Por este mesmo motivo, a humidade relativa aumenta quando a temperatura do ar diminui, uma vez que diminui o limite de saturação, acontecendo o inverso quando aumenta a temperatura. O exemplo é válido nos casos em que se mantém a humidade absoluta.

Sempre que o ar contacta com as zonas mais frias dos elementos de construção, nestas condições, a humidade absoluta ultrapassa o limite de saturação, ocorrendo as chamadas condensações superficiais.

A uma dada temperatura, o ar não pode conter uma quantidade de vapor de água superior à saturação. No inverno, a face interior dos elementos de construção está a uma temperatura,  $T_{si}$  inferior à temperatura do ar interior,  $T_i$ . Na expressão (8) apresenta-se a lei de Fourier que o resume, admitindo regime permanente e transferência unidireccional:

$$T_{si} = T_i - U \times R_{si}(T_i - T_e) \quad (8)$$

Em que:

$T_{si}$  – É a temperatura superficial interior;

- $T_i$  – É a temperatura interior;
- $U$  – É o coeficiente de transmissão térmica;
- $R_{si}$  – É a resistência superficial interior;
- $T_e$  – É a temperatura exterior.

O diagrama seguinte reproduz as relações existentes entre as humidades absoluta, relativa e a temperatura interior do ar. Denomina-se diagrama psicométrico (Fig. 2).

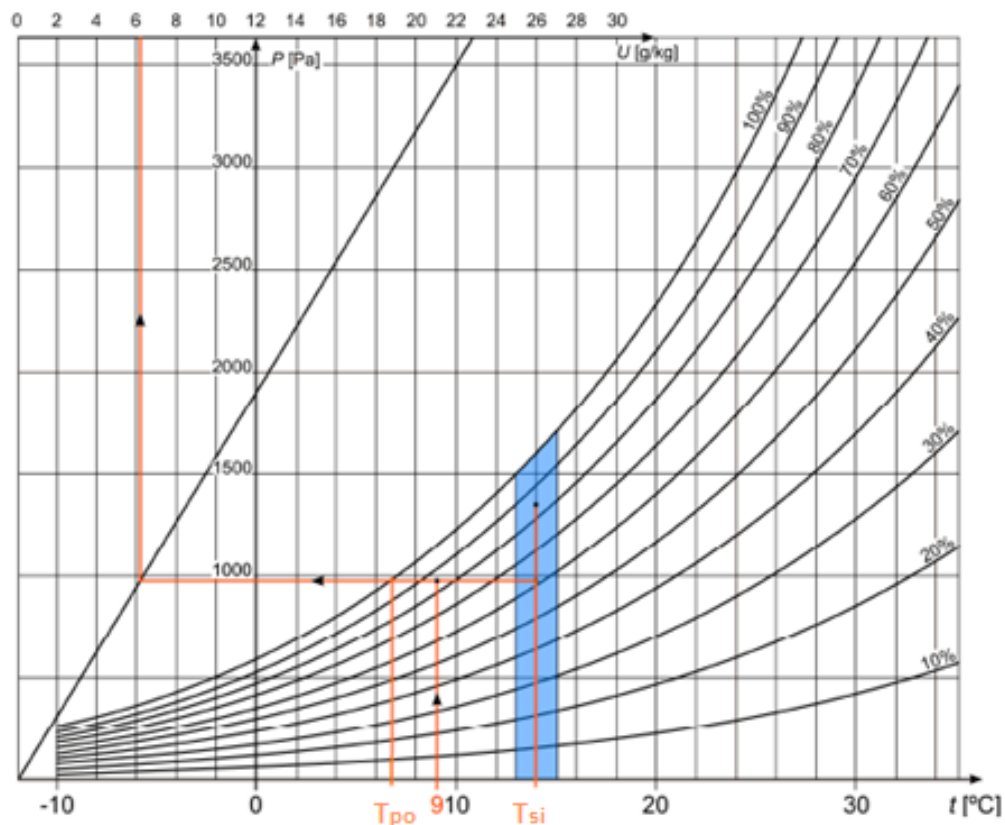


Fig. 2: Diagrama Psicométrico, adaptado de (Teixeira, 2007)

Deste diagrama pode-se identificar, nas abcissas a temperatura do ar e nas ordenadas a pressão parcial de vapor, aqui representada por  $P$ . As curvas representam os diversos valores da humidade relativa. As linhas horizontais representam pontos com igual pressão parcial de vapor e as verticais representam pontos com igual temperatura.

Conhecida a temperatura interior,  $T_i$ , a temperatura à superfície das paredes,  $T_{si}$ , e a humidade relativa interior, é possível caracterizar a pressão parcial de vapor interior e determinar a temperatura de saturação correspondente,  $T_{po}$ , denominada temperatura de ponto de orvalho. Para que não haja lugar a condensações numa superfície, deve verificar-se a relação  $T_{si} > T_{po}$ .

Como se pode verificar por observação da Fig. 2, quanto mais baixa a temperatura no interior, mais próxima esta é da respectiva temperatura de ponto de orvalho. Assim, o risco de ocorrerem condensações no interior de um edifício é maior para temperaturas mais baixas.

A temperatura de ponto de orvalho pode ser calculada através da seguinte expressão, proposta por Zolnier (1994):

$$T_{po} = \frac{186.4905 - 237.3 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_v}{100} \right)}{\log_{10} \left( \frac{P_v}{100} \right) - 8.2859} \quad (9)$$

#### 2.1.5. FACTORES DE INFLUENCIAM A VARIAÇÃO DA HUMIDADE

São diversos os factores que influenciam a variação da humidade relativa, ao longo do tempo, numa determinada zona de um edifício.

Os factores que interferem no balanço da humidade absoluta numa zona são essencialmente: a produção de vapor pelos utilizadores e suas actividades, a ventilação, as trocas de vapor nos compartimentos interiores e a humidade absoluta exterior.

A humidade relativa, por ser uma variável que depende da temperatura, obriga à consideração de mais outros factores, dos quais se destacam a produção de calor pelos utilizadores e suas actividades e pelos sistemas de aquecimento, a ventilação, o nível de desempenho térmico da envolvente e os ganhos solares (Ramos, 2007).

De seguida far-se-á uma pequena análise de alguns dos factores referidos, dando ênfase àqueles que têm mais importância para o caso em estudo.

##### 2.1.5.1. Clima exterior

O clima exterior tem uma enorme influência sobre o clima interior. Ora, se a temperatura do ar exterior e a radiação solar influenciam a temperatura interior, o mesmo se poderá dizer sobre o facto de a humidade absoluta exterior condicionar os valores da humidade absoluta interior, a qual por sua vez influenciará a humidade relativa no interior (Ramos, 2007).

Desta forma, revela-se muito importante o conhecimento das características do clima do local.

O clima em Portugal continental é tipicamente mediterrâneo e, apesar de ter uma dimensão muito pequena, apresenta uma variação apreciável de alguns parâmetros climáticos, tanto geograficamente como ao longo do ano. Por este motivo, os dados climáticos devem ser escolhidos consoante a região que se pretende estudar.

Na Fig. 3 pode-se observar o zonamento climático adoptado no RCCTE para Portugal continental para o Inverno e Verão. O País é dividido em três zonas climáticas de Inverno ( $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ) e em três zonas climáticas de Verão ( $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$ ) (RCCTE, 4 de Abril 2006).

A partir deste zonamento é possível obter dados climáticos necessários a estimativas de consumos energéticos.

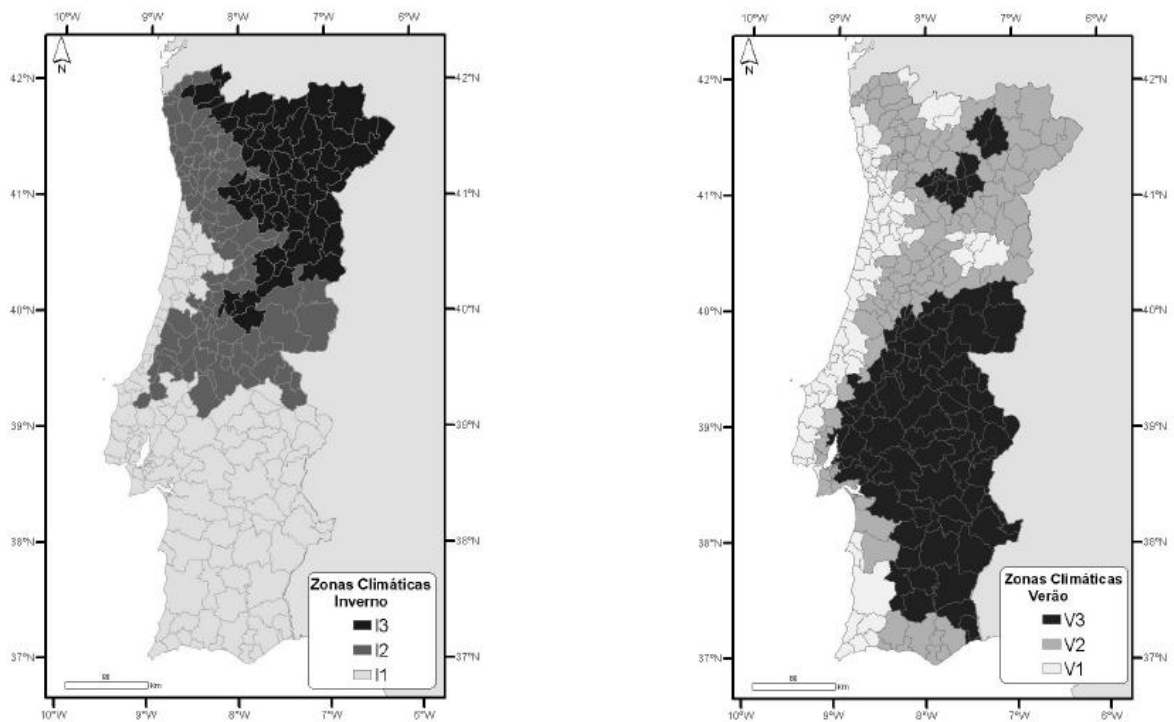


Fig. 3: Zonamento Climático de Portugal Continental, para o Inverno e Verão (RCCTE, 4 de Abril 2006)

Este tipo de dados é bastante útil em determinados tipos de estimativas, mas não para simulações higtotérmicas detalhadas. Para essas aplicações são normalmente utilizados os dados das estações climáticas que existem em diversos pontos do mundo e que fornecem valores horários dos parâmetros utilizados pelos modelos climáticos, para períodos de 30 anos.

A utilização destes dados requer um tratamento prévio que transforme os dados em bruto em bases de dados com anos de referência adequados aos estudos climáticos que se pretende realizar. Existem a nível mundial vários tipos de bases de dados de referência, como é exemplo a “*Test Reference Years*” (TRY), sendo que em Portugal foi produzido um Ano Climático de Referência para Lisboa (INMG/LNEC, 1988).

No caso de não existirem anos de referência baseados totalmente em dados medidos, pode-se utilizar programas como o METEONORM, que fornece esses dados, gerados com base em métodos estocásticos (Ramos, 2007).

Os dados climáticos de referência existentes são, na maioria das vezes, para a análise do desempenho energético de edifícios, mas não para o desempenho higrício. A grande diferença entre estes dois é que na primeira série não são gerados dados sobre a precipitação e utilizam-se valores médios para os diversos parâmetros. Ora, para uma análise do desempenho higrício são necessários valores, que não os médios, mas sim os mais severos. No entanto, a construção deste tipo de ano climático é mais complexa, pois é necessário ter em conta qual o efeito que se pretende avaliar (Ramos, 2007).

### 2.1.5.2. Utilizadores

Os utilizadores são um factor muito importante a ter em conta na avaliação da humidade relativa, pois actuam directa ou indirectamente sobre inúmeros factores que a condicionam, tendo um enorme impacto no clima interior.

Esse impacto tem vindo a ser sistematizado através de valores numéricos, que são fundamentais para a utilização de ferramentas de previsão do comportamento higrotérmico dos edifícios.

Apesar do comportamento humano ser muito variável e por isso muito difícil de generalizar, existem já diferentes obras onde se procura sistematizar a produção de vapor associada às várias actividades desempenhadas pelos utilizadores no interior dos edifícios. No Quadro 1 apresentam-se alguns dos valores citados por Raatshcen et al. (1991):

Quadro 1: Valores da produção de vapor em edifícios

<b>Fonte de Vapor</b>		<b>Valor [g/h]</b>
<i>Ser Humano</i>	<i>Baixa actividade</i>	30 - 60
	<i>Média actividade</i>	120 - 200
	<i>Muita actividade</i>	200 - 300
<i>Plantas em Vasos</i>		5 - 15
<i>Plantas de Tamanho Médio</i>		10 - 20
<i>Plantas Aquáticas</i>		6 - 8
<i>Cozinha</i>	<i>Cozinhas e trabalhar</i>	600 - 1500
	<i>Média diária</i>	100
<i>Casa de Banho</i>	<i>Banho</i>	700
	<i>Duche</i>	2600

Este tipo de valores tem especial interesse para a análise de cenários de comportamento higrotérmico de edifícios, através de ferramentas de simulação.

No Quadro 2 apresenta-se a média de produção de vapor por casa, constituída por 2 pessoas adultas mais as crianças. Estes valores, retirados de Raatshcen et al (1991) correspondem aos valores médios medidos por vários autores. Os autores citados na bibliografia apresentam valores dispersos uns dos outros, pelo que se evidencia a grande variabilidade que o comportamento humano introduz neste parâmetro.

Quadro 2: Média de produção de vapor por casa, consoante o número de crianças, [Kg/dia]

<b>Casa</b>			
<b>Sem Crianças</b>	<b>Uma Criança</b>	<b>Duas Crianças</b>	<b>Três Crianças</b>
8.20	12.10	14.10	14.40

Quanto aos parâmetros definidores do comportamento dos utentes em relação ao controlo da temperatura e ventilação do espaço, ainda é mais difícil de os quantificar, pois são subjectivos e dependem da vontade humana.

Assim, e no que diz respeito ao controlo da temperatura, cada utilizador define os valores e formas de aquecimento do espaço, dependendo da sua preocupação com os gastos e custos energéticos. Isto também se aplica ao modo como é processada a ventilação, onde é difícil definir de forma padronizada o comportamento dos utentes.

Existe no entanto regulamentação onde se definem as condições ambientes de conforto de referência (RCCTE, 4 de Abril 2006).

Estas considerações não têm como objectivo anular a sistematização do comportamento higrotérmico de edifícios através de ferramentas de simulação numérica. Pretende-se apenas chamar a atenção para as peculiaridades do comportamento humano, tendo por isso que haver o cuidado de criar cenários credíveis para os estudos numéricos, os quais os contemplem.

### 2.1.5.3. Sistemas de Ventilação

Os sistemas de ventilação assumem uma grande importância na definição do clima interior. São, aliás, absolutamente determinantes para o controlo dos níveis de humidade absoluta interior (Ramos, 2007).

A ventilação é uma troca de ar poluído por fresco e relativamente mais limpo.

O utilizador pode proceder à ventilação do espaço de forma mecânica ou por sistemas de ventilação natural. Existem também as infiltrações, também formas de troca de ar mas não concebidas explicitamente para esse fim.

Os sistemas de ventilação mecânica são os que permitem um maior controlo da taxa de renovação horária por parte do utilizador.

Por sua vez, a ventilação natural permite um controlo por parte do utente muito menor, pois este apenas pode abrir ou fechar as grelhas de ventilação. A ventilação dá-se, neste caso, consoante as diferenças de pressão causadas pela exposição ao vento e a diferença de temperatura interior-exterior, traduzido no efeito chaminé.

O regulamento RCCTE define quais os factores que influenciam este tipo de ventilação (RCCTE, 4 de Abril 2006):

- Classe de exposição ao vento;
- Estanquidade da envolvente;
- Classe de caixilharias dos vãos envidraçados;
- Área do envidraçado

No cruzamento destes dois tipos de ventilação, surgiu recentemente um novo, designado de híbrido. Este sistema aproveita as condutas e alguns componentes da ventilação natural, à qual é acoplada um equipamento mecânico que produz baixas pressões e que a assiste. Esta parte mecânica só entra em funcionamento quando é necessário. A sua activação é normalmente automática, controlada por sensores de temperaturas ou barómetros (Melão, 2009).

Estes sistemas de ventilação híbrida têm a vantagem de ter fácil manutenção, menor consumo energético e maior conforto acústico. Têm também as vantagens compostas dos dois sistemas de ventilação de que derivam, como a fiabilidade da ventilação natural e maiores rendimentos de ventilação característicos da ventilação mecânica (Ouazia, 2006).

O regulamento RCCTE define quais os níveis gerais de renovação horária a adoptar em edifícios. Para casos mais particulares, o RSECE apresenta os níveis de renovação horária a adoptar consoante o tipo de utilização do edifício.

#### 2.1.6. A IMPORTÂNCIA DA HUMIDADE PARA OS UTILIZADORES

Cada vez mais a qualidade dos edifícios é valorizada pelos seus utilizadores. Nesta noção de qualidade inserem-se, não só as características físicas dos materiais constituintes do edifício, mas também a percepção e medição destas mesmas características associadas aos objectos e às características do ar interior. Estas características podem influenciar positiva ou negativamente o conforto dos ocupantes dos edifícios, a sua produtividade e até mesmo a sua saúde.

Existem diversos factores que condicionam a qualidade do ar, como é o caso da humidade e da temperatura. Uma vez que a quantificação da humidade não é tão facilmente perceptível por parte dos utentes dos edifícios, esta variável tem vindo a ser menos valorizada em termos de classificação do ambiente interior. No entanto, esta contribui tanto quanto a temperatura para um ambiente confortável e de qualidade.

Assim, a humidade pode influenciar a vida do utilizador, pelo que se procurará de seguida definir os valores ideais relativos a esta variável.

##### 2.1.6.1. Influência da Humidade no Conforto Térmico

O conforto térmico é definido como a sensação de bem-estar que uma pessoa tem relativamente ao ambiente térmico.

Este equilíbrio térmico depende de inúmeros factores ambientais, tais como a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a velocidade e a humidade relativa do ar, o tipo de ocupação, no qual se inclui o nível de actividade e o tipo de vestuário (Ramos, 2007).

Até aos dias de hoje ainda não se conseguiu estabelecer uma relação intrínseca entre a humidade e o conforto térmico, apesar dos vários estudos já realizados. Dos estudos realizados distingue-se um, que confronta a humidade relativa e o conforto térmico (Simonson et al., 2001). Nessa investigação, conclui-se que a humidade tem um diminuto efeito no conforto do corpo como um todo, mas pode ser muito relevante para o conforto térmico pontual local, como é o caso dos órgãos do sistema respiratório.

A partir de uma expressão, em que se relacionava a percentagem de insatisfeitos,  $PD$ , com a pressão de vapor e a temperatura, Simonson et al., (2001) traçou o gráfico que se apresenta na Fig. 4.

Verifica-se que, para uma temperatura de 22 °C, se espera uma percentagem de insatisfeitos com o conforto respiratório de aproximadamente 10%, para uma humidade relativa de aproximadamente 43%. Porém, caso a temperatura esteja mais alta, de 24 °C, para a mesma humidade relativa já se teria uma percentagem de insatisfeitos de pouco menos de 20%.

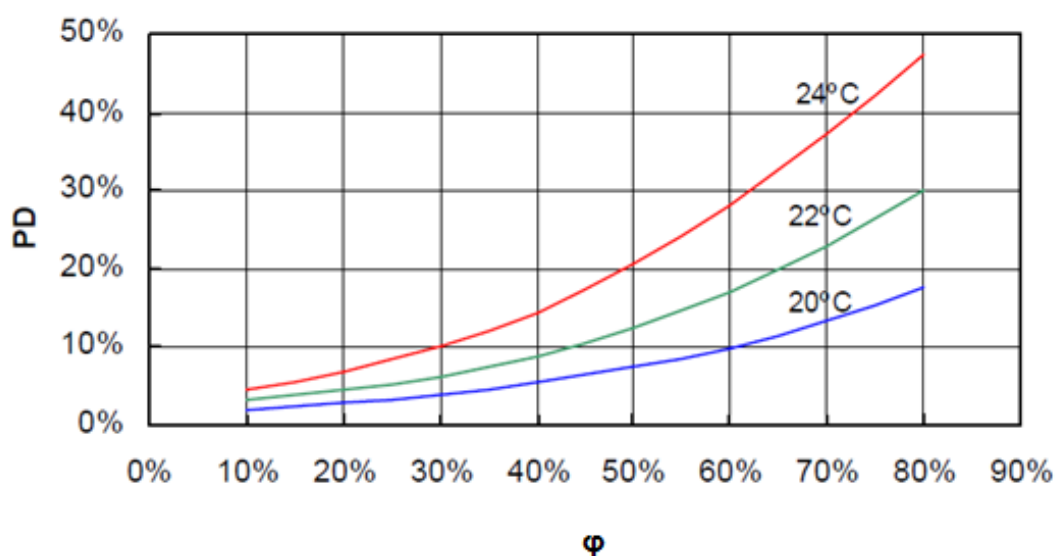


Fig. 4: Percentagem de insatisfeitos com o conforto respiratório, em função da temperatura e da humidade relativa (Ramos, 2007)

A definição das exigências de conforto térmico global encontra-se já normalizada através das normas ISO 7730 (ISO-7730, 1994) e ANSI/ASHRAE 55 (ANSI/ASHRAE-55, 1992), onde se define os valores limite de cada um dos factores ambientais. A humidade relativa máxima recomendada está compreendida entre 60% e 80%, conforme esteja associada a temperaturas mais ou menos elevadas, respectivamente. A definição destes limites corresponde, nessa norma, a uma percentagem de insatisfeitos de 10% e 15%, respectivamente. No entanto, deve-se esclarecer que ambientes com níveis de humidade relativa muito alta ou muito baixa, são sinónimos de desconforto térmico, pelo que devem ser evitados.

Quando os factores ambientais e o tipo de ocupação são conhecidos, a sensação termal da pessoa pode ser quantificada através do PMV- *Predicted Mean Vote*. Este conceito tem a vantagem de permitir avaliar a queda na produtividade dos utilizadores de um determinado edifício, devido ao baixo conforto térmico (Kosonen et al., 2004).

Na Fig. 5 apresenta-se um gráfico em que se relacionam os níveis de humidade com a perda de produtividade.

Observando a figura verifica-se que a perda de produtividade aumenta com o aumento dos níveis de humidade. Por sua vez, observa-se que, para o mesmo nível de humidade relativa, a perda de produtividade é substancialmente maior para uma subida de apenas dois graus na temperatura.

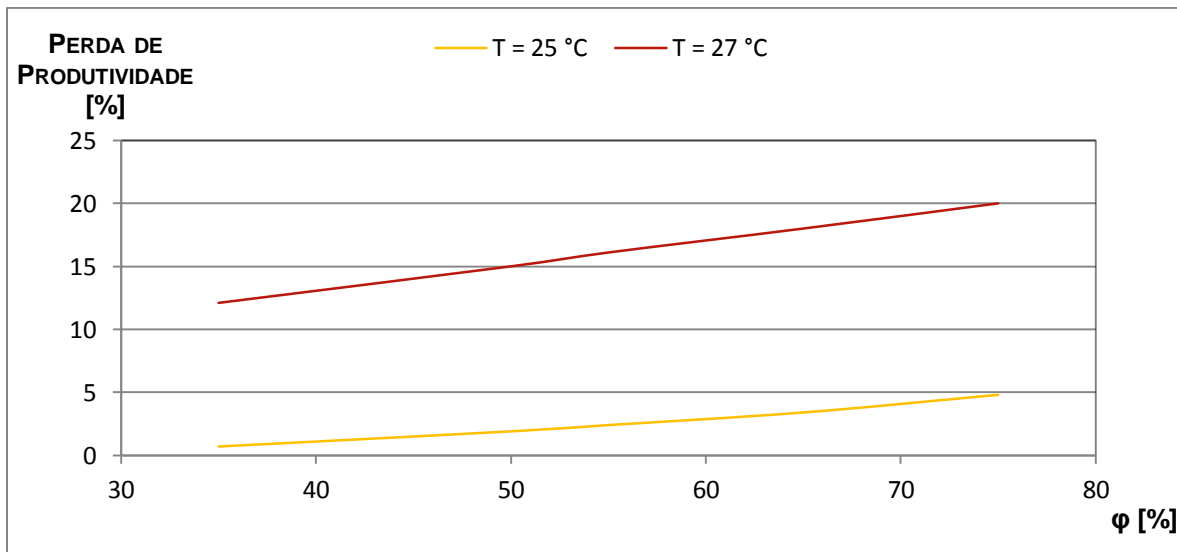


Fig. 5: Efeito da Humidade relativa na Produtividade, adaptado de (Kosonen et al., 2004)

Verifica-se assim que, apesar de a temperatura ser o factor que mais influencia a percepção de conforto térmico, a humidade relativa também é um agente a ter em conta quando se pretende quantificar este parâmetro.

#### 2.1.6.2. Influência da Humidade na degradação de materiais e de elementos construtivos

A patologia mais evidente que indica que a humidade relativa num edifício é demasiado elevada é o desenvolvimento de fungos. Esta patologia decorre da conjugação de uma série de factores, dos quais são exemplo a existência de esporos no ar, a disponibilidade de nutrientes e oxigénio em conjunto com vapor de água no ar, a existência de determinadas condições de temperatura, alcalinidade, radiação e adequado movimento de ar. Deste conjunto, a humidade assume um papel determinante para a sua ocorrência (Ramos, 2007).

Os fungos podem-se desenvolver numa vasta gama de temperaturas, variando desde 0°C até aos 50°C. Porém, tal só ocorre no caso de a humidade relativa ser sempre superior a 80% (Sedlbauer, 2001).

De referir ainda que é também determinante o tempo em que persistem os factores favoráveis ao desenvolvimento deste tipo de patologias. Ora, para que um fungo cresça e se desenvolva, as condições de temperatura e humidade referidas devem persistir durante um elevado período de tempo (Tuomo et al., 2007).

Observando a Fig. 6, para a temperatura habitual de 20°C no interior de um edifício, verifica-se que bastam 2 semanas com humidade relativa constante de 95% para potenciar o crescimento de fungos. Nas mesmas condições, para humidades na ordem dos 80%, o crescimento de fungos apenas será potenciado ao fim de 16 semanas.

As consequências mais comuns do crescimento e proliferação destes agentes microbiológicos são a deterioração dos materiais e a libertação de esporos e de odores (Ramos, 2007).

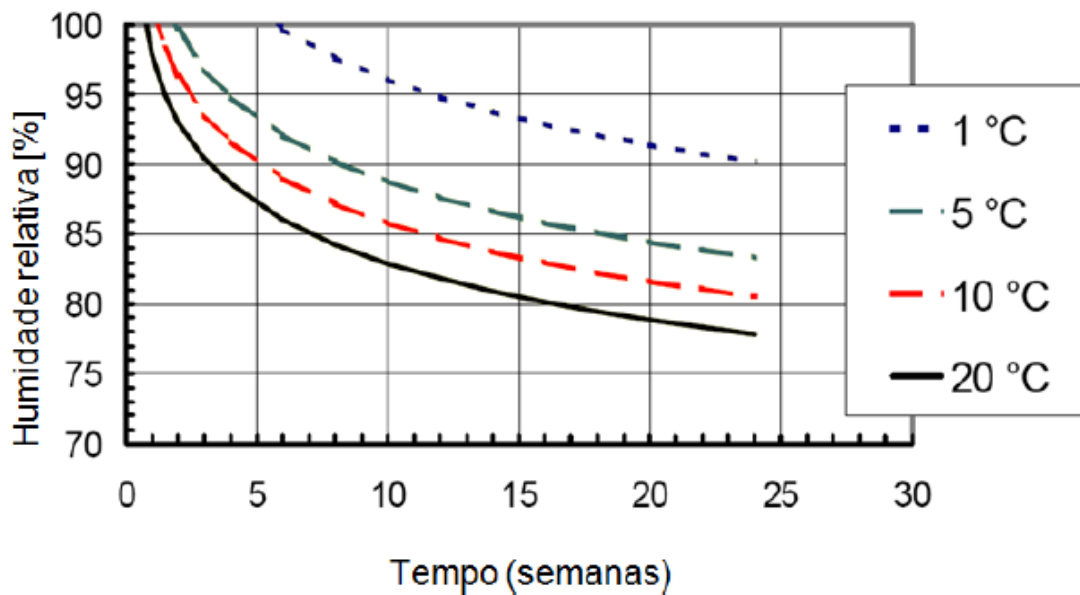


Fig. 6: Influência dos picos de humidade no crescimento dos fungos, em condições isotérmicas (Tuomo et al., 2007)

A questão dos fungos nos edifícios é um problema muito comum nos dias que correm. Torna-se por isso imperativo o controlo da humidade no interior dos edifícios de forma a impedir o progresso desta patologia.

#### 2.1.6.3. Influência da Humidade na saúde dos Utilizadores

A humidade relativa pode afectar a saúde dos seus utilizadores através de diferentes mecanismos.

O já referido desenvolvimento de fungos, além de deteriorar os materiais constituintes dos edifícios, tem consequências para os seus utilizadores, na medida em que causa o aparecimento de determinadas doenças, tais como as alergias e as micoses (Sedlbauer, 2001).

Para além dos fungos, a proliferação dos ácaros no interior das habitações está relacionada com os níveis de humidade. Um ambiente favorável ao crescimento dos ácaros é o correspondente a temperaturas e humidades relativas altas. Os ácaros não transmitem doenças, porém a exposição a determinadas proteínas que existem no seu corpo e aos seus excrementos pode causar doenças alérgicas.

Inúmeros investigadores relatam a ligação entre a humidade elevada em compartimentos e o aumento do risco de desenvolvimento de doenças respiratórias como a asma, embora sem grandes conclusões relativamente à causa desta ligação (Ramos, 2007).

Até ao momento, têm vindo a ser descritas várias consequências do elevado nível da humidade relativa em questões de saúde humana.

Não são também de descartar os problemas relacionados com esta grandeza para valores demasiado baixos. Assim sendo, estabeleceu-se o limite mínimo para o valor da humidade relativa, de modo a prevenir o risco de doenças respiratórias, que foi fixado em 30% (ASHRAE, 1997).

#### 2.1.6.4. Limites ideais para a variação da Humidade Relativa

Após a descrição dos factores influenciáveis por valores extremos de humidade relativa, pode-se por fim, estabelecer os valores limite entre os quais a humidade relativa, idealmente, deve estar.

Esta deve ter como limite inferior 30%, de forma a respeitar as exigências de saúde e entre 60% e 80% como limite superior, tendo em conta o controlo de ácaros e as exigências de conforto térmico (Ramos, 2007).

## 2.2. APRESENTAÇÃO GERAL DO PROGRAMA ENERGYPLUS

O programa EnergyPlus é um programa utilizado por engenheiros, arquitectos e investigadores, que tem como objectivo efectuar uma análise em termos de energia total consumida pelo edifício. Este programa foi criado no final dos anos 70, e teve origem no desenvolvimento e aperfeiçoamento de outros dois programas já existentes, o DOE-2 e o BLAST (EnergyPlus, 2010b).

Estes dois primeiros programas já abordavam a temática do consumo de energia dos edifícios. Porém, ao revelarem-se antiquados, foi desenvolvido um novo instrumento que engloba estes dois, o EnergyPlus. Tal como os programas que lhe deram origem, o EnergyPlus efectua uma análise em termos de energia consumida e em cargas térmicas do edifício, devendo o utilizador introduzir os dados de uma perspectiva de construção física (EnergyPlus, 2010b).

Este programa permite, além da obtenção do balanço energético de um determinado edifício ou a sua respectiva necessidade energética, dar a hipótese ao investigador de, através da alteração de pequenos parâmetros isolados, verificar quais as repercussões sobre variáveis tão importantes como a temperatura superficial interior nas paredes do edifício e a sua humidade relativa.

Assim, há que ter em consideração a definição de zona no programa: um ou vários espaços com as mesmas condições térmicas, ou seja, cada zona está a temperatura uniforme mas há transferências e armazenamento de calor, nas suas fronteiras ou mesmo no interior do volume de ar.

Este volume é definido como um nó, para efeitos de cálculo. O ar contido neste volume está perfeitamente misturado e as condições do espaço, temperatura, humidade e pressão do ar são iguais em toda a zona.

A Fig. 7 ilustra o conceito de zona e apresenta todos os elementos que colaboram nas trocas de ar com a mesma.

As soluções são resultantes de um processo iterativo, que as faz convergir para um determinado valor, possibilitando a saída dos dados anualmente, diariamente, ou até mesmo, de hora a hora.

Permite definir quais os horários de funcionamento das cargas térmicas e ainda incluir ficheiros com os dados climáticos de uma certa região dando-lhe uma maior flexibilidade e abrangência, de forma a possibilitar a adaptabilidade a diversos tipos de condições climatéricas (EnergyPlus, 2010b).

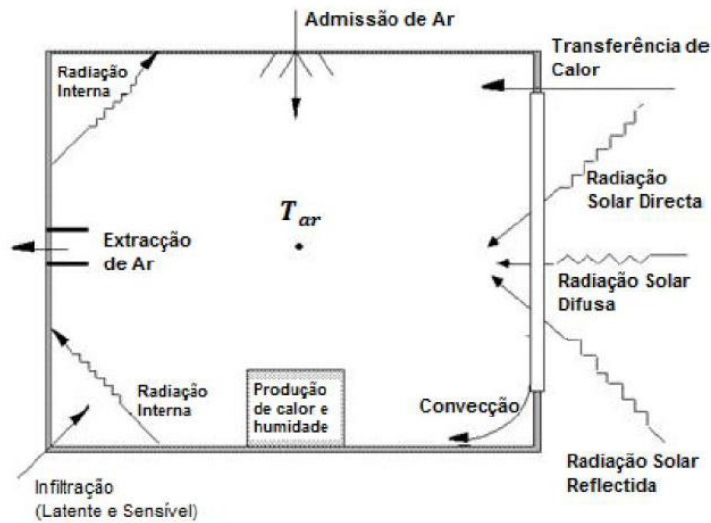


Fig. 7: Zona térmica de um Edifício, adaptado de (Esteves, 2011)

O algoritmo de cálculo inclui modelos de condução de calor através dos elementos de construção, combinando a humidade e adsorção/desadsorção. Oferece ainda a possibilidade do cálculo do conforto dos ocupantes, controlo dos sistemas de AVAC e ainda calcula a poluição atmosférica (EnergyPlus, 2010b).

Terminada a apresentação sucinta do programa em estudo, proceder-se-á a uma pequena exposição da metodologia de cálculo das variáveis mais importantes para o caso em estudo, objecto de aprofundamento nesta dissertação.

### 2.3. MODELAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR COM O ENERGYPLUS

#### 2.3.1. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA TEMPERATURA INTERIOR

O programa formula balanços energéticos no interior para o cálculo da temperatura interior e resolve as equações resultantes usando uma aproximação “previsão-correcção”.

A equação de balanço energético no interior é a seguinte:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) + m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + Q_{sys} \quad (10)$$

Onde:

$C_z \frac{dT_z}{dt}$  – É a energia total armazenada no ar de cada zona;

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$  – É a soma dos ganhos internos por convecção;

$\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$  – É a transferência de calor entre as diferentes zonas térmicas do edifício;

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} m_i C_p (T_{zi} - T_z)$  – É a produção de calor em cada zona;

$m_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$  – É a transferência de calor devido à infiltração do ar exterior;

$Q_{sys}$  – É a transferência de calor pela saída de ar do edifício.

O edifício poderá ter um sistema de climatização de forma a responder às necessidades de aquecimento ou arrefecimento. A equação que traduz tal sistema, formulada através da diferença entre o ar fornecido ao sistema e o ar que sai da zona, é a seguinte:

$$\dot{Q}_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (11)$$

Esta equação assume que o fornecimento de massa de ar é exactamente igual à soma das taxas de fluxo de ar que saem da zona através do sistema de ar condicionado (EnergyPlus, 2010a).

Substituindo a equação (11) na equação (10) resulta uma que traduz que a energia total armazenada em cada zona térmica do edifício é igual ao balanço entre as cargas que entram e aquelas que saem do sistema (EnergyPlus, 2010a):

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \quad (12)$$

O programa EnergyPlus fornece três diferentes algoritmos para resolver a equação (12). Dois deles utilizam o método das diferenças finitas e outro usa a solução analítica (EnergyPlus, 2010a). Por facilidade de compreensão apresenta-se a derivada da equação (12) utilizando o método das diferenças finitas.

$$\frac{dT}{dt} = (\delta t)^{-1} (T_z^t - T_z^{t-\delta t}) + O(\delta t) \quad (13)$$

Porém, o método utilizado revela limitações na aplicação da fórmula final, em ordens reduzidas.

Foi experimentada por diferentes autores a utilização de equações até à quarta e quinta ordem, tendo revelado melhores resultados o uso de aproximações de terceira ordem (EnergyPlus, 2010a), equação representada de seguida:

$$\left. \frac{dT_z}{dt} \right|_t \approx (\delta t)^{-1} \left( \frac{11}{6} T_z^t - 3 T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) + O(\delta t^3) \quad (14)$$

Aplicando a equação (14) na equação (12) e agrupando os termos dos quais se sabe a temperatura média do ar à esquerda, mantendo à direita aqueles sobre os quais não se conhece a temperatura no instante  $t$ , obtém-se:

$$\begin{aligned} C_z (\delta t)^{-1} \left( \frac{11}{6} T_z^t - 3 T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right) \\ = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) \\ + \dot{m}_{sys} C_p (T_{sup} - T_z) \end{aligned} \quad (15)$$

Rearranjando a equação (15) em ordem à temperatura obtém-se:

$$T_z^t = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i T_{si} + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p T_{zi} + \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty} + \dot{m}_{sys} C_p T_{sup} - \left( \frac{C_z}{\delta t} \right) \left( -3 T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2} T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3} T_z^{t-3\delta t} \right)}{\left( \frac{11}{6} \right) \frac{C_z}{\delta t} + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p + \dot{m}_{inf} C_p + \dot{m}_{sys} C} \quad (16)$$

Todo o algoritmo referido corresponde ao cálculo de apenas uma zona. Mas neste cálculo intervêm todas as zonas. Assim, o programa parte deste cálculo, de uma zona, para as seguintes, ajustando o valor da temperatura, usando o processo referido como “previsão-correcção”.

### 2.3.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR

Os modelos de transferência de calor utilizados pelo EnergyPlus seguem os princípios fundamentais de transferência de calor (EnergyPlus, 2010a).

O modelo de cálculo desta variável foi evoluindo e neste momento o programa inclui na sua metodologia de cálculo a simulação dos movimentos do fluxo de calor nas construções, de forma a incluir mudanças de fase. Permite ainda a modelação de materiais com diferente condutibilidade térmica, ou seja a inclusão de diferentes camadas no mesmo elemento construtivo, e possibilita ainda uma simulação do comportamento térmico do edifício em curtos espaços de tempo, de forma a dar resultados semelhantes aos do sistema real (EnergyPlus, 2010a).

Uma das ferramentas que permite ao programa desempenhar estas funções é a inclusão de um algoritmo que utiliza um modelo de diferenças finitas de condução diferencial de calor numa rede constituída por diferentes nós (EnergyPlus, 2010a).

Esse algoritmo é representado de seguida, para um determinado nó:

$$\frac{\rho C_p \Delta x (T_{i,novo} - T_{i,antigo})}{\Delta t} = \frac{\lambda (T_{i-1,novo} - T_{i,novo})}{\Delta x} + \frac{\lambda (T_{i+1,novo} - T_{i,novo})}{\Delta x} \quad (17)$$

Onde:

$\rho$  - É a densidade do material;

$\Delta t$  - É o intervalo de tempo considerado;

$\Delta x$  - É a diferença finita de espessura entre camadas;

$C_p$  - É o calor específico do material;

$\lambda$  - É a condutibilidade térmica do material;

$T$  - É a temperatura do nó:

$i$  - Nó em estudo;

$i + 1$  - Nó adjacente do lado interior;

$i - 1$  - Nó adjacente do lado exterior;

, *novo* - No final do intervalo de tempo considerado;

, *antigo* - No final do intervalo de tempo anterior.

## 2.4. MODELAÇÃO DA VARIAÇÃO DA HUMIDADE

### 2.4.1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia estão disponíveis vários modelos numéricos que descrevem a difusão do vapor de água numa zona e prevêem a humidade interior (Woloszyn et al., 2006).

O cálculo completo do impacto do armazenamento de vapor de água numa zona interior confinada é complexo. O conhecimento detalhado da geometria do compartimento e propriedades dos vários materiais nele incluídos é necessária, assim como os próprios materiais de construção do edifício, tais como os acabamentos das paredes e do chão, mobiliário e até os livros e outros pequenos materiais higroscópicos. Na maioria das situações este tipo de informação não está disponível. Por este motivo, a troca de vapor de água entre os vários materiais é definida por modelos simplificados que procuram

simular, na medida possível, a realidade. Apesar destes modelos descreverem apenas parte da complexa realidade física, eles permitem-nos compreender o fenómeno. Para alguns casos eles podem até permitir uma avaliação adequada das dinâmicas da humidade, sendo assim muito úteis. O programa EnergyPlus inclui modelos simplificados para simular a humidade relativa interior (Woloszyn et al., 2006).

#### 2.4.2. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA HUMIDADE RELATIVA INTERIOR COM O ENERGYPLUS

A humidade relativa interior é um importante parâmetro que influencia o desempenho higrotérmico do edifício e as condições da ambiência interior. De forma a prever a humidade interior numa zona, tendo em conta as condições físicas presentes na mesma, e projectar aperfeiçoamentos, é necessário encontrar modelos que simulem com a melhor exactidão a realidade.

A variação da humidade numa zona é o resultado do balanço de diferentes fluxos. Pode ser traduzida pela seguinte expressão:

$$\rho_{ar} V_z C_w \frac{dW_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{massa} + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} A_i h_{m_i} \rho_{ar_z} (W_{superficie_i} - W_z^t) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i (W_{z_i} - W_z^t) + \dot{m}_{inf} (W_{\infty} - W_z^t) + \dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t) \quad (18)$$

Onde:

$\rho_{ar} V C_w \frac{dW_z}{dt}$  – É a variação de humidade do ar da zona;

$\sum_{i=1}^{N_{sl}} k g_{massa}$  – É a quantidade, em massa, de vapor de água produzido na zona;

$\sum_{i=1}^{N_{superficies}} A_i h_{m_i} \rho_{ar_z} (W_{superficie_i} - W_z^t)$  – É a transferência de vapor de água por convecção, entre o ar e a superfície das paredes;

$\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i (W_{z_i} - W_z^t)$  – É troca de vapor de água entre outras zonas;

$\dot{m}_{inf} (W_{\infty} - W_z^t)$  – São os ganhos/perdas de vapor de água por infiltração;

$\dot{m}_{sys} (W_{sup} - W_z^t)$  – É a adição/remoção de vapor de água pelo sistema AVAC.

Para a resolução da equação (18) utilizam-se os métodos numéricos aproximados já referidos nas secções anteriores para resolver as equações da temperatura, seguindo o mesmo formato de resolução.

Para fazer os ajustes de cálculo devido às transferências de vapor de água entre zonas, o programa utiliza, uma vez mais, o método numérico de cálculo de “previsão-correcção”.

#### 2.4.3. EFFECTIVE MOISTURE PENETRATION DEPTH

##### 2.4.3.1. Introdução

Os códigos computacionais existentes para simular a interacção entre o ar interior de uma zona térmica e os materiais higroscópicos nela contidos podem ser divididos em dois grupos: códigos que usam modelos simplificados e códigos complexos que usam informação detalhada das transferências de calor e de massa no edifício. Estes modelos fornecem informação mais fiável e detalhada da humidade interior e do comportamento higrotérmico do edifício mas são modelos muito morosos pelo que não são usados com tanta frequência (Woloszyn et al., 2006).

O modelo EMPD é uma abordagem simplificada para simular a adsorção e desadsorção de vapor de água à superfície das paredes. Este último assume que apenas uma fina camada, localizada à superfície da parede interior, interage com o ar e conseqüente vapor de água nele contido. Isto implica que a difusão de vapor de água entre o exterior e o interior através das paredes é desprezada e a fina camada adsorve e liberta humidade para o compartimento interior quando exposta a variações de humidade no ar (Woloszyn et al., 2006).

#### 2.4.3.2. Metodologia de Cálculo do EMPD com o EnergyPlus

O foco principal desta tese é a análise da contribuição da humidade para o desenvolvimento de patologias no edifício. Assim, de forma a poder simular com o programa EnergyPlus o aparecimento de humidade no ar, dentro do edifício e também na superfície das paredes, utilizou-se o modelo EMPD.

O modelo EMPD assume que uma fina camada, na superfície mais interior da parede, se comporta de forma dinâmica e efectua trocas vapor de água com o ar interior, quando exposta a variações de humidade. Para pequenos períodos de tempo, em que esta variação não é muito significativa, e a adsorção/desadsorção desta camada é muito baixa, o conceito de EMPD revela-se uma aproximação razoável (EnergyPlus, 2010a).

Por outras palavras, a seguinte expressão tem que ser válida:

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{du}{dt} dt = 0 \quad (19)$$

Onde  $t_1$  e  $t_2$  representam, respectivamente, o momento de início e final do período de adsorção/desadsorção. O modelo EMPD concentra a adsorção total do revestimento na fina camada superficial,  $\delta_M$ , considerando-a constante e desprezando o seu efeito na restante espessura,  $L$  (EnergyPlus, 2010a).

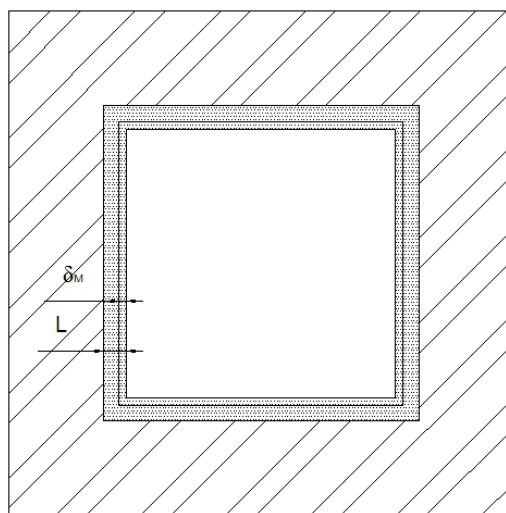


Fig. 8: Representação esquemática da camada de adsorção

Então a equação (19) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\int_0^L u(x) dx = u \delta_M \quad (20)$$

Para a maioria dos materiais de construção, a equação de adsorção de água, em equilíbrio isotérmico, pode ser definida da seguinte forma:

$$u = a\varphi^b + c\varphi^d \quad (21)$$

Onde:

$$\varphi \approx \frac{W^*}{W_{sat}^*} \quad (22)$$

E

$$W_{sat}^* = \frac{1}{R_v \rho_a T^*} e^{23,7093 - \frac{4111}{T^* - 35,45}} \quad (23)$$

E os parâmetros  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são coeficientes que relacionam a humidade nos materiais com a humidade relativa no ar.

Resultando a equação (21) numa função dependente das variáveis  $W^*$  e  $T^*$ . Esta equação pode ser derivada relativamente ao tempo, resultando:

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial W^*} \frac{dW^*}{dt} + \frac{\partial u}{\partial T^*} \frac{dT^*}{dt} = A_T \frac{dW^*}{dt} - B_\rho \frac{dT^*}{dt} \quad (24)$$

Onde  $A_T$  e  $B_\rho$  são coeficientes relativos à humidade e à temperatura, respectivamente.

A equação de transferência de massa do ar para o sólido é:

$$(A\rho_b\delta_M)_i \frac{du_i}{dt} = h_{M,i}A_i(W_r - W_i^*) \quad (25)$$

Usando as equações (24) e (25) obtém-se finalmente a que define a transferência de vapor de água para a superfície interna da parede:

$$(A_i\rho_b\delta_MA_T)_i \frac{dW_i^*}{dt} = h_{M,i}A_i(W_r - W_i^*) + (A\rho_b\delta_MB_\rho)_i \frac{dT_i^*}{dt} \quad (26)$$

A principal dificuldade do uso deste método de cálculo é a obtenção do valor de  $\delta_M$ , o qual à partida não é conhecido e o modelo de cálculo não prevê a sua obtenção.

Dois investigadores, Cunningham (2003) e Hagentoft (2001) referem que esta fina camada superficial está associada às flutuações cíclicas de pressão típicas, na superfície da parede (Woloszyn et al., 2006). Assim, deduziram a seguinte expressão empírica que relaciona esta variável com a variação da pressão de vapor, para um determinado período de tempo:

$$\delta_M = \sqrt{\frac{\delta \cdot p_{v,sat} \cdot t_p}{\rho \cdot \xi \cdot \pi}} \quad (27)$$

Onde:

$\delta$  – Representa a permeabilidade ao vapor;

$p_{v,sat}$  – É a pressão de saturação;

$t_p$  – É o período de um ciclo de variação de Humidade;

$\xi = \left| \frac{\Delta\varphi}{\Delta\tau} \right|$  – Representa a capacidade higroscópica específica do material.

Este valor é tipicamente da ordem dos milímetros para ciclos diários de variação da humidade e da ordem dos centímetros para ciclos anuais.

#### 2.4.3.3. Estudos prévios desenvolvidos

Dois investigadores eslovacos, Olga Koronthalyova e Peter Mihalka, desenvolveram um estudo no *Institute of Construction and Architecture*, onde avaliaram a precisão do modelo simplificado EMPD através da comparação com outros mais complexos.

Esta avaliação do modelo EMPD foi feita para diferentes estados de humidade, condições de ventilação e mudanças de estados climáticos e de temperatura. A análise foi limitada a casos de apenas uma zona climática, materiais com propriedades higroscópicas constantes e sem considerar a transferência de vapor de água através das paredes de separação exterior-interior (Koronthalyova et al., 2008).

Neste estudo concluiu-se que as aproximações do modelo EMPD foram satisfatórias para casos em que a espessura da camada higroscópica é limitada e localizada e em condições em que as produções de humidade e de ventilação eram regulares e cíclicas.

Cunningham (1992) estudou o conceito de “effective penetration depth” e chegou a conclusões similares. Um modelo simplificado usado para o cálculo das amplitudes de variações da humidade e seus valores médios resulta numa boa aproximação à solução exacta, para variações cíclicas desta variável. Sugere, aliás, que este conceito tem uma correspondência com um outro: a “resistência efectiva”, referindo que o conceito de “effective penetration depth” deve ser considerado como uma quantidade física universal e não apenas uma aproximação ou um artefacto decorrente de simplificações.

Procurando reformular o estudo desenvolvido por Cunningham (1992), Abadie et al. (2009) refere que esta quantidade física não é a mesma que a utilizada no modelo EMPD. Se fossem iguais, o material teria que ser suficientemente grande para permitir a distinção entre a camada de superfície, onde o teor de humidade varia com o tempo e o resto do material, onde este permanece constante. Refere então o TMPD, “True Moisture Penetration Depth”, valor real da camada de adsorção, com as mesmas características da camada teórica, mas com menor espessura. Nesta região, a mesma quantidade de vapor de água entra e sai do material durante um período cíclico.



# 3

## DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO

### 3.1. DESCRIÇÃO DO CASO EM ESTUDO

#### 3.1.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada, de forma muito sucinta, a descrição do edifício estudado. Será feita uma breve referência à sua história e às particularidades físicas do edifício, revelantes para a simulação efectuada.

Sendo este estudo uma continuação de outros anteriormente realizados nesta faculdade, (Esteves, 2011; Santos, 2010), este capítulo não será muito aprofundado, apenas sendo feito um enquadramento do edifício estudado, e apresentados os aspectos mais relevantes relativamente à envolvente.

#### 3.1.2. APRESENTAÇÃO GERAL DO EDIFÍCIO

O edifício em estudo é uma escola localizada na freguesia de Gueifães, concelho da Maia.

Esta escola inclui-se no grupo de escolas construídas durante a década de 70, em que havia uma grande preocupação com a alfabetização e uma necessidade de implementação do modelo previamente desenvolvido na Europa que abrangia a educação de todos os extractos sociais (Teodoro, 2003).

As escolas deste grupo, denominadas escolas modulares, têm características muito idênticas entre si, uma vez que foram erguidas a partir de um conjunto de projetos-tipo, com base em soluções que permitissem rapidez e economia na execução. Nestes projectos, os diferentes blocos ou pavilhões estão ligados por galerias exteriores cobertas e não há qualquer tipo de preocupação com a ornamentação do edifício (ParqueEscolar, 2011).

Iniciou o seu funcionamento em 1982 como secção da escola preparatória da Maia, passando a ser independente desta em 1983 e mudando de nome para Escola Preparatória de Gueifães.

Como tipologia de escola preparatória, tem um bloco com piso e meio onde se encontra a direcção, secretaria, refeitório, biblioteca e sala polivalente. Os restantes blocos são reservados às salas de aulas, com um só piso, de planta rectangular e um pátio central descoberto. A circulação interna faz-se através de corredores interiores e a ligação entre blocos é pelo exterior, através de galerias. Este tipo de solução foi utilizado em várias zonas do país com pequenas adaptações, de acordo com a dimensão da escola, não tendo em conta as variações climáticas da região (ParqueEscolar, 2011).

Em 1985 dá-se início à ampliação, que ficou concluída em 1986. As novas instalações foram inauguradas com 750 alunos, divididos por 26 turmas. Logo no primeiro ano de utilização, por lotação

do espaço, sofre uma ampliação, sendo-lhe acrescentado mais um bloco com 7 salas de aula. Em 2001 adoptou o nome EB 2,3 de Gueifães, que se mantém até hoje, tendo à data de 2005 um total de 803 alunos (Gueifães, 2011).

Para o estudo em questão, escolheu-se um bloco, que serviu de modelo à análise higtotérmica do edifício. Este bloco, apesar de mais pequeno, tem o mesmo tipo de construção e de ocupação que os demais. Está dividido em duas salas de aula, cada uma com capacidade de cerca de 25 lugares.

De seguida, na Fig. 9 apresenta-se uma vista aérea do edifício, onde o bloco estudado se encontra realçado a branco:

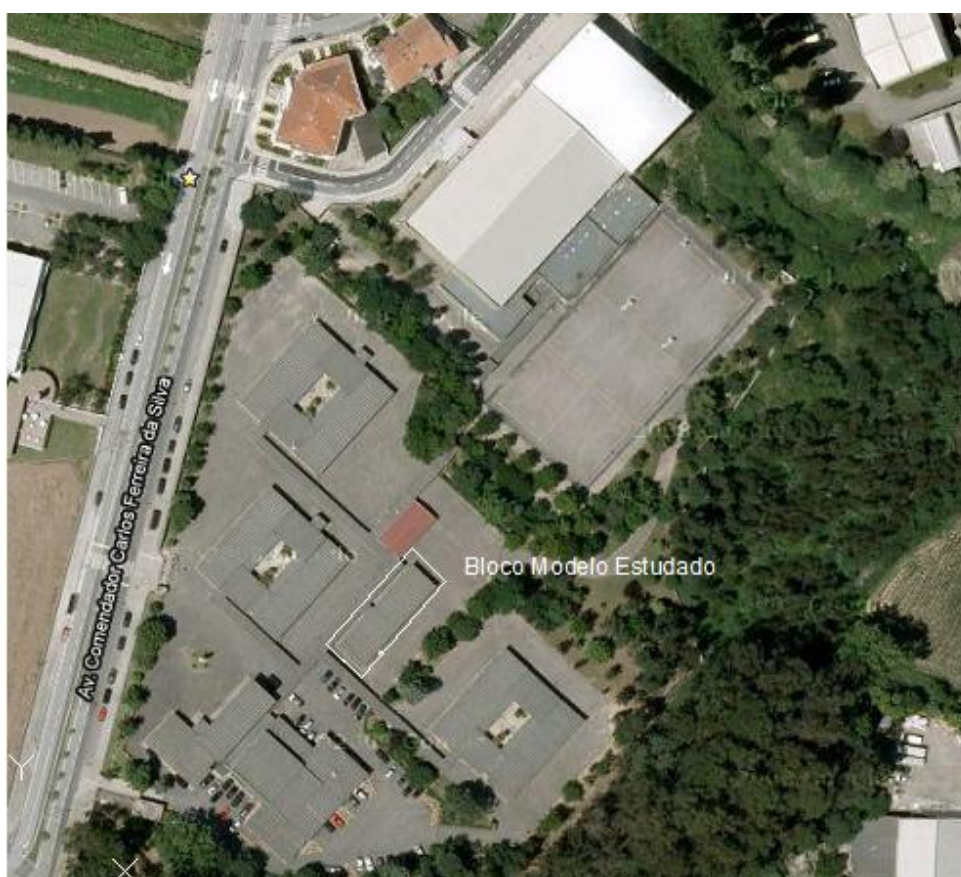


Fig. 9: Vista aérea do edifício

### 3.1.3. ENVOLVENTE

Alguns dos aspectos relativos à envolvente do edifício são muito importantes uma vez que, como já referido anteriormente, são influentes na manifestação das patologias do edifício.

Relativamente ao caso em estudo, é de referir que este edifício se localiza numa zona em que não há grandes edificações nas suas proximidades, considerando-se mesmo quase isolado. O clima é o típico da cidade do Porto, temperado, onde as temperaturas não descem aos valores negativos apesar de próximas nos meses mais frios, e não ultrapassando os 30°C nos meses de Verão.

A escola tem um horário de ocupação característico, relativo ao período lectivo. Uma vez que foram utilizados os dados relativos aos trabalhos realizados anteriormente, considerou-se o período relativo

ao ano escolar 2009/10. Do período escolar retirou-se os dias em que houve interrupções, nas férias escolares. Apresentam-se de seguida dois quadros que resumem os períodos de aulas e as respectivas interrupções:

Quadro 3: Calendário escolar 2009/10 (Santos, 2010)

<i>Início</i>	<i>Fim</i>
10-15 de Setembro	18 de Dezembro
4 de Janeiro	26 de Março
12 de Abril	8-18 de Junho

Quadro 4: Interrupções lectivas 2009/10 (Santos, 2010)

<i>Interrupções</i>	<i>Datas</i>
1ª	19 de Dezembro a 3 de Janeiro
2ª	15 de Fevereiro a 17 de Fevereiro
3ª	27 de Março a 11 de Abril

Nos dias em que o edifício está ocupado, as aulas iniciam-se entre as 8 e as 9 horas, terminando entre as 18 e as 19 horas. Entre as 13 horas e as 14 horas há uma paragem para o almoço (Santos, 2010).

Este período de ocupação do edifício revela-se uma variável importante, uma vez que influencia também o período de uso de equipamentos de iluminação e as exigências de renovação do ar. É também, apesar de indirectamente, relevante para a consideração dos ganhos internos, já que estes são gerados pelos ocupantes e pela iluminação.

Sendo a actividade lectiva do tipo sedentária, considerou-se uma taxa metabólica de 70 W/m<sup>2</sup> para os ocupantes. Tal traduz-se numa produção média de 126 W/ocupante (Santos, 2010).

Quanto à iluminação, considerou-se uma potência de 15 W/m<sup>2</sup> (Santos, 2010).

O programa EnergyPlus efectua o cálculo expedito da produção de vapor de água pelos ocupantes, consoante o número de ocupantes do edifício.

Há que ter também em conta as renovações do ar, factor importante para a qualidade do ar interior. Estas renovações podem ser efectuadas de forma natural, abrindo janelas, ou com orifícios permanentes nas fachadas ou de forma artificial, munidas de dispositivos mecânicos.

Neste momento este edifício não tem qualquer dispositivo de renovação de ar que garanta a ventilação necessária, porém, com o regulamento actual, prevê-se a necessidade de instalação de dispositivos de renovação de ar. Assim, de futuro, aquando das necessárias obras de Reabilitação do edifício, estes dispositivos terão que ser instalados.

Assim, e como o objectivo deste estudo é a optimização das condições interiores do edifício, considerou-se a renovação de ar prevista no RSECE para escolas, de 30 m<sup>3</sup>/h por ocupante (RSECE, 4 de Abril de 2006). Para o edifício em questão, tal equivale a 2,2 renovações por hora. No entanto, quando o bloco se encontra desocupado, não há necessidade de renovação mecânica. Há que ter apenas em consideração as infiltrações de ar pelas diversas aberturas na fachada e também a ventilação natural. Foi tomado como valor de referência 0,6 renovações horárias para estes momentos (RCCTE, 4 de Abril 2006).

Não se introduziu qualquer sistema de aquecimento no edifício a estudar.

Quanto à envolvente opaca do bloco em estudo, em planta ilustrado na Fig. 10, existem duas salas de aula divididas através de uma parede interior. Porém, esta não foi considerada no estudo, porque ambas as salas têm o mesmo comportamento, considerando-se apenas uma zona térmica.

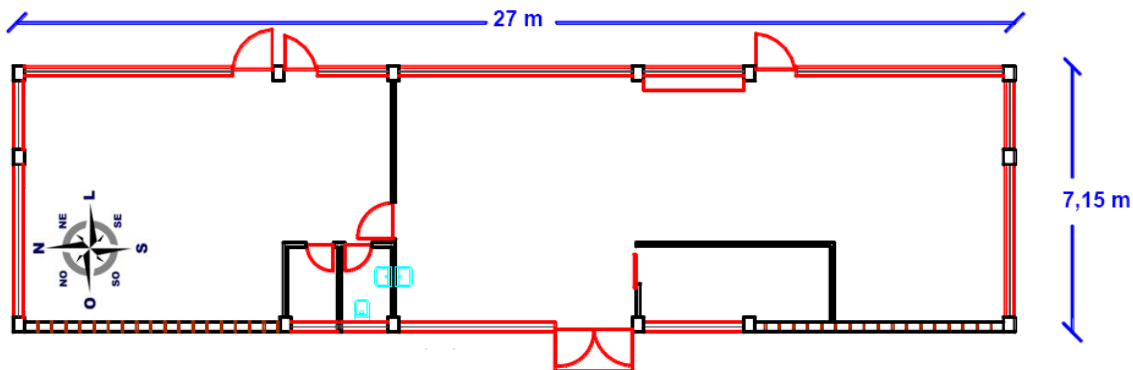


Fig. 10: Planta do bloco em estudo. Adaptado de (Santos, 2010)

A fachada principal, voltada a Oeste, é construída em tijolo maciço e betão pintado com tinta amarela (Fig. 11):



Fig. 11: Fachada principal do bloco (Santos, 2010)

As restantes fracções, incluindo o tecto e o pavimento, são apenas em betão à vista (Santos, 2010).

Todas as fachadas têm grandes superfícies envidraçadas, sendo em maior percentagem na fachada voltada a Este (Santos, 2010), ilustrada na Fig. 12:



Fig. 12: Fachada Este do bloco (Santos, 2010)

A laje de cobertura está protegida com placas de fibrocimento. Essas placas, com cerca de 1,5m salientes à fachada do edifício, além de o protegerem, funcionam também como palas de sombreamento.

Finalmente, para o estudo específico desta dissertação, foi considerada uma pintura adicional nas paredes internas do edifício, de forma a otimizar a humidade relativa no interior do mesmo. Tal será referido detalhadamente no próximo capítulo.

## **3.2. ESTUDOS PREVIAMENTE DESENVOLVIDOS**

### **3.2.1. INTRODUÇÃO**

Pretende-se neste subcapítulo fazer uma breve exposição dos trabalhos desenvolvidos anteriormente, aos quais esta dissertação procurou fazer continuidade.

O objectivo final é comum a todos os trabalhos: aperfeiçoamento da construção, tornando os edifícios mais confortáveis, com maior qualidade, não só física mas também do ponto de vista do ambiente interior, tornando-os mais eficientes.

Ao longo de cada um destes estudos, tem-se vindo a chegar cada vez mais perto do objectivo final. É necessário conhecer os estudos realizados anteriormente por cada uma das outras estudantes para poder cruzar informação e conhecimento de forma a permitir um avanço no processo de optimização.

Todas as condições simuladas nestes estudos são idênticas e iguais às referidas no subcapítulo anterior, apenas se variando os parâmetros que se pretende optimizar.

### **3.2.2. OPTIMIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA TÉRMICA DA ENVOLVENTE DE EDIFÍCIOS ESCOLARES**

Primeiro trabalho desenvolvido no estudo da escola, (Santos, 2010). Focou-se no estudo da resistência térmica da envolvente do edifício, concentrando as simulações na variação da espessura do isolamento, com o objectivo de optimizar esta variável.

Do estudo desenvolvido foram retiradas inúmeras conclusões importantes, que serão descritas resumidamente:

- Quando simulado sem isolamento, o edifício apresentava condensações superficiais nos elementos opacos em 33 dias;
- O bloco escolar apresentava valores de humidade relativa bastante elevados, o que poderá prejudicar a saúde dos alunos e afectar a sua capacidade de aprendizagem, devido à falta de capacidade de concentração;
- O valor da espessura a adoptar na reabilitação do edifício, para o qual há um equilíbrio entre as vantagens de comportamento higrotérmico e a área útil ocupada pelo acréscimo do material à envolvente, seria entre 4 e 5 cm de espessura de isolamento térmico;
- O valor de espessura de isolamento térmico, simulado no programa EnergyPlus nas condições referidas, para o qual se eliminam as condensações na totalidade, é 9 cm. Este valor não foi considerado, uma vez que ocuparia uma parcela muito significativa da área útil do espaço;
- Para eleger de forma concreta qual a espessura de isolamento a adoptar no edifício ter-se-ia que realizar uma análise de parâmetros, tais como o custo da solução, o esquema de ventilação e de aquecimento/arrefecimento a adoptar, qual o conforto térmico mínimo, etc.

Esta dissertação efectuou, em paralelo com a simulação do EnergyPlus, um teste com um programa de optimização, no qual, por ainda estar numa fase muito primordial de desenvolvimento, se obtiveram valores um pouco divergentes dos alcançados no programa EnergyPlus. Porém, este tem algum interesse na óptica do desenvolvimento, já que tem uma utilização mais intuitiva, menos trabalhosa e menos complexa.

### 3.2.3. OPTIMIZAÇÃO DA ENVOLVENTE EXTERIOR PARA MINIMIZAÇÃO DO RISCO DE CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS

Tese desenvolvida na continuação da anterior, por Esteves (2011) e onde se concentrou o estudo na optimização térmica da envolvente exterior do edifício, com o objectivo de minimizar o risco de condensações. Procurou-se, portanto, otimizar não só o isolamento térmico das superfícies opacas mas também a resistência térmica dos envidraçados, chegando às seguintes conclusões principais:

- A melhoria do coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados e do factor solar dos vidros reflectiu-se no aumento das temperaturas interior e superficial interior do edifício. Porém, tal não resolveu o problema das condensações superficiais internas, que apenas eram eliminadas com a colocação do isolamento térmico;
- A humidade relativa interior, nas condições simuladas, apresentava valores elevados durante todo o ano;
- A inércia térmica era notória, mesmo com o aumento da espessura de isolamento térmico;
- Os ganhos solares no interior do bloco diminuiriam com o aperfeiçoamento das características dos envidraçados, em consequência da alteração dos coeficientes de transmissão térmica e dos factores solares dos envidraçados. Da mesma forma, esta melhoria nas características acarreta benefícios ao comportamento higrotérmico do edifício, pois reduz as perdas de calor pelas janelas;
- Caso se realizasse uma análise custo/benefício dos valores propostos no ponto anterior, chegar-se-ia à conclusão de que uma melhoria do coeficiente de transmissão térmica não se revelaria vantajoso, para as condições estudadas.
- Concluiu-se que eram suficientes cerca de 5 cm de isolamento térmico nas paredes e coeficiente de transmissão térmica de  $6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  nas janelas;

Uma vez mais procurou aperfeiçoar-se o programa de optimização iniciado na dissertação anterior. Este programa revelou-se vantajoso do ponto de vista da facilidade de utilização, apesar

de apenas permitir a análise diária. Seria mais vantajoso observar o comportamento de um período de tempo mais alargado, para determinar os valores ideais de isolamento térmico e coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados. Uma vez que esta ferramenta se encontra numa fase muito inicial de desenvolvimento, precisa de ser testada em diversos climas e em diversos edifícios monitorizados, de modo a que os seus resultados possam vir a ser considerados fiáveis.



# 4

## SIMULAÇÃO DO EDIFÍCIO

### 4.1. MODELAÇÃO HIGROSCÓPICA

#### 4.1.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo analisar-se-á a influência da introdução de materiais higroscópicos na superfície interior das paredes. Este estudo concentrou-se na análise da humidade, já que é este o campo que sofre mais variações, quando se introduz um revestimento higroscópico à superfície das paredes.

Como já foi referido anteriormente, usou-se a plataforma informática EnergyPlus como instrumento de auxílio ao estudo para efectuar as simulações.

Ao modelo base, foram acrescentadas novas variáveis, relativas às propriedades de um hipotético revestimento higroscópico.

Neste subcapítulo serão apresentados os parâmetros que sofreram variação ao longo das diversas simulações e efectuar-se-á uma exposição das condições de fronteira adicionadas ao modelo.

Todas as simulações foram realizadas nas condições referidas no capítulo anterior, apenas variando os parâmetros que se pretendem otimizar.

#### 4.1.2. ESCOLHA DO ALGORITMO

Pretende-se avaliar o efeito da adição de um revestimento à superfície interna das paredes no desempenho higrotérmico do edifício. Não se efectuaram, portanto, quaisquer alterações ao modelo existente, com excepção da adição do revestimento.

Para começar, teve que se escolher qual o tipo de algoritmo de simulação para a transferência de calor e humidade a ser utilizado para o cálculo do modelo no EnergyPlus. Foi escolhido o *HeatBalanceAlgorithm*, sendo que o algoritmo seleccionado foi o *Moisture Penetration Depth Conduction Heat Transfer*, mais conhecido pela sigla EMPD. Inclui-se a Fig. 13 para o ilustrar:

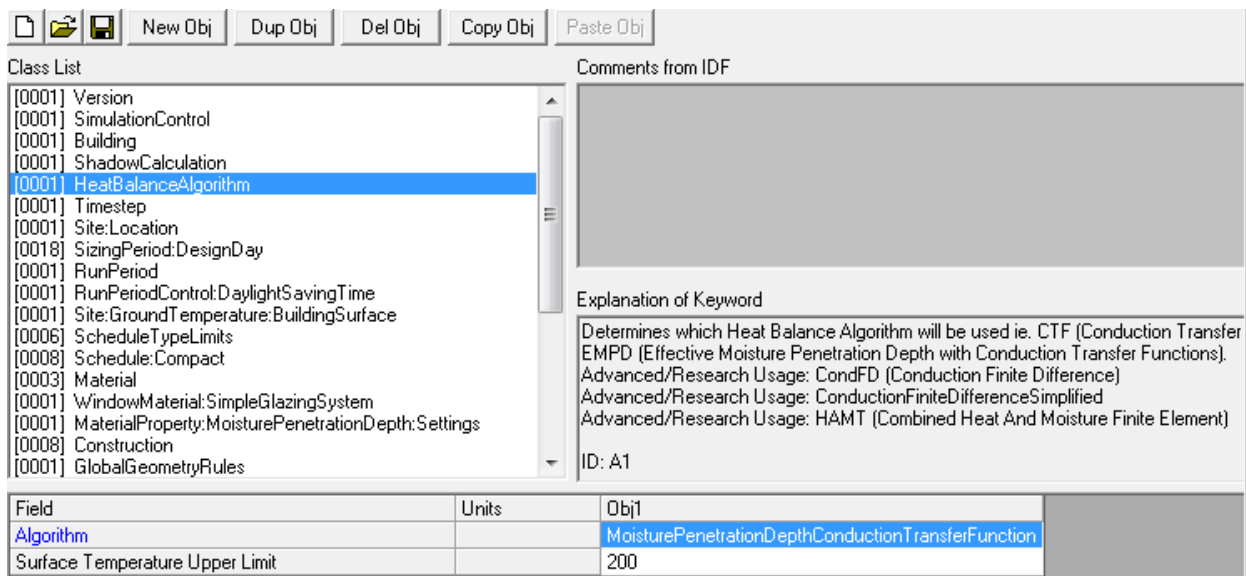


Fig. 13: Janela de introdução dos dados para o objecto *Heat Balance Algorithm*

A função *Moisture Penetration Depth Conduction Transfer* é um algoritmo de simulação da difusão de calor e de armazenamento de humidade, que necessita de informação adicional acerca das propriedades do material em causa.

#### 4.1.2.1. Material

Inicialmente definiram-se as propriedades dos novos materiais introduzidos: os revestimentos.

Foram simulados três diferentes tipos de revestimento: o gesso cartonado, o gesso projectado e o gesso e cal, também designado de estuque. A razão para a escolha destes materiais deveu-se ao facto de serem materiais de acabamento muito frequentes em Portugal.

O programa EnergyPlus usa as seguintes propriedades principais no seu modelo de cálculo: rugosidade, espessura  $L$  [m], condutibilidade térmica  $\lambda$  [ $W/m \cdot K$ ], massa volúmica  $\rho$  [ $kg/m^3$ ], calor específico  $C_p$  [ $J/Kg \cdot K$ ]. Alguns destes valores afectam essencialmente o comportamento térmico, como seja o  $\lambda$  e o  $C_p$ .

Quanto à espessura, utilizou-se o valor de 1,5 cm, porque este é um valor utilizado nas construções correntes. Relativamente à massa volúmica, esta foi obtida através dos valores dos fabricantes.

Apresenta-se de seguida a janela do programa correspondente à introdução das propriedades dos materiais.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		Betão	Tijolo Maciço	Gesso Cartonado	Gesso Projectado	Gesso e cal
Roughness		VeryRough	VeryRough	Smooth	Smooth	Smooth
Thickness	m	0.15	0.11	0.015	0.015	0.015
Conductivity	W/m-K	2	0.85	0.18	0.18	0.18
Density	kg/m3	2300	1970	730	1200	900
Specific Heat	J/kg-K	653	800	800	800	800
Thermal Absorptance		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Solar Absorptance		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Visible Absorptance		0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Fig. 14: Propriedades dos materiais

4.1.2.2. Propriedades dos materiais higroscópicos de revestimento

As propriedades dos materiais utilizados foram obtidas em Ramos (2007). No seu estudo as curvas higroscópicas não foram determinadas levando em conta a expressão (21), mas a seguinte:

$$u = u_h \cdot \left(1 - \frac{\ln(\varphi)}{A_1}\right)^{-1/n} \tag{28}$$

Onde:

- $u_h$  - Representa o teor de humidade crítico;
- $A_1$  - É uma relação entre  $u_h$  e o teor de humidade não evaporável;
- $n$  - É um expoente fixado empiricamente.

Estes parâmetros foram obtidos através de um ajuste numérico dos dados obtidos experimentalmente. Apresenta-se de seguida um quadro-resumo dos valores retirados para a obtenção das curvas higroscópicas iniciais:

Quadro 5: Parâmetros de ajuste da função da curva higroscópica, adaptado de (Ramos, 2007)

Material	$u_h$	$A_1$	$n$
Gesso Cartonado	0.071029	0.011731	1.6029
Gesso Projectado	1.037600	$6.11 \times 10^{-5}$	1.3726
Gesso e Cal	0.007200	0.693	0.8136

De seguida, teve que se proceder ao ajuste dos valores da equação (28) à (21), usando as potencialidades do programa Excel. Este procedimento está ilustrado na Fig. 15:

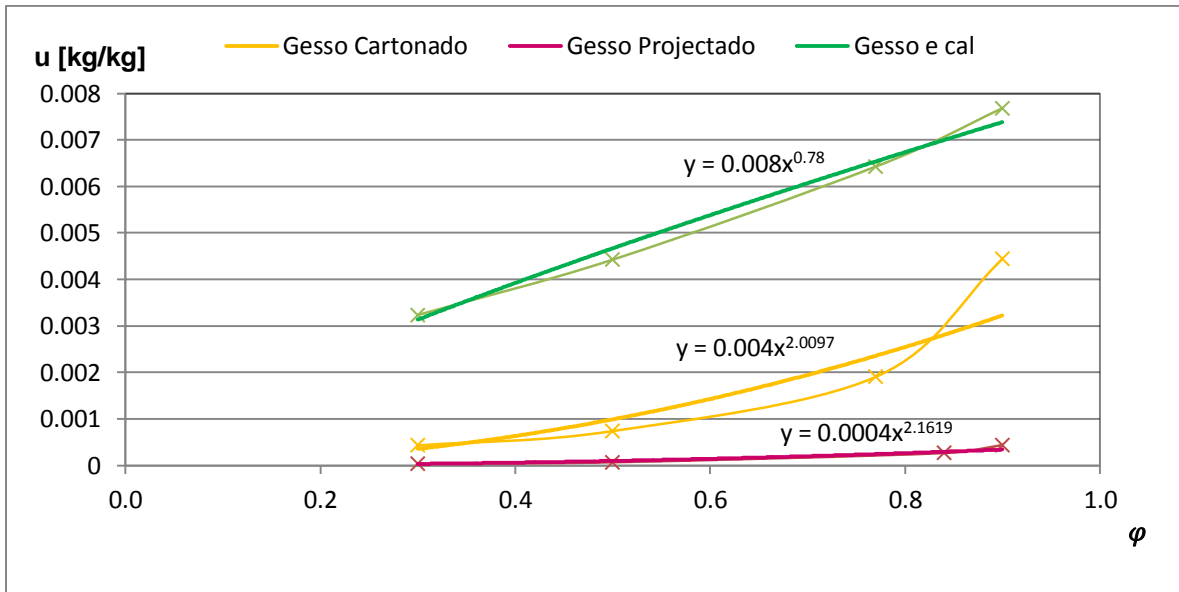


Fig. 15: Ajuste das curvas

Obtendo-se a aproximação possível à equação polinomial (21). Apresenta-se em seguida um resumo destes ajustes:

Quadro 6: Resumo dos ajustes

<b>Material</b>	<b>Equação (28)</b>	<b>Equação (21)</b>
<i>Gesso Cartonado</i>	$u = 0.071 \cdot \left(1 - \frac{\ln(\varphi)}{0.012}\right)^{-1/1.6}$	$u = 0.0004 \cdot \varphi^{2.0097}$
<i>Gesso Projectado</i>	$u = 1.038 \cdot \left(1 - \frac{\ln(\varphi)}{6.11 \times 10^{-5}}\right)^{-1/1.4}$	$u = 0.0004 \cdot \varphi^{2.1619}$
<i>Gesso e Cal</i>	$u = 0.007 \cdot \left(1 - \frac{\ln(\varphi)}{0.693}\right)^{-1/0.8}$	$u = 0.008 \cdot \varphi^{0.78}$

Por último, para que os parâmetros de simulação estejam todos definidos, falta determinar  $\delta_M$ , profundidade de adsorção da camada do revestimento.

Apresenta-se no Quadro 7 um resumo das propriedades dos materiais necessárias à obtenção de  $\delta_M$ . Como já foi mencionado, os revestimentos estudados foram sujeitos a um estudo previamente desenvolvido (Ramos, 2007). Estes valores foram medidos experimentalmente para uma humidade relativa de 54%. Este valor corresponde a uma grandeza intermédia entre 33% e 75%, gama de flutuação normal desta variável. A temperatura foi de 23°C.

Quadro 7: Propriedades dos materiais necessárias à obtenção de  $\delta_M$ , adaptado de (Ramos, 2007)

$\delta$ [kg/m.s.Pa]	$P_{\text{sat}}$ [Pa]	$t_p$ [s]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\xi$ [kg/kg]
$2.62 \times 10^{-11}$	2813	24 × 3600	730	0.0109
$2.62 \times 10^{-11}$	2813	24 × 3600	1200	0.00275
$2.62 \times 10^{-11}$	2813	24 × 3600	900	0.00573

Utilizou-se a equação empírica (27) para obter uma aproximação deste valor.

Quadro 8: Resultados da aplicação da equação (27)

$\delta_{M,Gesso\ Cartonado}$ [mm]	$\delta_{M,Gesso\ Projectado}$ [mm]	$\delta_{M,Gesso\ e\ Cal}$ [mm]
16	23	23

A principal dificuldade do uso do método de cálculo aproximado EMPD é que é difícil avaliar de forma correcta os parâmetros do modelo, baseados nos materiais que constituem o ambiente e estão em contacto com o ar interior.

Tendo em conta que se optou como espessura de revestimento o valor de 1,5 cm,  $\delta_M$  não poderá exceder esta profundidade. Por isso adoptou-se  $\delta_M = 1,5\text{ cm}$ .

Mais tarde fizeram-se simulações com outras variáveis, de forma a verificar qual a importância desta na previsão do comportamento do edifício em termos de humidade.

Tendo as equações correspondentes a cada um dos revestimentos e o cálculo aproximado de  $\delta_M$ , procedeu-se à introdução dos dados no programa, em *Material Property: Moisture Penetration Depth: Settings*. Apresenta-se em seguida a janela ilustrativa deste passo, que foi repetido para cada um dos três revestimentos.

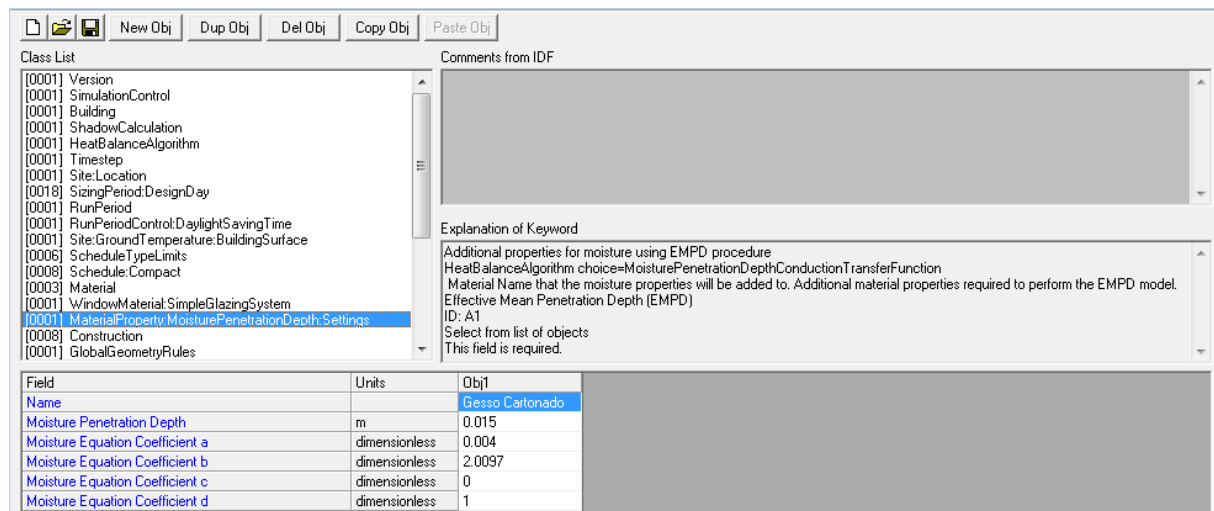


Fig. 16: Introdução dos coeficientes da equação (21) e comprimento da camada de adsorção,  $\delta_M$

Finalmente, houve que definir no programa a localização destes novos materiais com higroscopicidade. Para isso, usou-se o instrumento *Construction*. Já existiam os materiais betão, vidro e tijolo maciço, materiais não higroscópicos, aos quais se adicionou o revestimento, em diferentes formas: gesso cartonado, gesso projectado ou gesso e cal.

É de ter em conta que as camadas têm que ser colocadas do exterior para o interior. Por este motivo, os revestimentos foram colocados em último lugar, pois encontram-se na camada mais superficial do interior da parede.

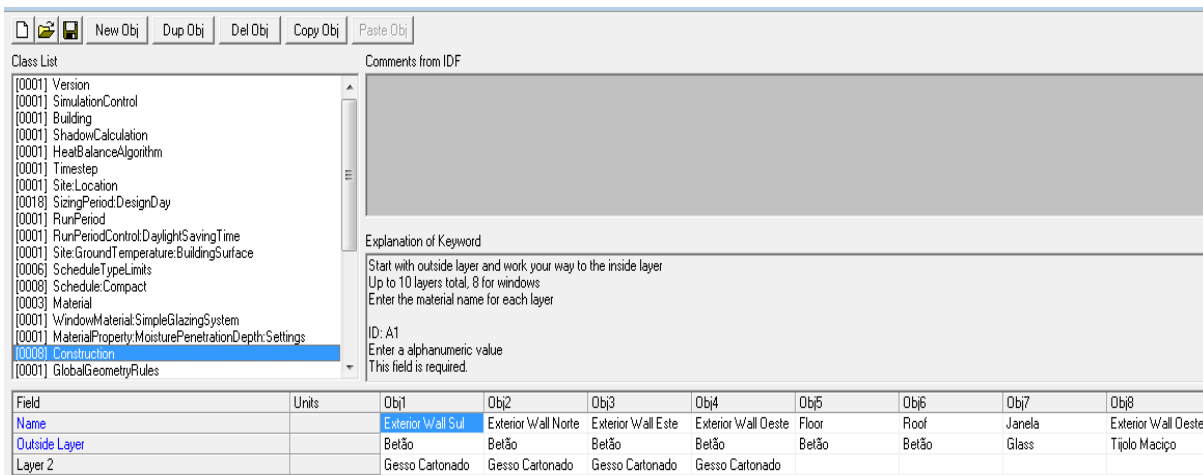


Fig. 17: Colocação do revestimento nas paredes interiores

O programa está agora apto para realizar as simulações.

## 4.2. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.2.1. SIMULAÇÃO SEM HIGROSCOPICIDADE

De forma a poder fazer uma boa análise dos resultados obtidos e verificar a acção do revestimento na redução da humidade interior no edifício, há que analisar quais eram os resultados numa simulação sem higroscopicidade.

Mostra-se de seguida quais foram os valores obtidos numa primeira simulação, correspondente aos dados iniciais. Não continha qualquer revestimento nem isolamento térmico.

Tomou-se como parede de referência a parede Norte. Todos os resultados relativos às temperaturas e humidades relativas à superfície são, portanto, respeitantes a esta mesma parede.

No Quadro 9 apresentam-se as temperaturas verificadas ao longo do ano nas imediações e no interior do edifício. Pode verificar-se, pela temperatura média no exterior, ( $T_{MM}$ ), que os meses mais frios são Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro em que a temperatura mínima,  $T_{min}$ , chega a estar próxima de valores negativos, ou mesmo a atingi-los. As temperaturas máximas,  $T_{máx}$ , para estes meses também são as menores. De notar que é nos meses mais frios que o risco de condensações é maior.

Os meses mais quentes são Julho e Agosto, em que a amplitude entre máximos e mínimos é baixa.

Quadro 9: Temperaturas exterior, superficial interior e interior

Mês	Exterior			Superficial Interior	Interior
	$T_{MM}$ [°C]	$T_{máx}$ [°C]	$T_{min}$ [°C]	$T_{MM}$ [°C]	$T_{MM}$ [°C]
Janeiro	7.6	15.5	-0.5	9.8	9.8
Fevereiro	9.0	15.0	1.5	11.7	12.0
Março	9.6	17.5	-0.5	13.3	13.5
Abril	11.0	17.8	2.5	15.1	14.8
Mai	12.5	19.0	1.9	17.0	17.1
Junho	15.4	21.1	7.9	20.7	20.0
Julho	17.1	25.5	10.0	21.3	20.7
Agosto	17.0	23.8	10.0	21.4	20.6
Setembro	16.3	24.0	7.7	19.8	19.7
Outubro	13.3	19.5	6.0	16.8	17.1
Novembro	10.5	17.7	0.0	12.8	13.1
Dezembro	8.8	15.0	-0.4	10.7	10.6

Observando a Fig. 19 confirma-se visualmente o que foi dito anteriormente. Comparando as temperaturas interior e exterior, verifica-se que a interior acompanha a variação dos valores da exterior, embora normalmente não chegue a atingir os seus valores mínimos. Na estação de Inverno os picos de temperatura interior e exterior aproximam-se.

A temperatura no interior é, em média, superior à exterior, sendo que a verificada à superfície da parede interior é, normalmente uma temperatura intermédia entre estas duas (Fig. 18).

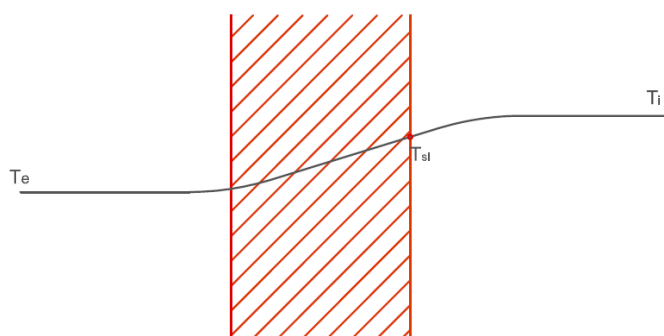


Fig. 18: Representação esquemática do gradiente de temperaturas

De notar ainda que a iluminação e a ocupação, por parte dos utilizadores, introduzem ganhos internos de energia no bloco.

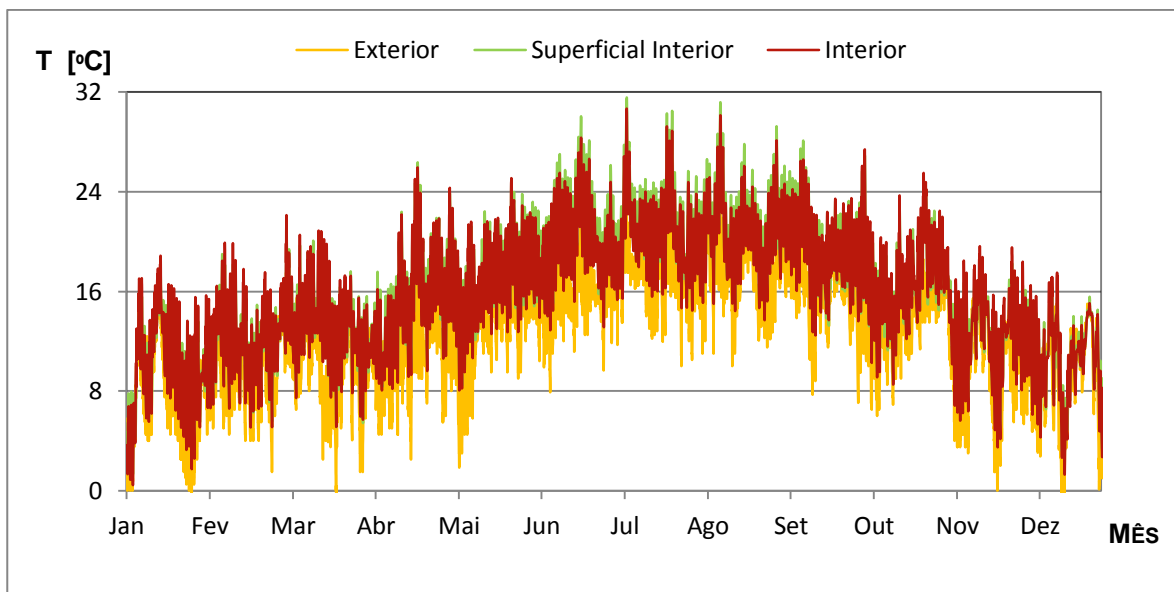


Fig. 19: Evolução das temperaturas durante um ano, sem higroscopicidade

Quanto à evolução da humidade relativa, verifica-se, pela observação da Fig. 20, que ocorrem condensações na superfície interior da parede em muitos dias do ano, mas com especial ocorrência nos meses mais frios.

Tanto no interior do edifício como à superfície da parede, os valores da humidade relativa oscilam entre os 30% e os 100%, sendo que o valor mínimo se verifica num muito reduzido número de dias.

Note-se que foi referido, em 2.1.2, a dependência da humidade relativa face à temperatura registada. Tal é evidente na comparação entre as Fig. 19 e Fig. 20, em que se verifica que, havendo subida da temperatura, se registam humidades relativas no interior do bloco ligeiramente inferiores.

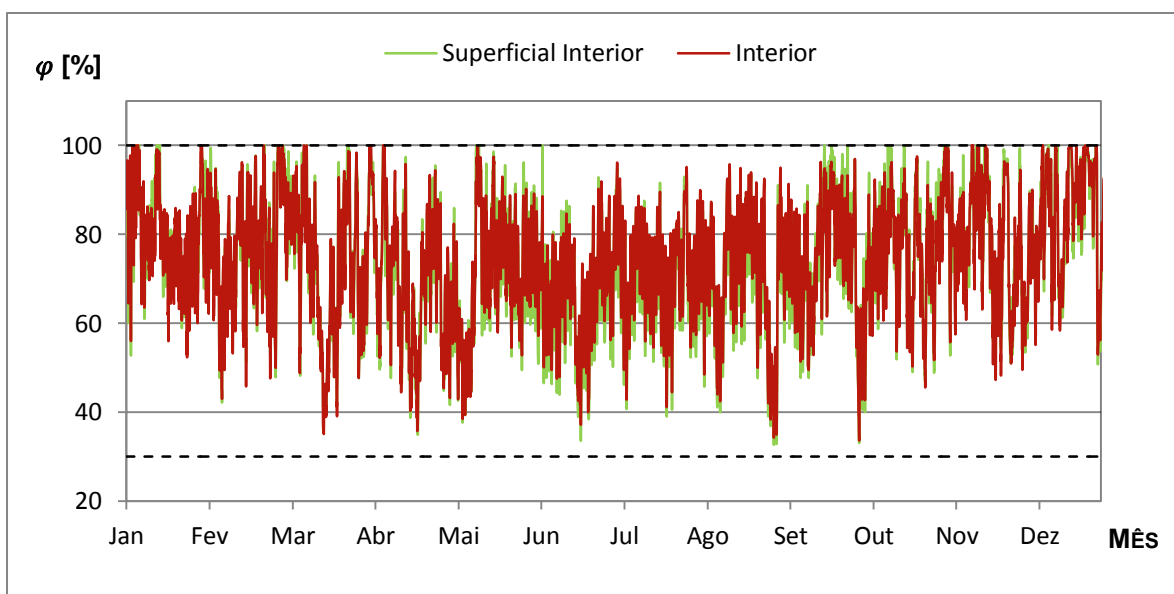


Fig. 20: Evolução da humidade relativa durante um ano

O Quadro 10 resume os valores médios de humidade relativa registados à superfície da parede interior e no interior do edifício. Note-se que os valores médios da humidade à superfície da parede são quase sempre superiores aos registados no interior do edifício nos meses mais frios, acontecendo o inverso nos meses mais quentes.

Nas duas últimas colunas do Quadro 10, resumem-se os percentis 10 e 90, respectivamente na 1ª e 2ª coluna, para a humidade à superfície da parede. Verifica-se que tomam os valores mais elevados nos meses mais frios, mas é em Janeiro que há uma menor variação entre os valores mais altos e mais baixos. Assim, o mês de Janeiro é o mais crítico relativamente à possibilidade de ocorrência de condensações. Os meses mais quentes do ano são os meses com registo de menores humidades relativas e menor amplitude de variação.

Quadro 10: Valores médios e percentis da Humidade Relativa

<b>Mês</b>	$\Phi_i$	$\Phi_{si}$	$\Phi_{si}$	
	[%]	[%]		[%]
	<b>Média</b>		<b>P<sub>10</sub></b>	<b>P<sub>90</sub></b>
<i>Janeiro</i>	80	80	68	97
<i>Fevereiro</i>	77	78	61	98
<i>Março</i>	72	73	52	94
<i>Abril</i>	71	70	50	90
<i>Mai</i>	70	70	52	92
<i>Junho</i>	67	65	48	82
<i>Julho</i>	72	69	54	85
<i>Agosto</i>	70	67	48	85
<i>Setembro</i>	76	76	58	94
<i>Outubro</i>	72	74	53	92
<i>Novembro</i>	80	81	62	99
<i>Dezembro</i>	82	82	62	98

Atente-se agora na Fig. 21, onde se representa a evolução da pressão parcial de vapor no interior e exterior do edifício.

Nesta representação evidenciaram-se os dias em que o edifício se encontrava desocupado. Note-se que nestes intervalos, em que não há ocupantes no edifício, a pressão interior tende a aproximar-se dos valores verificados no exterior.

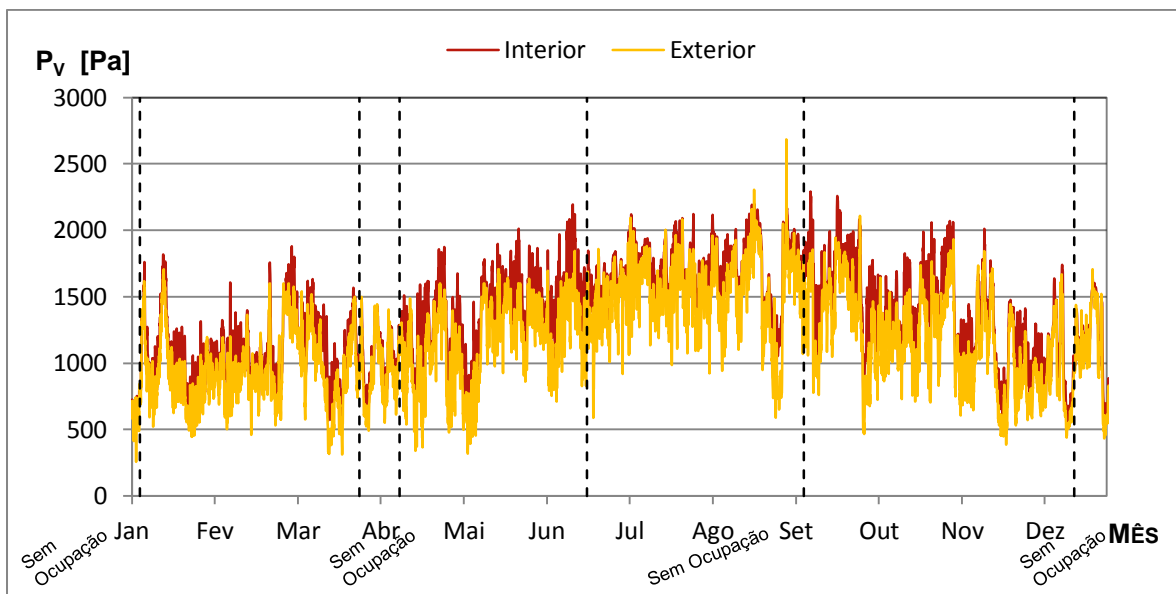


Fig. 21: Evolução da pressão parcial de vapor ao longo do ano

#### 4.2.2. ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO PROGRAMA AO EMPD

Antes de se introduzir os revestimentos higroscópicos, realizou-se uma série de simulações para analisar a sensibilidade do programa: uma sem qualquer tipo de revestimento, correspondente à dos dados-base, outra com revestimento mas ainda não introduzindo o modelo EMPD e finalmente uma outra em que se introduzia o EMPD, mas este com um revestimento sem profundidade de adsorção. Estas simulações tinham por objectivo verificar qual o efeito da introdução do objecto EMPD na simulação.

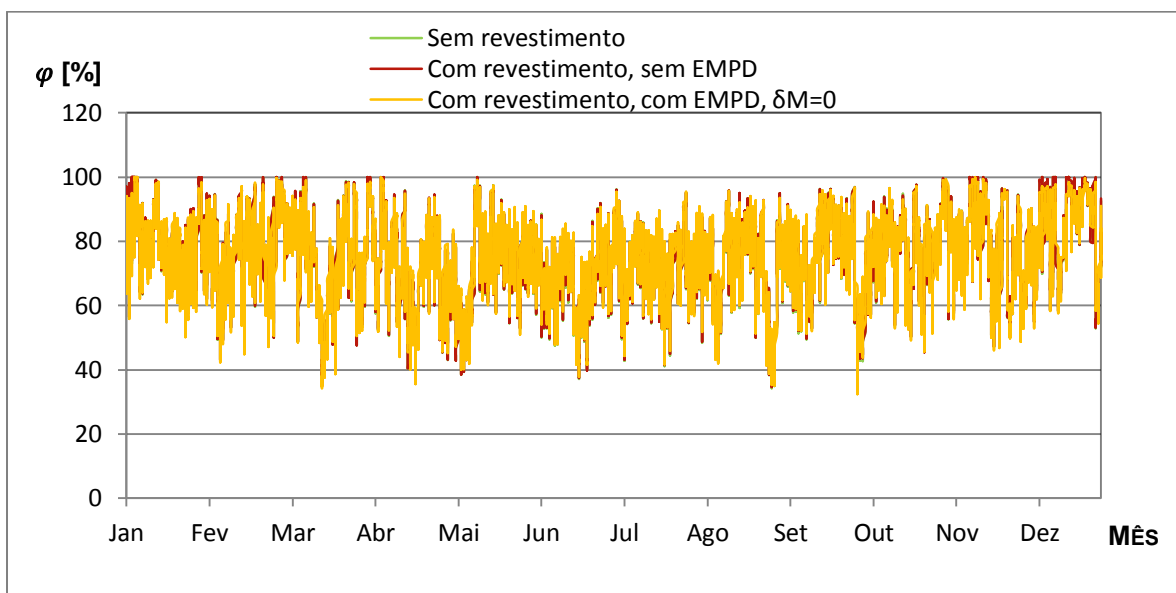


Fig. 22: Simulação de verificação da sensibilidade do programa

Introduzindo o revestimento, sem o modelo EMPD, verifica-se que o seu gráfico é praticamente coincidente com o da simulação base, pelo que se verifica que a introdução do revestimento por si só no programa não provoca uma melhoria no interior do bloco das características higroscópicas. Assim, há que definir no programa um objecto que identifique estas características higroscópicas.

De seguida, efectuou-se uma nova simulação, agora introduzindo o modelo EMPD mas com a camada de adsorção aproximadamente nula. Observou-se, uma vez mais, que os valores são quase coincidentes com os das duas simulações anteriores.

As muito ligeiras diferenças verificadas entre os vários gráficos resultam da introdução de mais uma pequena espessura, correspondente ao revestimento. O revestimento adiciona-lhe uma resistência térmica, provocando uma ligeira diminuição da humidade relativa com o aumento da temperatura.

Assim, e uma vez mais, não basta apenas introduzir os materiais higroscópicos e identificá-los como tal. É necessária uma análise cuidada da camada de adsorção, pois esta interfere nos resultados.

#### 4.2.3. INTRODUÇÃO DO REVESTIMENTO HIGROSCÓPICO

##### 4.2.3.1. Comparação entre os diferentes tipos de Revestimento

Finalmente introduziram-se os vários tipos de revestimentos higroscópicos e fez-se a simulação.

Observando a Fig. 23, constata-se que todos os revestimentos têm a mesma reacção à adsorção de vapor de água, já que os seus gráficos de sobrepõem.

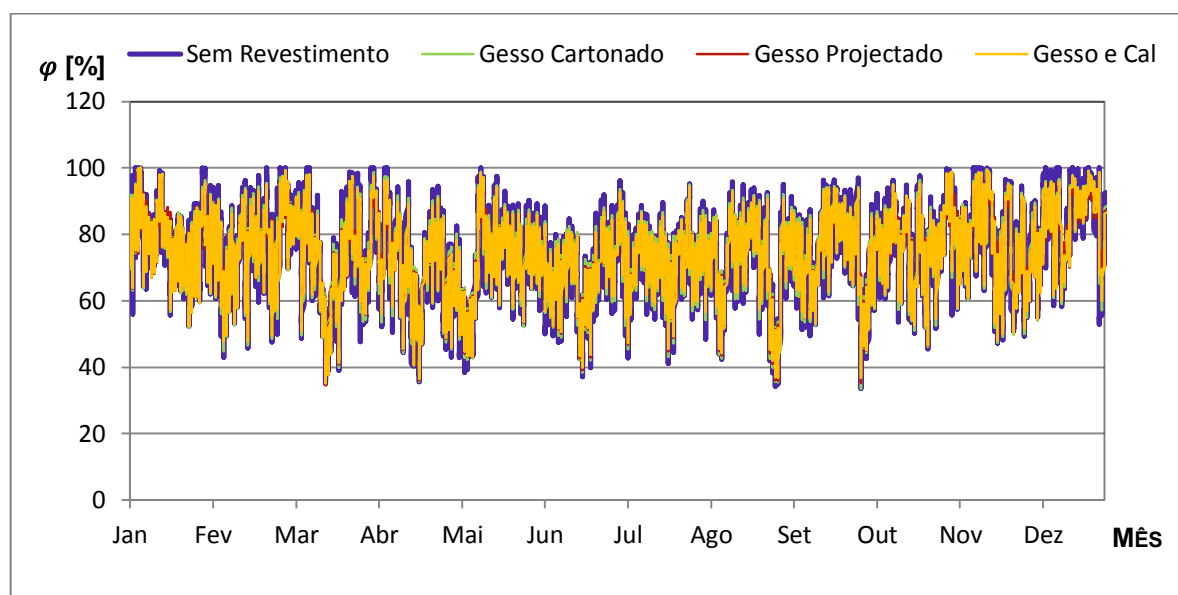


Fig. 23: Humidade Relativa no interior do bloco, sem revestimento e com os diferentes gessos. Representação anual

Assim, o estudo desenvolvido em seguida basear-se-á em apenas um dos revestimentos, sendo esse representativo dos restantes relativamente à propriedade EMPD.

O revestimento escolhido como representativo foi o Gesso cartonado.

#### 4.2.3.2. Simulação com Higroscopicidade – Comportamento Anual

Na Fig. 24 apresenta-se a comparação entre os valores registados, à superfície da parede, com e sem higroscopicidade.

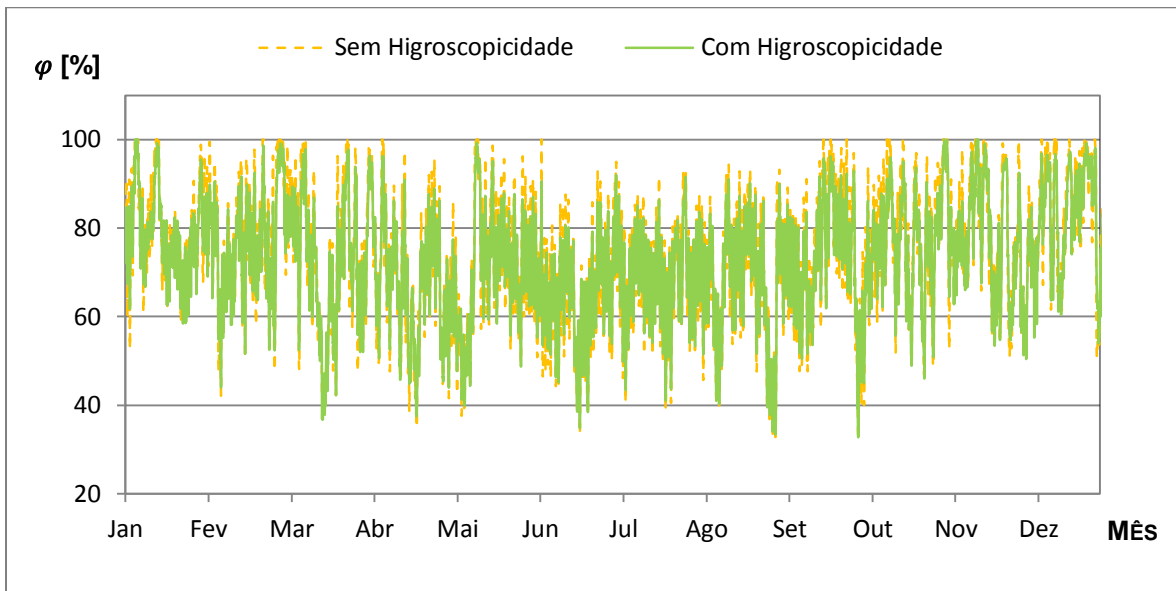


Fig. 24: Comparação entre simulações com e sem higroscopicidade. Gráfico anual da humidade relativa superficial interior

A Fig. 25 representa a evolução da humidade relativa à superfície da parede interior e no interior do edifício.

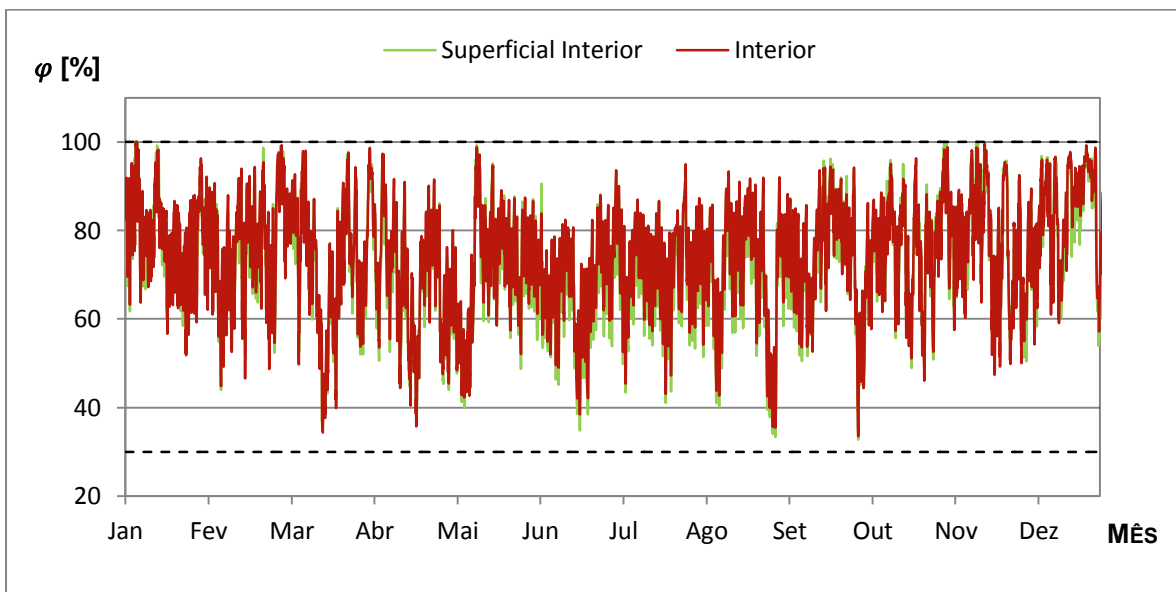


Fig. 25: Humidade relativa interior e superficial interior, durante um ano

Como se pode observar pelas figuras, em conjunto com o Quadro 11, a introdução do revestimento higroscópico provoca uma redução dos valores máximos. Verifica-se também uma pequena alteração de alguns valores dos mínimos da humidade relativa que aumentam, embora muito pouco.

Em termos de valores médios, tanto a humidade relativa interior como a humidade relativa à superfície da parede não sofreram praticamente alterações, como se esperava.

Quadro 11: Valores médios e percentis da Humidade Relativa

<b>Mês</b>	$\varphi_i$	$\varphi_{si}$	$\varphi_{si}$	
	[%]	[%]	$P_{10}$	$P_{90}$
	<b>Média</b>			
<i>Janeiro</i>	80	79	69	93
<i>Fevereiro</i>	76	76	61	92
<i>Março</i>	72	72	53	90
<i>Abril</i>	71	69	51	87
<i>Maio</i>	70	69	52	86
<i>Junho</i>	68	65	50	78
<i>Julho</i>	72	69	56	81
<i>Agosto</i>	70	67	47	82
<i>Setembro</i>	76	75	60	90
<i>Outubro</i>	72	73	54	88
<i>Novembro</i>	79	80	62	96
<i>Dezembro</i>	82	81	62	96

Atente-se agora unicamente aos percentis. Verifica-se uma aproximação entre os percentis 90 e 10. Quer isto dizer que há uma tentativa de uniformização da humidade relativa no interior do edifício.

Apesar desta aproximação entre os valores máximos e mínimos da humidade relativa à superfície da parede, ainda há meses em que estes valores máximos são muito elevados. Entre esses meses estão os de Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro.

De todos os meses referidos, o mês de Novembro apresenta-se como um mês anormal em termos de evolução da humidade relativa já que, com a introdução do revestimento higroscópico, houve uma relativamente baixa redução do valor correspondente ao percentil 90.

Por este motivo, de seguida analisar-se-á este mês de forma mais atenta.

O mês de Janeiro também será objecto de uma análise aproximada porque é o mês em que as temperaturas são mais baixas, havendo um maior risco de ocorrência de condensações.

#### 4.2.3.3. Simulação com Higroscopicidade – Análise do mês de Janeiro

Na Fig. 26 apresenta-se a comparação entre os valores registados, à superfície da parede, com e sem higroscopicidade.

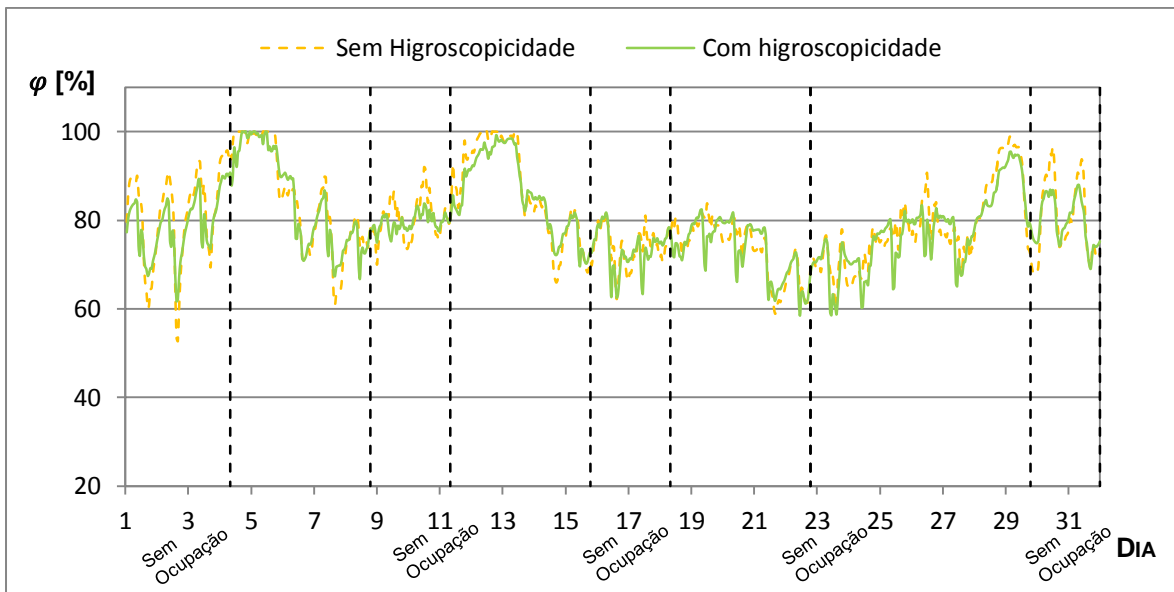


Fig. 26: Comparação entre simulações com e sem higroscopicidade. Gráfico para o mês de Janeiro da humidade relativa superficial interior

A Fig. 27 representa a evolução da humidade relativa para o mês de Janeiro. Neste gráfico identificaram-se também os intervalos em que o edifício se encontra desocupado.

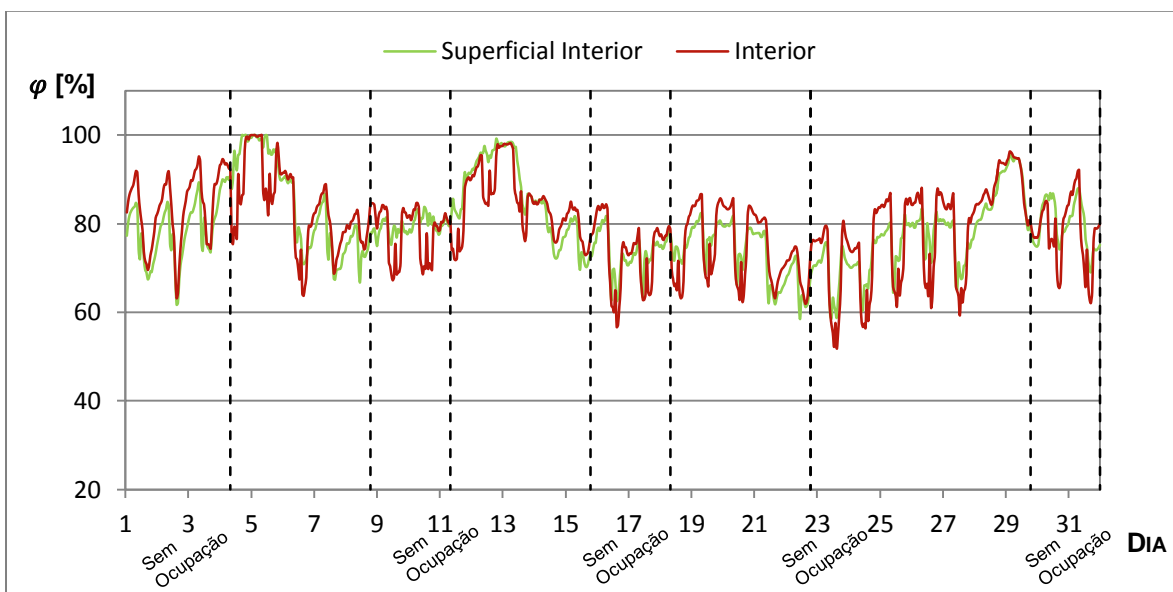


Fig. 27: Humidade relativa superficial interior e interior para o mês de Janeiro

Esta aproximação do gráfico ao mês, pela Fig. 26, permite verificar que a introdução do revestimento higroscópico à superfície das paredes se traduziu numa alteração sensível da humidade relativa à superfície da parede.

Note-se que, apesar de haver uma atenuação dos valores, esta não foi muito acentuada para os dias em que a humidade relativa era muito alta durante um elevado período de tempo. Para dias com picos momentâneos, o amortecimento em termos de humidade relativa é acentuado.

Houve, porém, uma redução dos dias em que ocorriam condensações. Apenas nos dias 4 e 5 de Janeiro os valores da humidade relativa à superfície das paredes atingem os 100%.

O dia 5 de Janeiro tem a particularidade de ser o dia seguinte ao retomo das actividades escolares, depois das férias.

Assim, e comparando a Fig. 27 com a Fig. 28, verifica-se que o dia 4 de Janeiro é um dia excepcionalmente frio, em que a temperatura no interior é praticamente igual à exterior. Com as temperaturas muito baixas, há um agravamento das condições interiores de humidade, reflectindo-se no dia 5 de Janeiro.

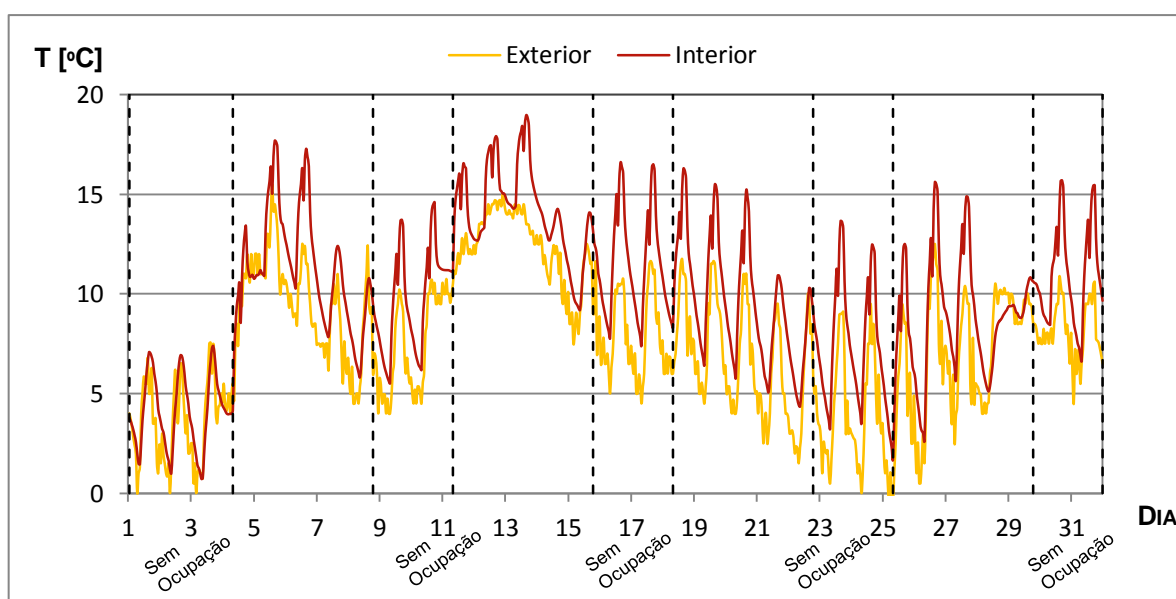


Fig. 28: Evolução das temperaturas interior e exterior para o mês de Janeiro

Uma vez que os dias mais críticos são os dias 4 e 5 de Janeiro, pela temperatura e humidade relativa consistentemente mais baixas e mais altas, respectivamente, optou-se por se representar posteriormente estes dois dias com maior detalhe para se poder averiguar quais as causas das discrepâncias relativamente aos restantes dias.

#### 4.2.3.4. Simulação com Higroscopicidade – Análise do mês de Novembro

Atente-se agora à evolução, no mês de Novembro, das humidades relativas à superfície da parede e no interior do edifício, representada na Fig. 30 e à comparação entre os valores registados, à superfície da parede, com e sem higroscopicidade (Fig. 29). Na Fig. 31 apresenta-se a evolução das temperaturas.

Confirma-se uma vez mais, como foi referido em 4.2.3.3., que não se verificaram grandes amortecimentos da humidade relativa à superfície da parede para os dias com muitas horas de valores altos de humidade relativa.

Note-se que este mês é muito atípico, uma vez que os valores da humidade passam de muito altos para baixos de forma quase abrupta.

Isto deve-se ao facto de o mês de Novembro ser um mês de grandes amplitudes térmicas diárias. Registam-se temperaturas desde a gama dos 20 °C até aos 3 °C, no interior do edifício, com passagens rápidas de valores muito altos para muito baixos.

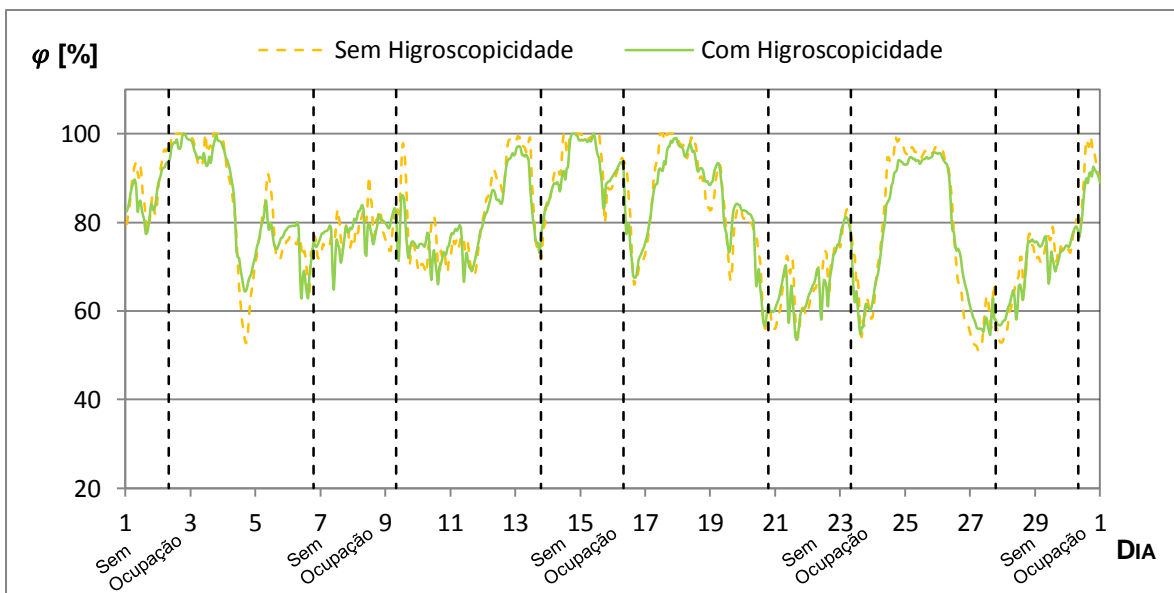


Fig. 29: Comparação entre simulações com e sem higroscopicidade. Gráfico para o mês de Novembro da humidade relativa superficial interior

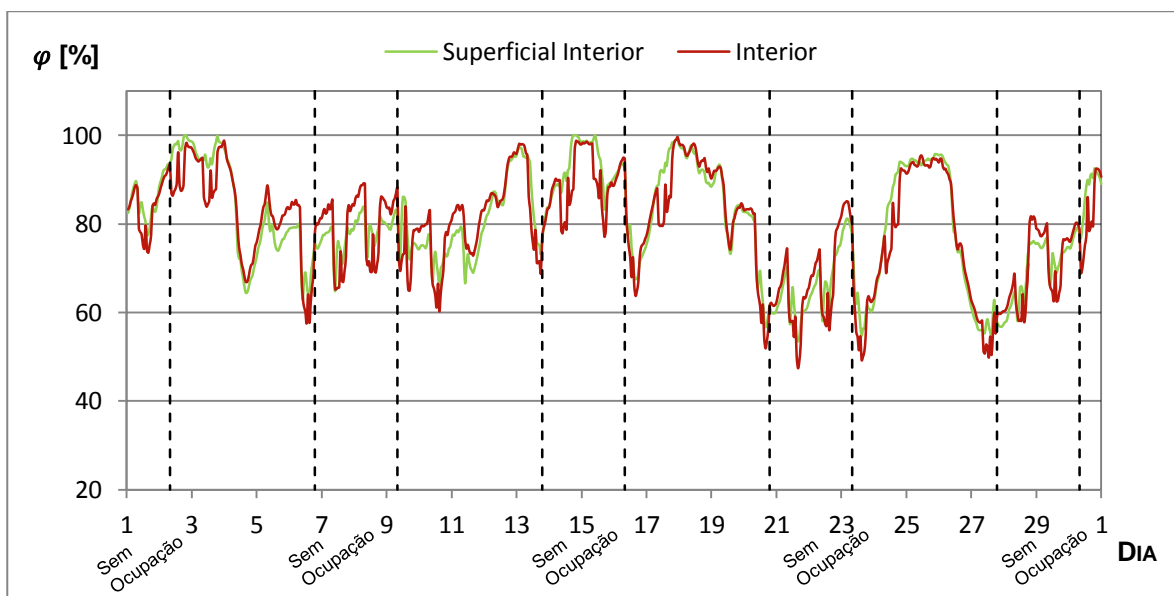


Fig. 30: Humidade relativa superficial interior e interior para o mês de Novembro

Assim, e pela interdependência entre a humidade relativa e a temperatura, a humidade relativa tem amplitudes muito grandes havendo alguns dias em que se verifica, pontualmente, a ocorrência de condensações à superfície.

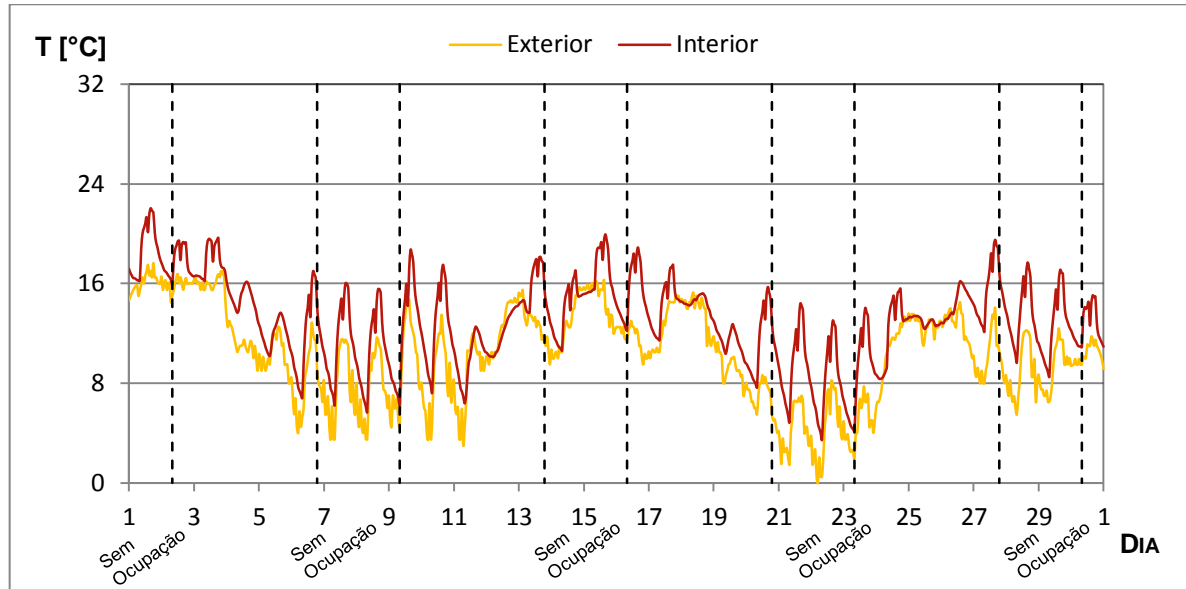


Fig. 31: Evolução das temperaturas interior e exterior para o mês de Novembro

#### 4.2.3.5. Simulação com Higroscopicidade – Análise do dia 4 de Janeiro

No dia 4 de Janeiro, representado na Fig. 32 em termos de humidade relativa, verifica-se que ocorrem condensações à superfície da parede interna apenas no final do dia. Apesar disto, o valor da humidade relativa é muito elevado durante todo o dia, nunca baixando dos 80% à superfície da parede.

É visível o efeito da higroscopicidade, com um abaixamento dos valores da humidade relativa à superfície da parede na maior parte do dia, embora de uma forma pouco acentuada. Nas últimas horas não se conseguiu baixar a humidade a menos de 100%.

Atentando agora à variável da humidade relativa no interior do edifício, verifica-se que, uma vez mais, é muito elevada ao longo de todo o dia. Ocorre um abaixamento destes valores no período de ocupação do edifício. Tal diminuição explica-se pelo aumento da renovação horária do ar durante este período e pelo aumento da temperatura, devida aos ganhos internos de calor, provocados pelos ocupantes.

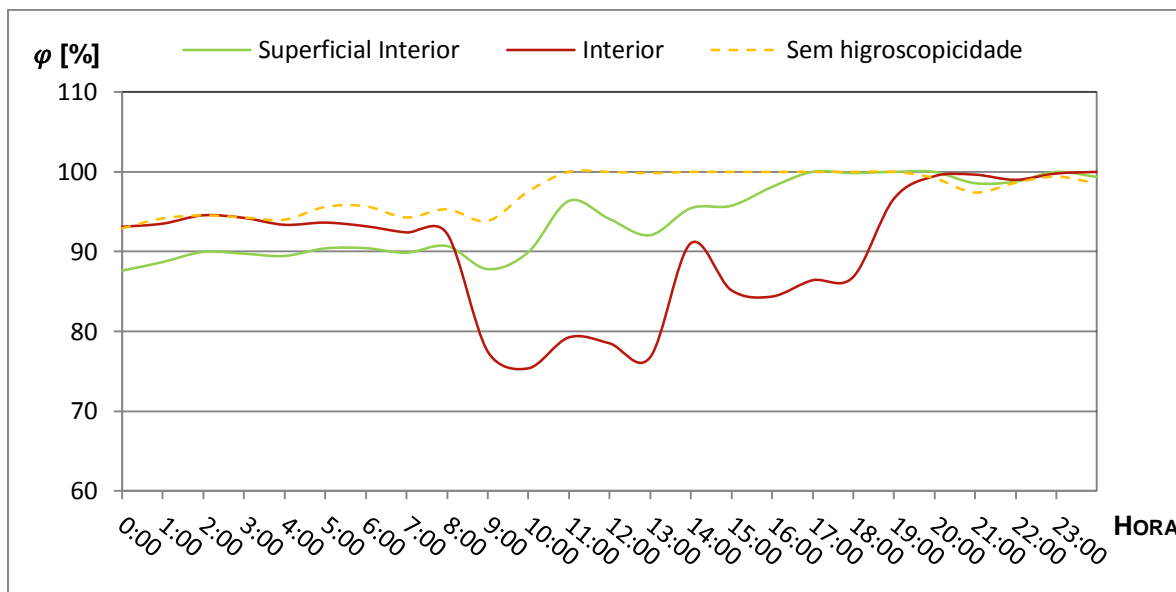


Fig. 32: Evolução da humidade relativa para o dia 4 de Janeiro

Já que a variável humidade relativa depende de inúmeros factores, a sua análise isolada pode-se revelar muito complexa e levar a conclusões erradas. Por este motivo representam-se de seguida as duas variáveis que determinam a variação da humidade relativa.

Atente-se à evolução da temperatura superficial interior para este mesmo dia, ilustrada na Fig. 33. Também se representa a evolução da temperatura de ponto de orvalho.

Note-se que este é um dia atípico, em que a evolução da temperatura não é a considerada normal, com subida das temperaturas ao longo da manhã e abaixamentos ao final da tarde. Neste dia, as temperaturas vão subindo ao longo de todo o dia, sendo máximas nas últimas horas.

É ao fim do dia que as temperaturas à superfície da parede interior e a temperatura de ponto de orvalho são coincidentes. Neste momento ocorrem as condensações.

Na Fig. 34 apresenta-se a evolução da pressão parcial de vapor, para o exterior e o interior. No interior, a pressão parcial de vapor tende a acompanhar os valores registados no exterior sendo, no entanto, potenciada pela presença dos utilizadores no edifício, havendo aumento durante o período de ocupação.

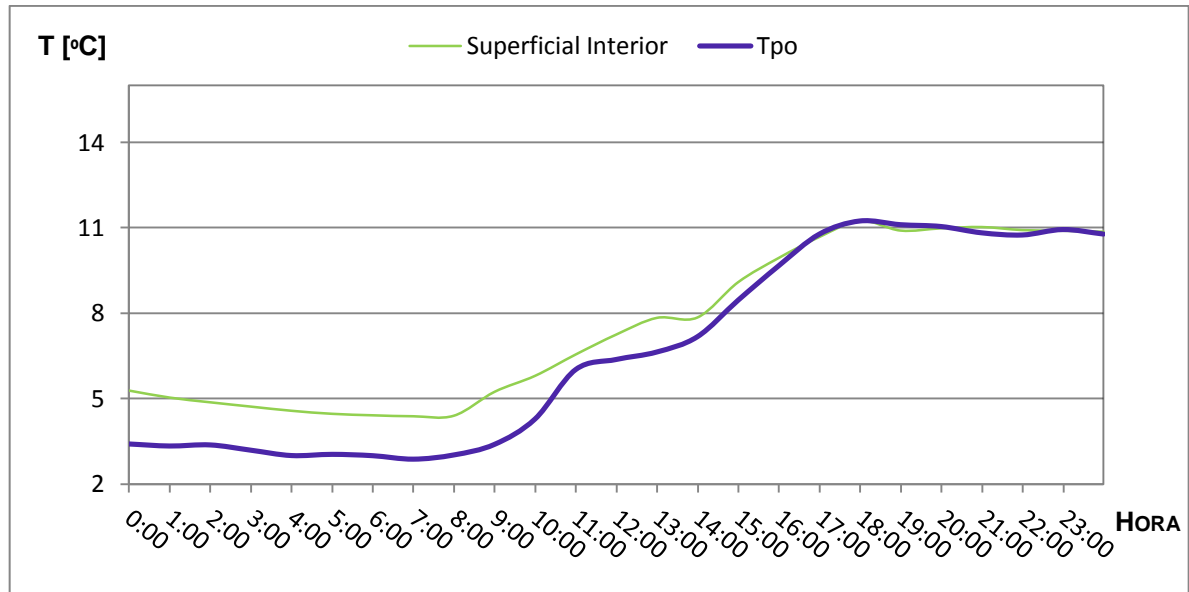


Fig. 33: Evolução da temperatura para o dia 4 de Janeiro

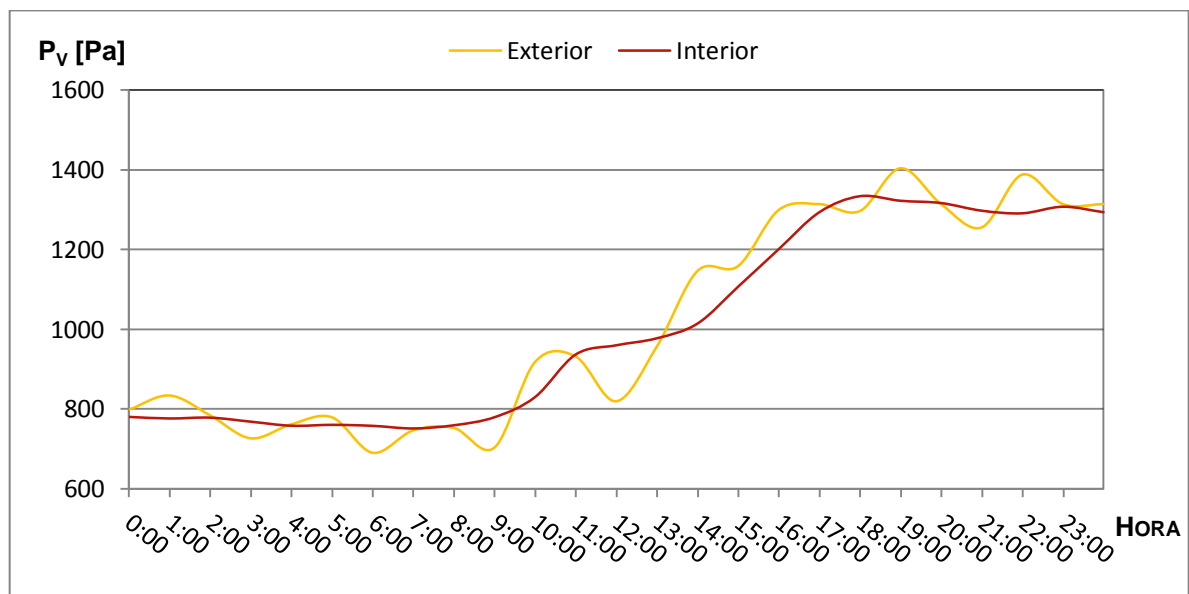


Fig. 34: Evolução da pressão parcial de vapor para o dia 4 de Janeiro

#### 4.2.3.6. Simulação com Higroscopicidade – Análise do dia 5 de Janeiro

Uma análise semelhante à do subcapítulo anterior poderá ser feita para o dia 5 de Janeiro. Este dia tem a particularidade de ser, uma vez mais, um dia crítico, em que ocorrem condensações à superfície das paredes internas. No entanto, é um dia que pode ser considerado como típico, em que o gráfico das temperaturas tem uma evolução de um dia normal.

Atente-se à Fig. 35. Verifica-se o aparecimento de condensações, desta vez no início do dia. Uma vez mais está aqui evidenciado o efeito da higroscopicidade, embora pouco acentuado.

A humidade relativa no interior do edifício é diminuída durante o período de ocupação do edifício, pelas mesmas razões expostas para o dia anterior.

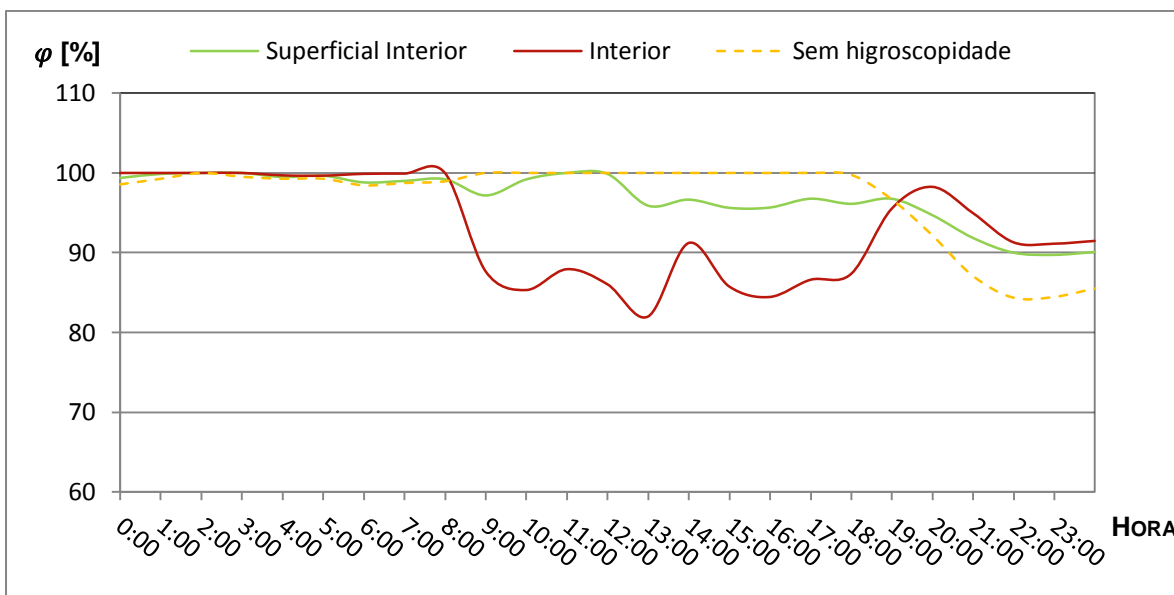


Fig. 35: Evolução da humidade relativa para o dia 5 de Janeiro

Atente-se à evolução das temperaturas, na Fig. 36. A temperatura de ponto de orvalho iguala a temperatura registada à superfície da parede quando ocorrem as condensações.

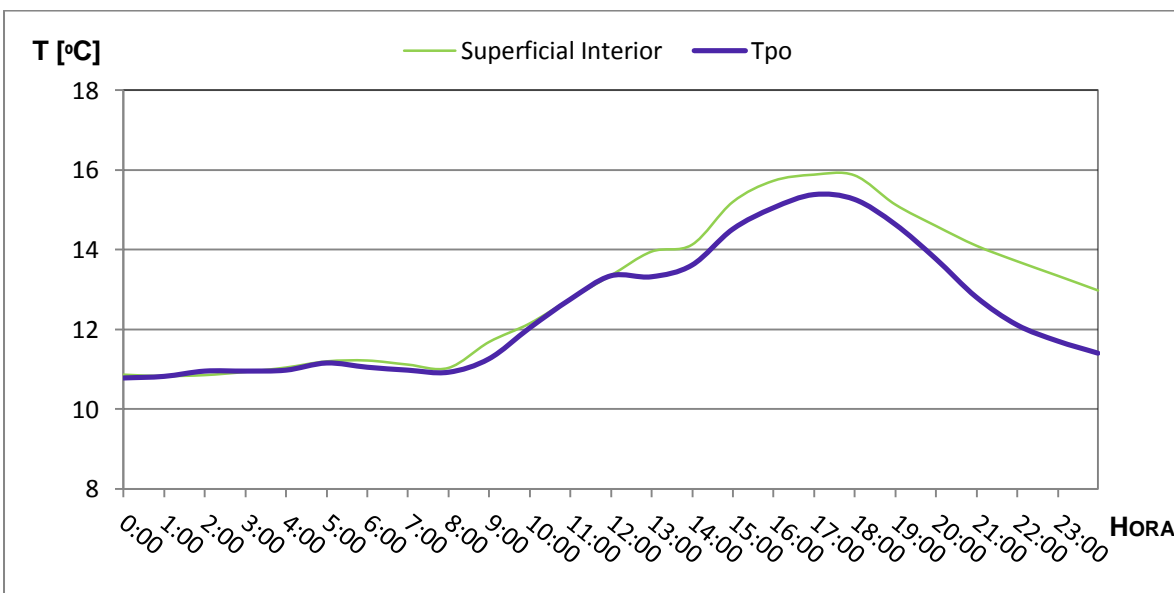


Fig. 36: Evolução da temperatura para o dia 5 de Janeiro

Na Fig. 37 apresenta-se a evolução da pressão parcial de vapor.

Ao contrário do que se verificou na Fig. 34, as pressões de vapor no interior não tomam valores inferiores aos da exterior mas sim superiores, a partir do início da ocupação do bloco.

Note-se que o dia 4 de Janeiro é um dia de transição, com o retomar das actividades escolares depois de uma interrupção. Assim, e apesar de no dia 4 de Janeiro a renovação do ar se revelar suficiente para a redução da pressão parcial de vapor, o mesmo não se verifica para os períodos normais de actividade lectiva.

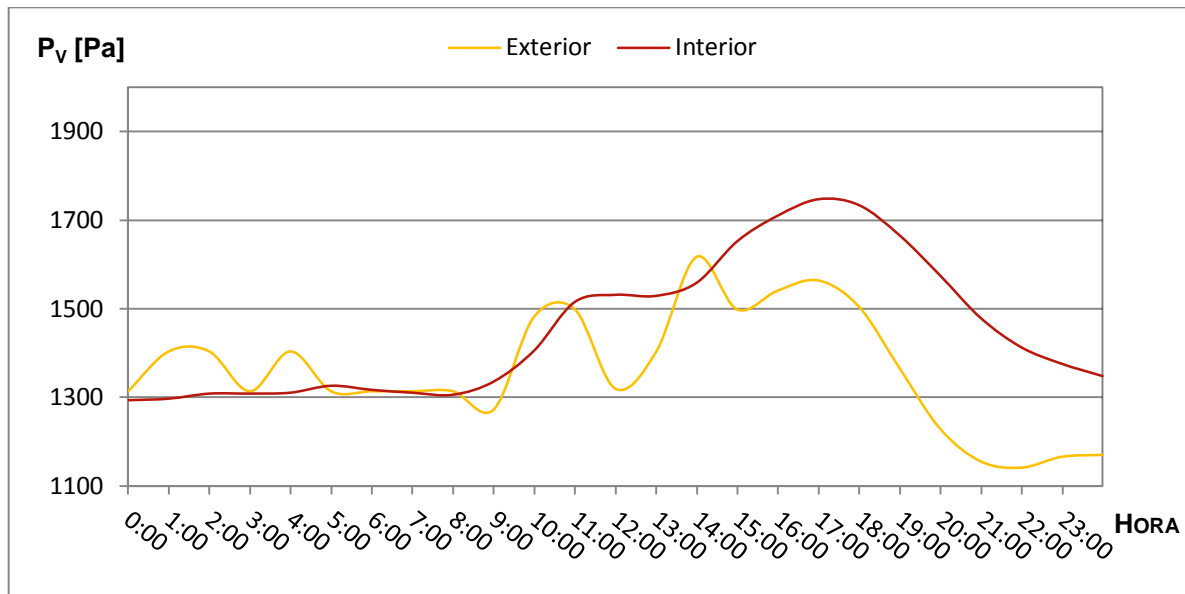


Fig. 37: Evolução da pressão parcial de vapor para o dia 5 de Janeiro

#### 4.2.3.7. Comparação entre as diferentes paredes constituintes do bloco

De forma a averiguar se há grandes discrepâncias entre as várias paredes constituintes do bloco escolar, relativamente à percentagem de vapor de água presente à sua superfície, realizou-se uma análise comparativa entre estas superfícies.

Na Fig. 38, está representada a evolução da humidade relativa interior à superfície das paredes, durante um ano inteiro. Verifica-se que não há uma diferença suficientemente grande para ser notada a nível anual. Todas as paredes percorrem a mesma gama de valores desta variável.

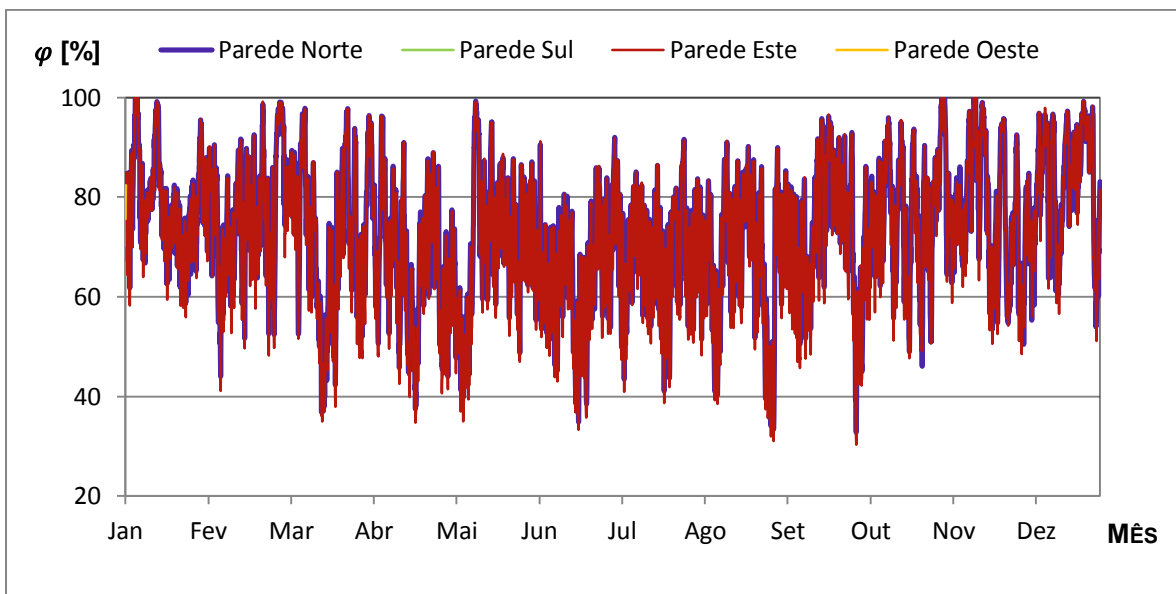


Fig. 38: Evolução da Humidade Relativa à superfície das paredes, durante um ano

Por isso, realizou-se uma aproximação ao mês de Janeiro, ilustrada na Fig. 39.

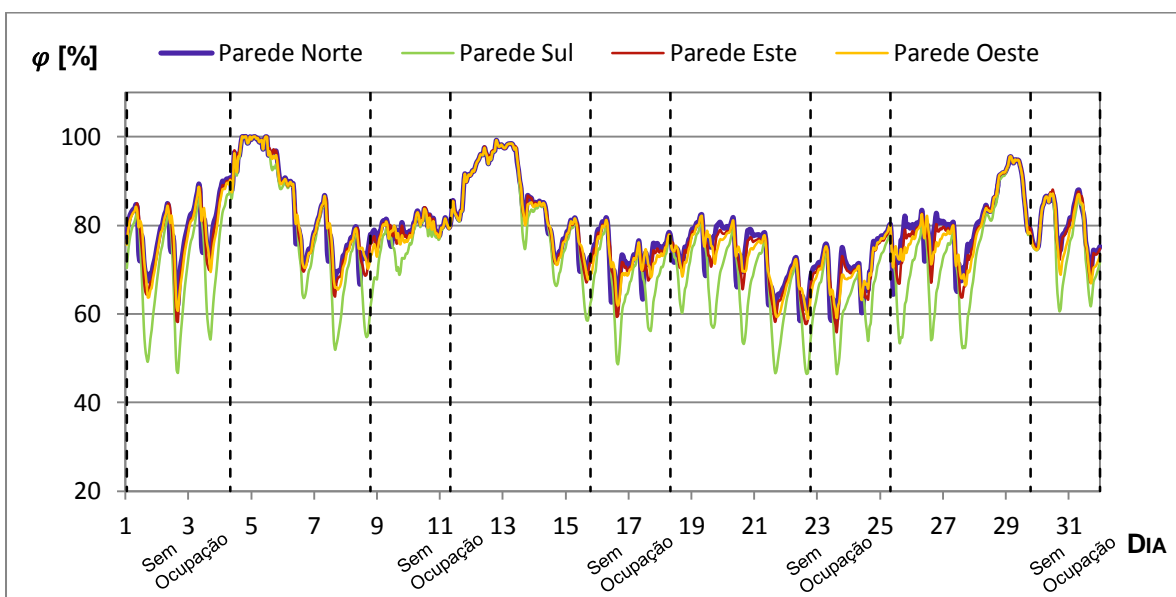


Fig. 39: Evolução da Humidade Relativa à superfície das paredes, no mês de Janeiro

Verifica-se que a parede sul tem maiores flutuações nesta variável. Estas flutuações dão-se especialmente ao nível dos valores mínimos, já que nesta parede se atingem níveis mais baixos que nas restantes. Quanto aos seus valores máximos, estes são aproximadamente iguais aos relativos às restantes paredes.

As outras paredes, Norte, Este e Oeste têm flutuações de humidade relativa idênticas.

Verifica-se, uma vez mais, que é no dia 5 de Janeiro que se atingem os valores mais elevados da humidade relativa à superfície das paredes.

Analisando a Fig. 40, correspondente à evolução da humidade relativa superficial no dia 4 de Janeiro, observa-se que os seus valores partem, no início do dia, de uma gama mais baixa e com um desfasamento entre as diferentes paredes. Ao longo do dia, vão-se aproximando e crescendo até no final do dia haver condensação em todas as paredes.

No início do dia a parede sul tem claramente um valor da humidade relativa muito inferior às restantes. A parede Norte inicia o dia com este valor mais elevado.

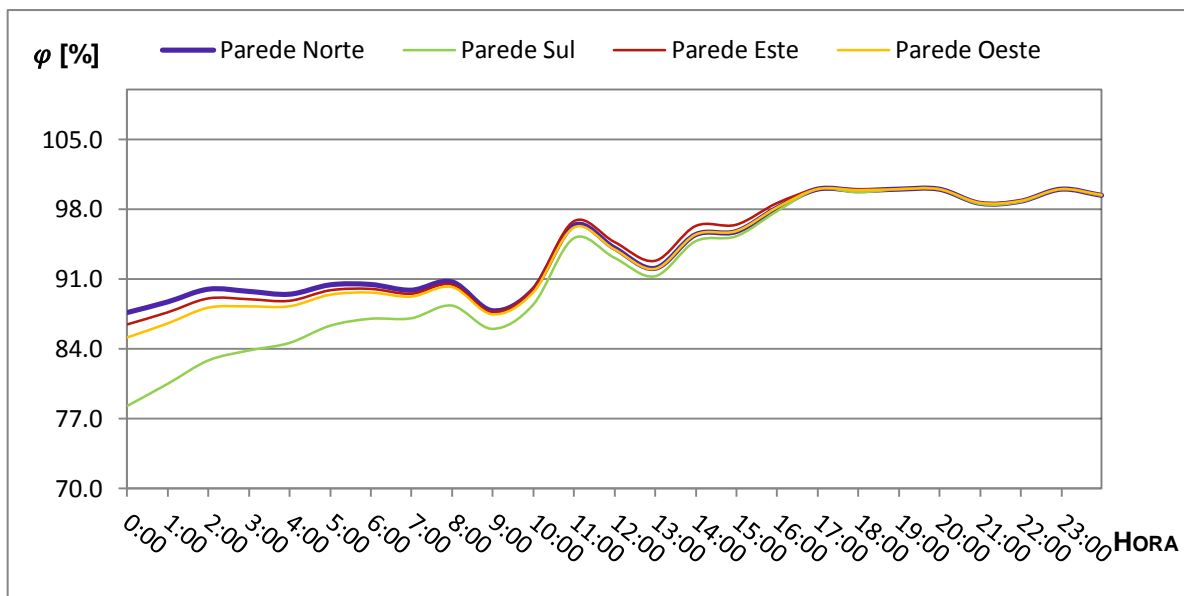


Fig. 40: Evolução horária da Humidade Relativa à superfície das paredes, no dia 4 de Janeiro

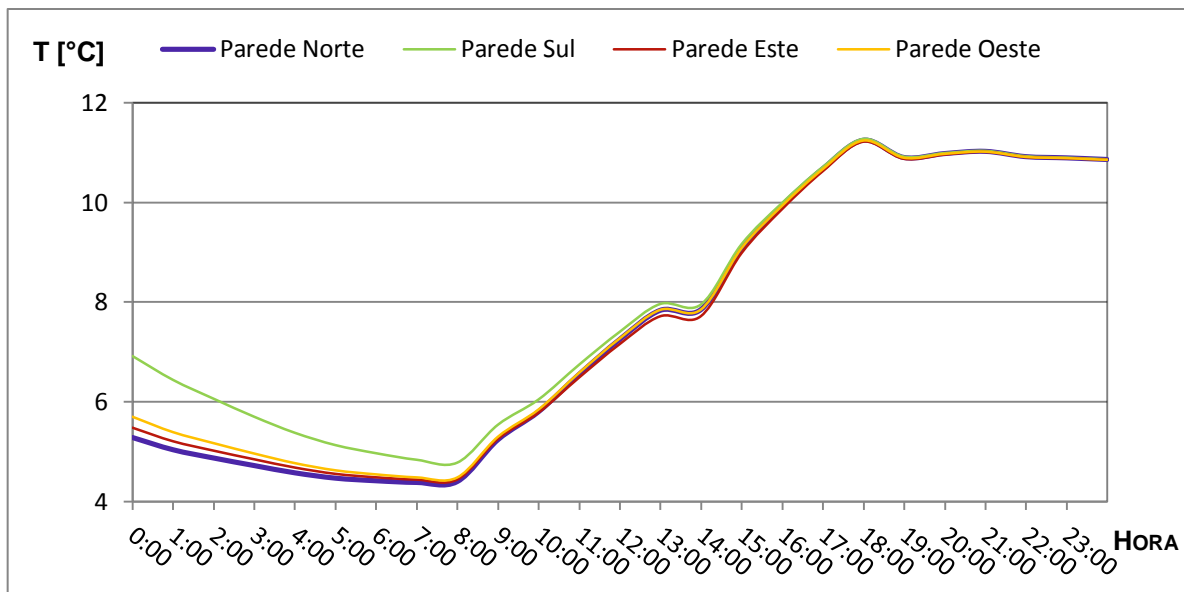


Fig. 41: Evolução horária da Temperatura à superfície das paredes, no dia 4 de Janeiro

Pela Fig. 41 verifica-se que a evolução das temperaturas é no sentido inverso. Note-se que a parede Sul inicia o dia claramente com uma temperatura superior às restantes.

Atentando à Fig. 42, observa-se uma evolução um pouco diferente da respectiva ao dia 4 de Janeiro. Neste dia, os valores partem elevados, mantendo-se elevados até aproximadamente às 12 horas, momento em que entram em decréscimo. Neste decréscimo há um afastamento dos valores das humidades relativas das diferentes paredes, sendo mais evidente na parede sul.

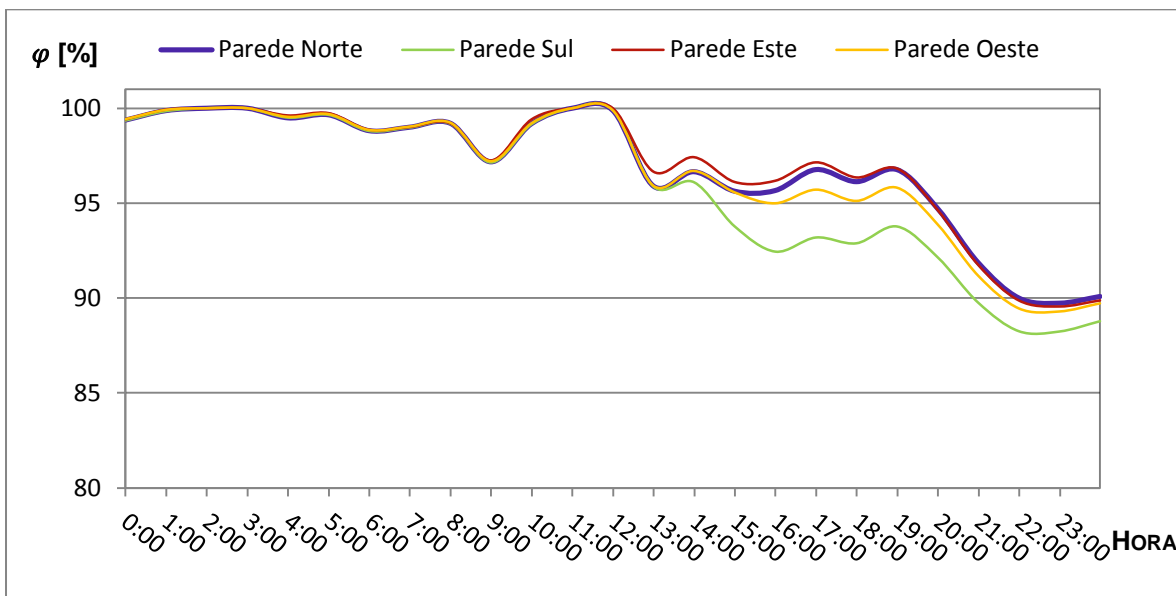


Fig. 42: Evolução horária da Humidade Relativa à superfície das paredes, no dia 5 de Janeiro

Pela Fig. 43 verifica-se uma vez mais que a evolução das temperaturas é no sentido inverso. A parede sul destaca-se pelos valores mais elevados.

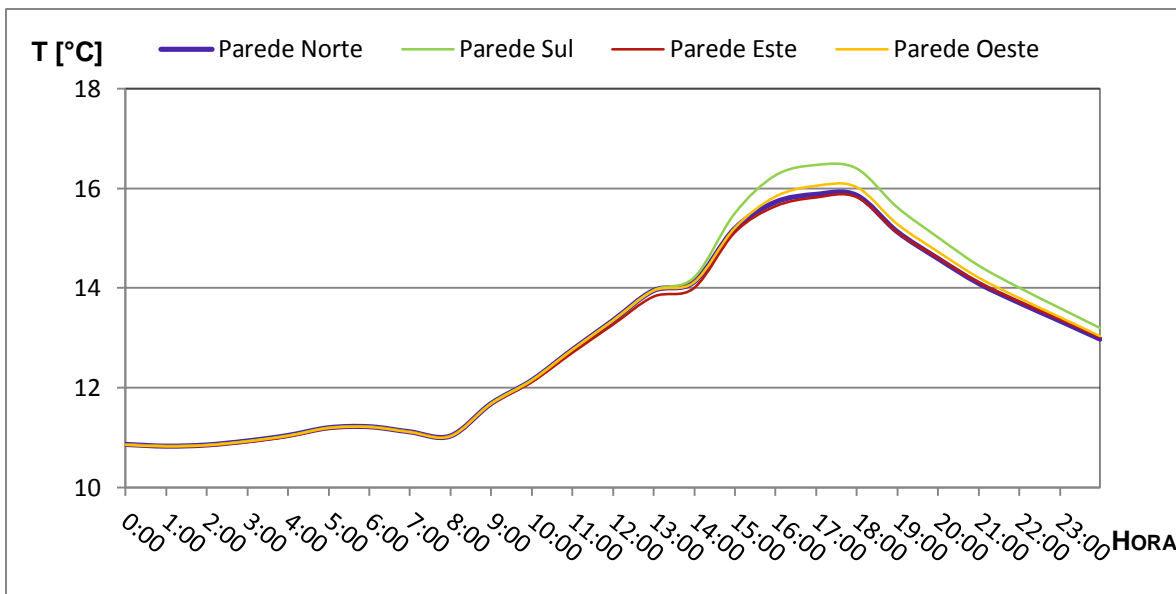


Fig. 43: Evolução horária da Temperatura à superfície das paredes, para o dia 5 de Janeiro

Pelo que foi evidenciado neste subcapítulo, pode-se dizer que as paredes têm uma evolução em termos de humidade relativa e temperatura muito semelhantes, apesar de na parede sul existirem maiores flutuações.

Por isso, pode-se dizer que toda a análise realizada neste capítulo para a parede norte, em termos de condensações e evolução da humidade relativa, pode ser extrapolada para as restantes superfícies. Para a parede sul os resultados revelar-se-iam mais favoráveis em termos de humidade relativa.

#### 4.2.4. SENSIBILIDADE DO MODELO EMPD ÀS VARIAÇÕES DE $\delta_M$

No subcapítulo 4.1.2.2. efectuou-se o cálculo aproximado de  $\delta_M$ . O cálculo desta variável é de uma extrema importância, na medida em que condiciona a previsão do comportamento do edifício face à humidade.

Realizaram-se duas simulações, de forma a investigar qual a sensibilidade do modelo EMPD face à definição da camada de adsorção,  $\delta_M$ . Nestas duas simulações utilizaram-se para valores de camada de adsorção  $\delta_M = 2L$  e  $\delta_M = L/2$ .

Na Fig. 44 mostra-se o resultado destas mesmas simulações, comparando-o com o resultado da simulação original. Em todas as simulações introduziu-se também isolamento térmico nas paredes e um coeficiente de transmissão térmica aos envidraçados.

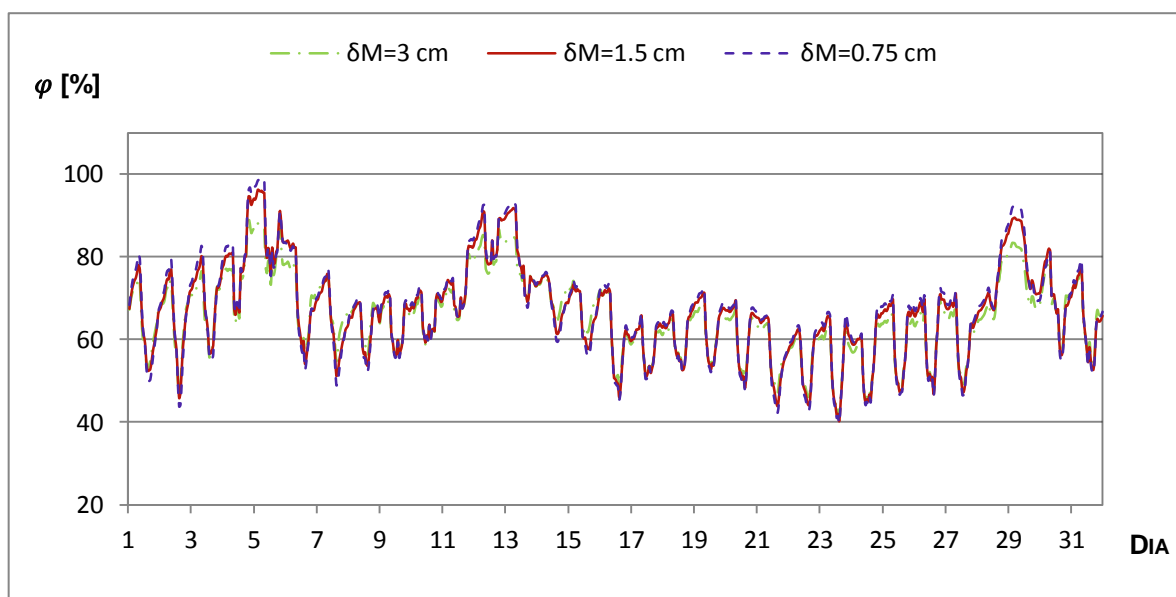


Fig. 44: Evolução da Humidade Relativa interior do edifício, no mês de Janeiro, variando  $\delta_M$

Na Fig. 44 demonstra-se que, quando se simula uma camada de adsorção de comprimento igual a metade da camada de revestimento, a variação da humidade é sobrestimada, ou seja, toma valores acima e abaixo dos máximos e mínimos, respectivamente sentidos no interior do edifício. Por sua vez, quando se toma como comprimento de adsorção o valor do dobro do da camada de revestimento, esta variação de humidade é subestimada, havendo a previsão de os picos serem inferiores aos registados.

Assim, pode-se dizer que o modelo EMPD de previsão da variação da humidade relativa é muito sensível ao comprimento da camada de adsorção, tendo este que ser escolhido muito cuidadosamente.

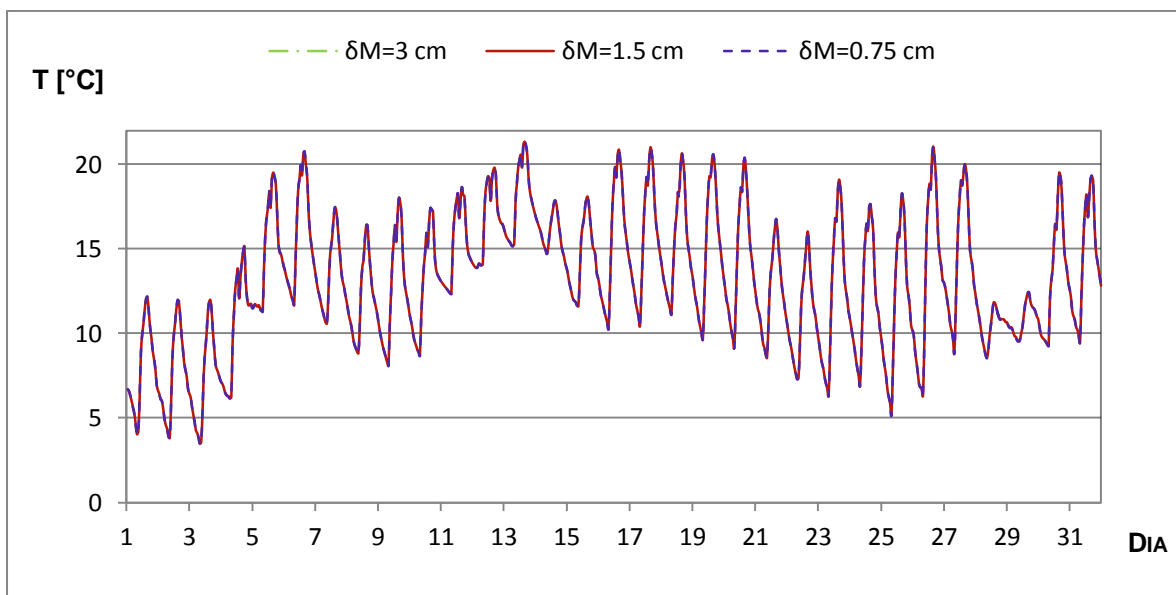


Fig. 45: Evolução da Temperatura interior no mês de Janeiro, variando  $\delta_M$

Observando a Fig. 45 para a mesma simulação, mas agora mostrando a variável temperatura, verifica-se que a variação de  $\delta_M$  não tem qualquer influência na variação da temperatura.

### 4.3. SÍNTESE DOS RESULTADOS

Verificou-se nesta análise de resultados de uma simulação através do programa EnergyPlus, que a contabilização das propriedades higroscópicas por parte dos revestimentos possivelmente constituintes das paredes do edifício, permitiu a identificação do efeito da inércia higroscópica. Este efeito reflectiu-se numa pequena melhoria das condições de humidade, através de um relativo amortecimento das suas variações no interior do bloco. Esta melhoria não se reflectiu num abaixamento total da humidade no interior do edifício mas sim num amortecimento das suas variações.

Verificou-se uma diminuição significativa do número de dias em que ocorreram condensações, verificando-se estas apenas em dias mais críticos. Estas condensações ficaram a dever-se a temperaturas muito baixas ou alterações nas condições de utilização do edifício, que provocaram desregulamento das condições de humidade.

Deve-se tomar muita atenção à escolha da espessura da camada de adsorção, já que se demonstrou que o modelo é muito sensível à definição desta propriedade.

Uma análise comparativa entre os diferentes tipos de revestimento estudados revelou resultados em que os gráficos correspondentes eram quase coincidentes, pelo que se pode dizer que os três tipos de

revestimento, gesso cartonado, gesso projectado e gesso e cal, têm uma contribuição semelhante para a inércia higroscópica.

Os meses mais críticos relativamente ao risco de condensações são os meses mais frios. De entre estes, destaca-se o mês de Janeiro, onde se observam bastantes dias com humidades relativas à superfície das paredes correspondentes às condensações.

O dia 4 de Janeiro revelou-se ser um dia atípico devido ao aumento, ao longo de todo o dia, das temperaturas no interior do bloco. Por ser um dia com estas características de temperatura e também por ser neste dia que as actividades escolares são retomadas, algumas das variáveis analisadas tinham discrepâncias face ao que seria de esperar.

O dia 5 de Janeiro é, por outro lado, um dia típico, em que se verificou um aumento e posterior diminuição da temperatura ao longo do dia.

Com ocupantes no bloco, observa-se um aumento da temperatura interior devido aos ganhos introduzidos pelos alunos e iluminação.

A análise da pressão parcial de vapor no interior do edifício revelou que a renovação do ar no interior do edifício, face à ocupação, não é suficiente para o seu abaixamento.

Da análise comparativa da humidade relativa e da temperatura ao nível da superfície de cada uma das paredes constituintes do bloco, concluiu-se que todas tomavam a mesma gama de valores, sendo que a parede a sul tendia a ter melhores valores.

Tal dever-se-á à localização desta parede, que recebe mais radiação solar, tendo maiores ganhos de calor e conseqüentemente maiores amplitudes térmicas.

Finalmente, é de notar que, apesar de se notar uma melhoria significativa das condições no interior do bloco, estas estão longe de ser consideradas as ideais, pelo que os seus utilizadores irão continuar a sentir desconforto na sua utilização.

De acrescentar ainda que nas condições em que foi simulado o edifício, os valores da humidade relativa encontravam-se em média na gama dos 70%.

Esta elevada humidade no interior dos edifícios, agregada a outros factores, potencia o crescimento de diversos microrganismos, como bactérias e fungos, que afectam o ser humano através do aparecimento de alergias tipo rinites, asma e outras doenças respiratórias.



# 5

## Discussão dos Resultados

### 5.1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos três estudos desenvolvidos no âmbito da escola de Gueifães, analisou-se em detalhe o comportamento higrotérmico de um dos seus blocos.

Os trabalhos realizados anteriormente focaram-se no comportamento térmico do edifício. Este estudo focou-se essencialmente no comportamento higrotérmico.

Neste capítulo pretende-se, portanto, realizar uma síntese de todos os estudos realizados até ao momento, de forma a averiguar qual a contribuição das alterações propostas para o comportamento higrotérmico do edifício, do ponto de vista construtivo.

Pretende-se, então, efectuar uma síntese de todos os estudos desenvolvidos até ao momento, de forma a mostrar um panorama geral dos benefícios colhidos mediante as pequenas alterações que vieram a ser propostas ao longo de cada um dos estudos. Os dados iniciais de simulação mantêm-se, apenas se variando os parâmetros que se pretendem otimizar.

Verificar-se-á ainda neste capítulo se as alterações propostas ao edifício, no seu conjunto, seriam capazes de o dotar de conforto térmico e melhorar a qualidade do ar interior.

### 5.2. VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DOS ENVIDRAÇADOS

A investigação desenvolvida por Esteves (2011) focava-se no estudo dos ganhos solares por parte dos envidraçados. Houve, então, um foque no coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados aquando das simulações.

Na Fig. 46 representa-se a evolução da humidade relativa para o mês de Janeiro, apenas variando o coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados. Nesta simulação não foram introduzidos quaisquer isolamentos térmicos nem se contabilizou a higroscopicidade.

Observando a figura, verifica-se que o coeficiente de transmissão térmica não tem uma influência determinante na variável humidade relativa, uma vez que os seus valores são muito semelhantes, qualquer que seja o coeficiente de transmissão térmica utilizado.

Um envidraçado é tanto melhor quanto menor for o seu coeficiente de transmissão térmica,  $U_{env}$ . Este coeficiente afecta de forma mais directa a temperatura, e indirectamente a humidade.

A Fig. 46 não permite verificar qual é a acção da alteração do coeficiente de transmissão térmica aos envidraçados.

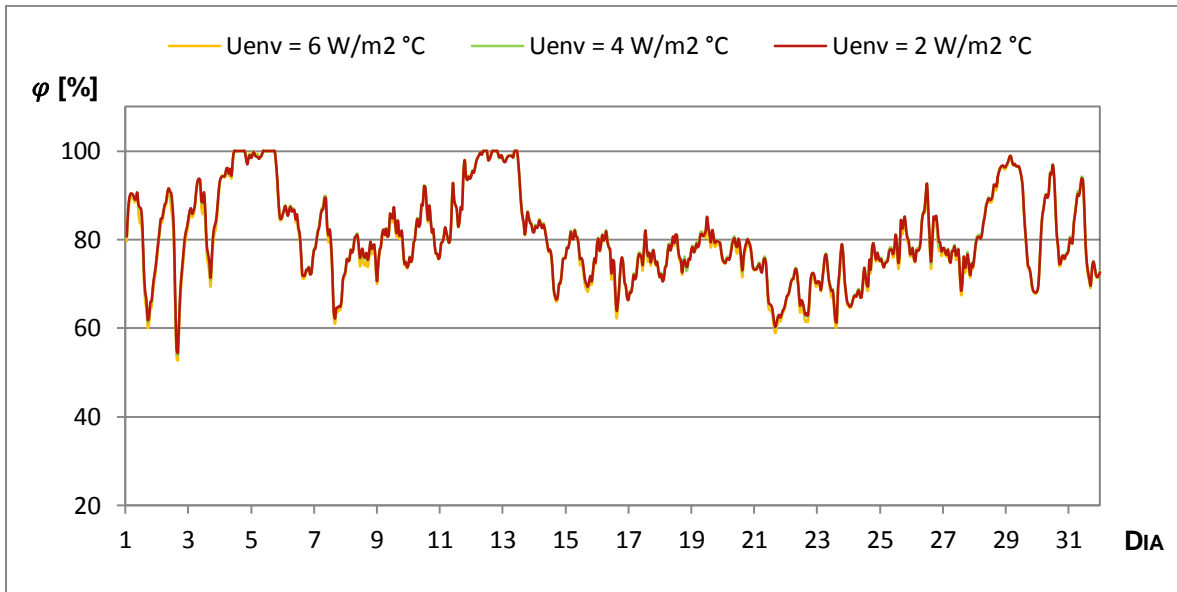


Fig. 46: Evolução da humidade relativa à superfície da parede interior do edifício, para o mês de Janeiro, apenas variando o coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados

Por isto, apresentam-se o Quadro 12 e o Quadro 13.

Com a melhoria do coeficiente de transmissão térmica nos envidraçados as temperaturas médias registadas diminuem, embora de uma forma muito reduzida.

Quadro 12: Temperaturas médias à superfície das paredes, em Janeiro

$U_{env} = 6 \text{ W/m}^2\text{°C}$	$U_{env} = 4 \text{ W/m}^2\text{°C}$	$U_{env} = 2 \text{ W/m}^2\text{°C}$
9.79 °C	9.68 °C	9.69 °C

No Quadro 13 apresenta-se o percentil 90 para a humidade à superfície das paredes. Note-se que a diferença entre percentis, entre os vários coeficientes de transmissão térmica dos vidros é muito subtil, apenas afectando a dezena da unidade.

Quadro 13: Percentil 90 da Humidade para o mês de Janeiro

$U_{env} = 6 \text{ W/m}^2\text{°C}$	$U_{env} = 4 \text{ W/m}^2\text{°C}$	$U_{env} = 2 \text{ W/m}^2\text{°C}$
96.61 %	96.87 %	96.88 %

Com o que foi apresentado, pode-se afirmar que, havendo melhoria do coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados, mas não havendo alteração de qualquer outro sistema de isolamento, o edifício não é capaz de eliminar as condensações no interior do edifício, nem mesmo de alterar as condições de humidade relativa.

Tal poderá dever-se à falta de capacidade de elevar a temperatura à superfície da fachada. Isto implica, consequentemente, que as condições de humidade no interior do edifício também não são as mais adequadas.

### 5.3. VARIAÇÃO DA ESPESSURA DO ISOLAMENTO TÉRMICO EM CONJUNTO COM O COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DOS ENVIDRAÇADOS

O estudo desenvolvido por Santos (2010) debruçava-se sobretudo na análise da influência do isolamento térmico no comportamento higrotérmico do bloco escolar.

O trabalho desenvolvido por Esteves (2011) avaliou o efeito combinado da alteração da espessura do isolamento térmico nas paredes de fachada em conjunto com o coeficiente de transmissão térmica nos envidraçados.

Na Fig. 47 apresenta-se a evolução da humidade relativa para o mês de Janeiro. Observa-se um deslocamento vertical descendente no gráfico, relativamente ao da Fig. 46, com excepção de alguns dias pontuais, nomeadamente a 5 de Janeiro.

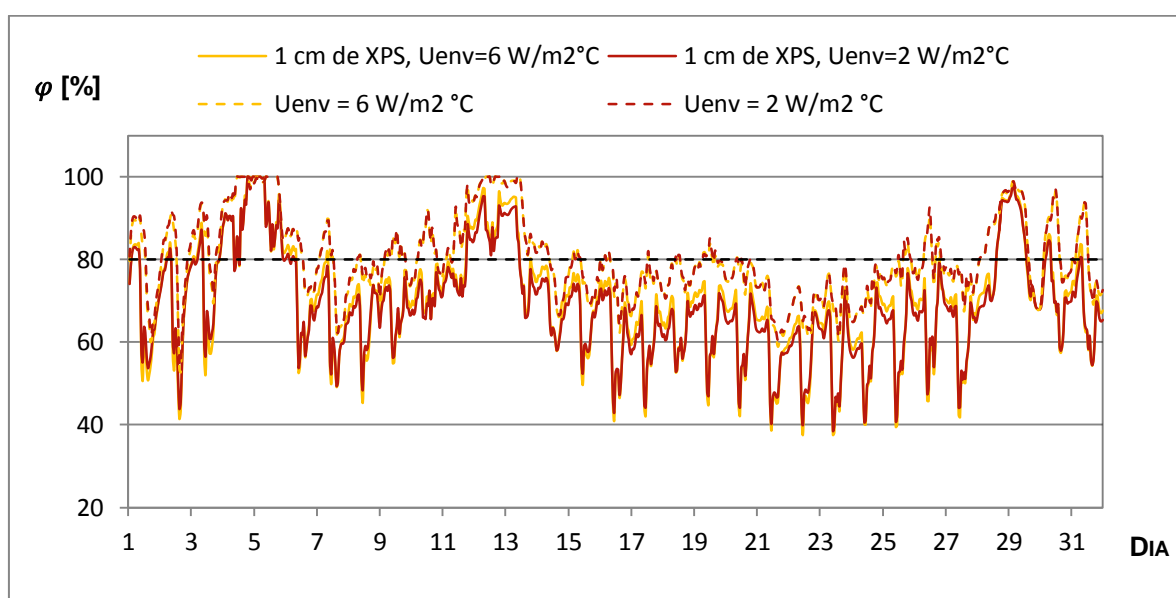


Fig. 47: Evolução da humidade relativa superficial no mês de Janeiro para 1 cm de isolamento e variando o coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados

Este abaixamento dos valores da humidade relativa deve-se sobretudo à introdução do isolamento térmico nas paredes, que provocou uma subida acentuada da temperatura superficial interior (Fig. 48).

Comparando o Quadro 14 com o Quadro 13 constata-se que a introdução do isolamento térmico provocou uma perda percentual dos valores máximos da humidade.

Quadro 14: Percentil 90 da Humidade para o mês de Janeiro

<b>1 cm de XPS</b> $U_{env} = 6 \text{ W/m}^2\text{°C}$	<b>1 cm de XPS</b> $U_{env} = 2 \text{ W/m}^2\text{°C}$
88.77 %	87.64 %

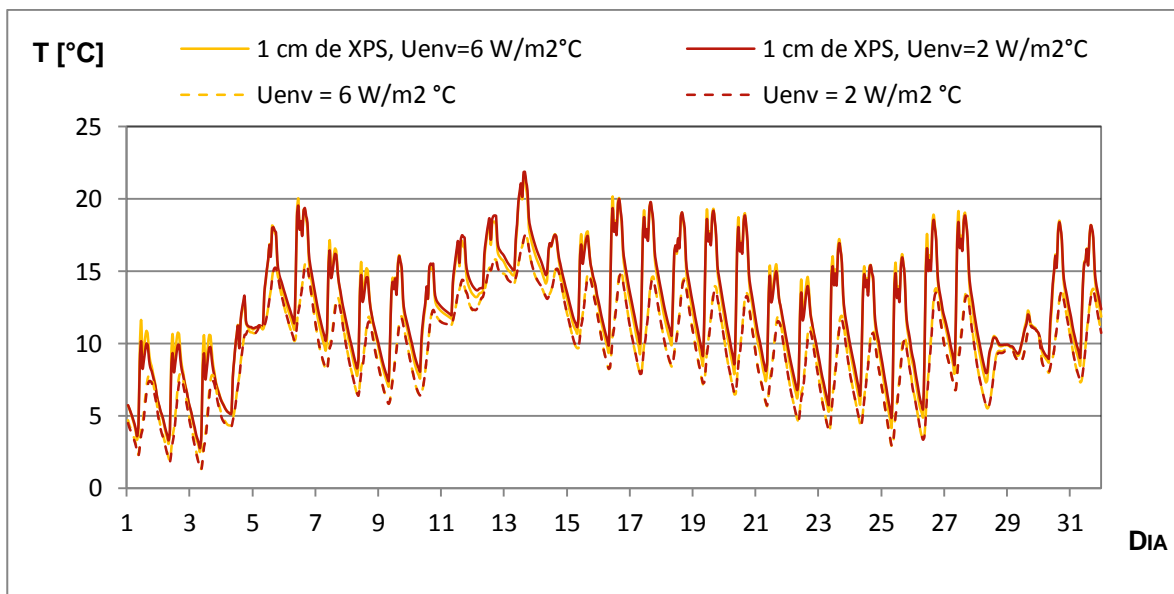


Fig. 48: Evolução da temperatura superficial no mês de Janeiro para 1 cm de isolamento e variando o coeficiente de transmissão térmica

Repare-se, no entanto, que a variação do coeficiente de transmissão térmica, para o dia mais crítico do ano, 5 de Janeiro, não se traduz em melhorias na humidade relativa para os valores mais elevados (Fig. 49).

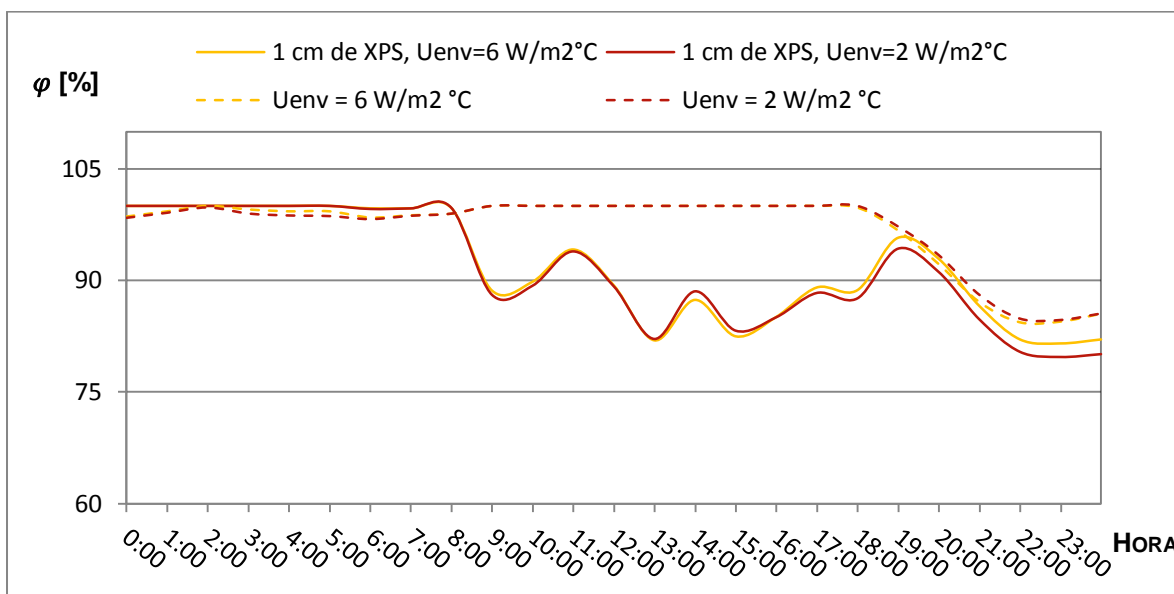


Fig. 49: Evolução da humidade relativa superficial no dia 5 de Janeiro para 1 cm de isolamento e variando o coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados

Assim, pode-se dizer que o coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados não contribui de forma muito eficaz para a eliminação das condensações no interior do edifício.

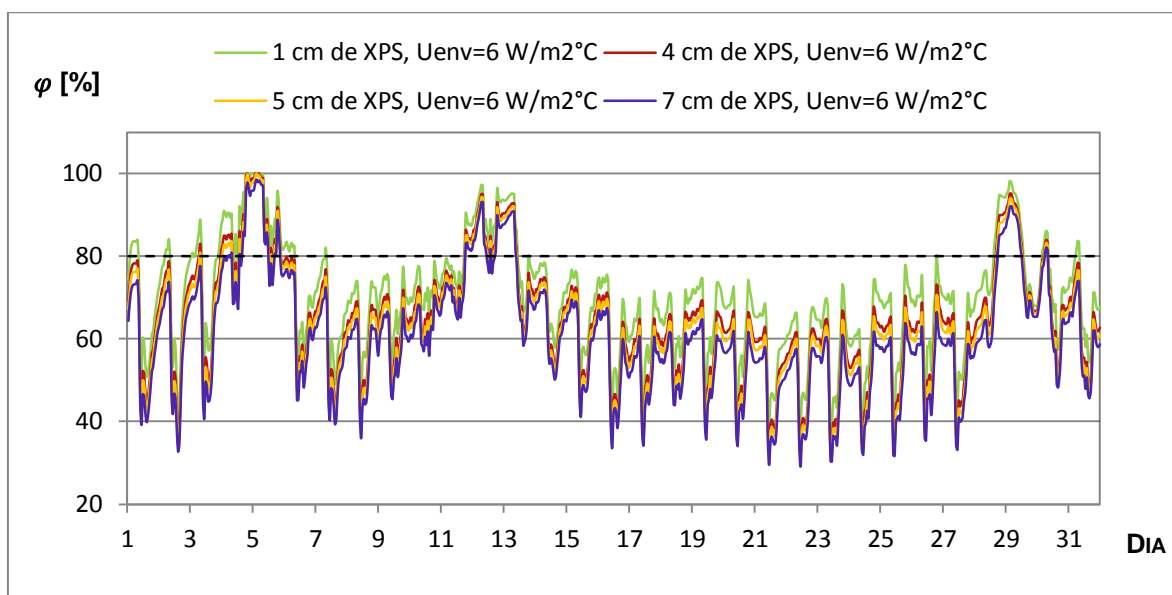


Fig. 50: Evolução da humidade relativa superficial para o mês de Janeiro, variando a espessura de isolamento

Na Fig. 50 ilustra-se a influência da variação da espessura do isolamento na humidade relativa à superfície da parede do interior do bloco. O aumento da espessura do isolamento térmico traduz-se, uma vez mais, na translação descendente do gráfico.

Neste momento do estudo, já se conseguiu, em todos os dias do mês, eliminar a ocorrência de condensações para uma espessura de isolamento de 7 cm. Para as restantes espessuras, a ocorrência de condensações verifica-se apenas no dia 5 de Janeiro.

Pretende-se agora avaliar o risco de desenvolvimento de fungos. Foi referido na subsecção 2.1.6, que a análise desse risco se reveste de uma enorme complexidade. Procurou-se, então, definir indicadores desse risco, com o objectivo de estabelecer comparações entre as simulações, não pretendendo com isso avaliar de modo absoluto o risco.

O parâmetro foi definido numa perspectiva temporal: se em mais de metade do tempo se verificar que a humidade relativa superficial é superior a 80%, então há risco de desenvolvimento dos bolores.

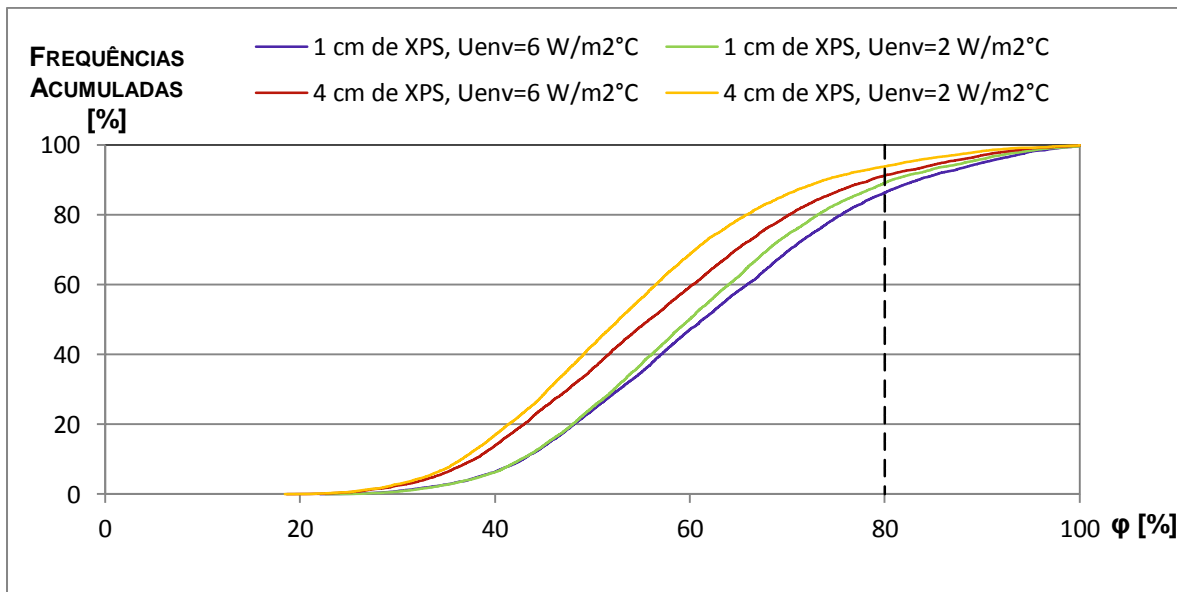


Fig. 51: Frequências acumuladas da variação da humidade relativa à superfície da parede ao longo de um ano

Na Fig. 51 apresentam-se as frequências acumuladas da variação da humidade relativa à superfície da parede. O parâmetro de avaliação do risco referido em cima materializa-se na linha a tracejado. Caso essa linha intersecte algum dos gráficos para uma frequência acumulada acima de 50%, então nesse caso poder-se-á dizer que não há risco de desenvolvimento de fungos.

Pode-se dizer que este indicador está a ser respeitado, numa perspectiva anual. Para qualquer um dos gráficos apresentados, a humidade relativa de 80% corresponde a uma frequência acumulada muito acima dos 50%.

Resta apenas saber se este indicador está a ser respeitado mensalmente e nos ciclos diários.

#### 5.4. CONTRIBUIÇÃO DA INÉRCIA HIGROSCÓPICA

Finalmente, introduziu-se o revestimento higroscópico, que foi objecto de estudo aprofundado nesta dissertação, ao conjunto isolamento térmico nas paredes opacas e envidraçados.

##### 5.4.1. ESCOLHA DO CONJUNTO IDEAL

Na Fig. 52 compara-se a evolução da humidade relativa em Janeiro, com e sem inércia higroscópica. Verifica-se que a introdução do EMPD na contabilização do revestimento higroscópico se traduz numa menor amplitude de variações, entre os valores mais baixos e mais altos. Verifique-se até que, para os dias em que os picos mais altos de humidade eram reduzidos, com a introdução do EMPD, estes se registaram mais elevados. Porém, para os dias mais críticos, a introdução do revestimento higroscópico traduziu-se numa redução na humidade relativa.

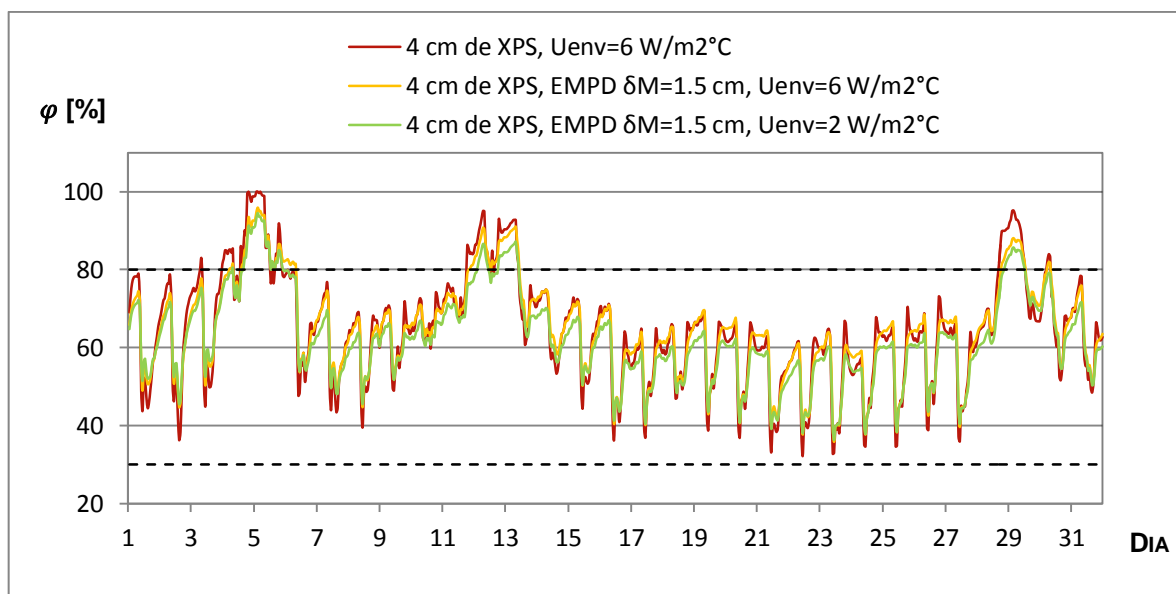


Fig. 52: Evolução da humidade relativa superficial para o mês de Janeiro. Comparação de gráficos sem e com EMPD

Com isolamento nas paredes opacas e nos envidraçados, em conjunto com o revestimento higroscópico, consegue-se colocar a humidade relativa na gama definida como limite ideal de variação na maioria dos dias de Janeiro.

No Quadro 15 faz-se um resumo comparativo de alguns parâmetros, para ajudar a compreender melhor a ação do revestimento no comportamento geral do edifício.

Repare-se que, em termos de humidade relativa média, os valores são aproximadamente iguais. No entanto, atentando aos percentis, verifica-se que com o revestimento higroscópico os valores diminuem para o percentil de 90 e aumentam para o de 10. Isto confirma o que foi dito anteriormente: a amplitude dos valores relativos à humidade é sensivelmente menor quando se introduz o revestimento.

A melhoria do coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados provoca uma redução geral dos valores, inclusive no valor médio. Esta redução é também pouco acentuada.

Quadro 15: Comparação entre valores com e sem revestimento higroscópico

	<i>4 cm de XPS, <math>U_{env} = 6 W/m^2°C</math></i>	<i>4 cm de XPS, Com EMPD <math>\delta M = 1.5 cm,</math> <math>U_{env} = 6 W/m^2°C</math></i>	<i>4 cm de XPS, Com EMPD <math>\delta M = 1.5 cm,</math> <math>U_{env} = 2 W/m^2°C</math></i>
$\varphi_{média}$	64.75 %	64.88 %	62.56 %
$P_{90\%}$	84.35 %	82.10 %	79.69 %
$P_{10\%}$	46.94 %	49.01 %	48.43 %

Na Fig. 53 apresentam-se as frequências acumuladas da humidade relativa na superfície da parede para as quatro contribuições estudadas. Estão representados, primeiro separadamente e depois em conjunto, cada um dos materiais introduzidos, de forma a permitir uma análise comparativa dos benefícios

adicionados por cada um deles. Em todos há resistência térmica no envidraçado e toma o valor de  $U_{env} = 6 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

Note-se que cada uma das contribuições constitui numa melhoria das condições higroscópicas da superfície das paredes do bloco.

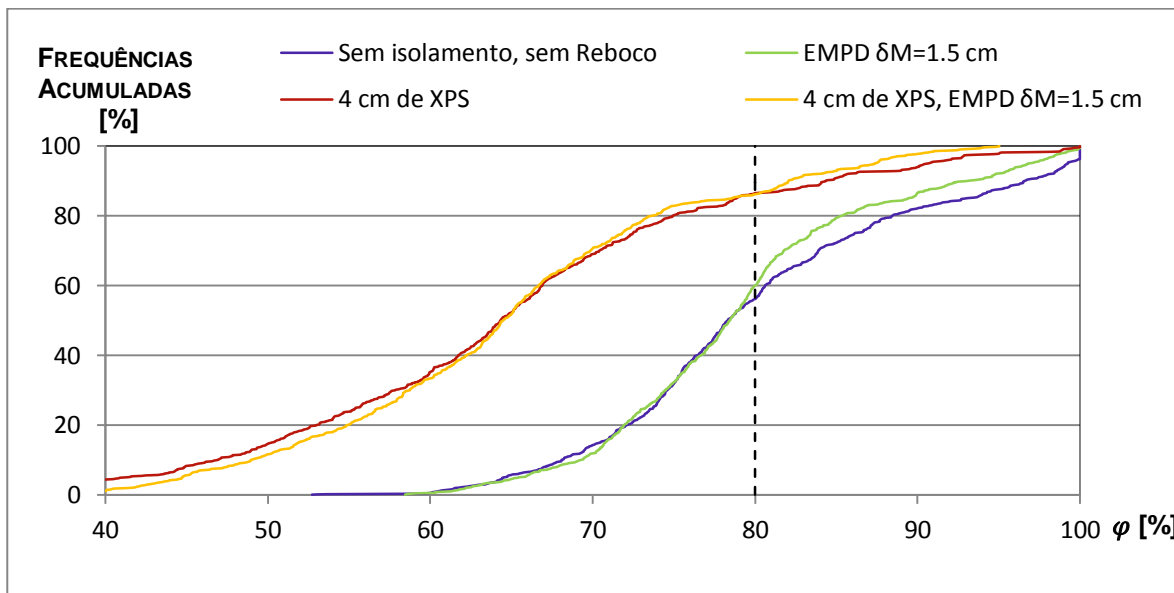


Fig. 53: Frequências acumuladas da variação da humidade relativa à superfície da parede ao longo do mês de Janeiro

A introdução do isolamento provoca uma translação do gráfico para a esquerda, enquanto a introdução do revestimento higroscópico provoca uma menor dispersão dos valores da humidade relativa em relação à média. Uma vez mais se ilustra aqui a propriedade principal da higroscopicidade, que consiste sobretudo no aumento da frequência dos valores médios, não tendo grandes reflexos na grandeza desses mesmos valores médios.

Note-se que os gráfico a amarelo e a vermelho contribuem mais activamente para a redução do risco de desenvolvimento de fungos. O indicador de risco é respeitado quando existe isolamento nas paredes, tanto com higroscopicidade como sem higroscopicidade.

Na Fig. 54 apresenta-se a evolução da humidade relativa no interior do bloco para o dia mais crítico do ano, 5 de Janeiro. Aos dados representados adicionou-se mais um, correspondente ao conjunto, mas com  $U_{env} = 2 \text{ W/m}^2$ .

Verifica-se uma melhoria em termos de humidade relativa com a introdução de cada um dos materiais. Neste dia não foi, porém, possível baixar suficientemente a humidade relativa na superfície das paredes de forma a respeitar o limite imposto de humidades abaixo dos 80% em pelo menos metade do dia.

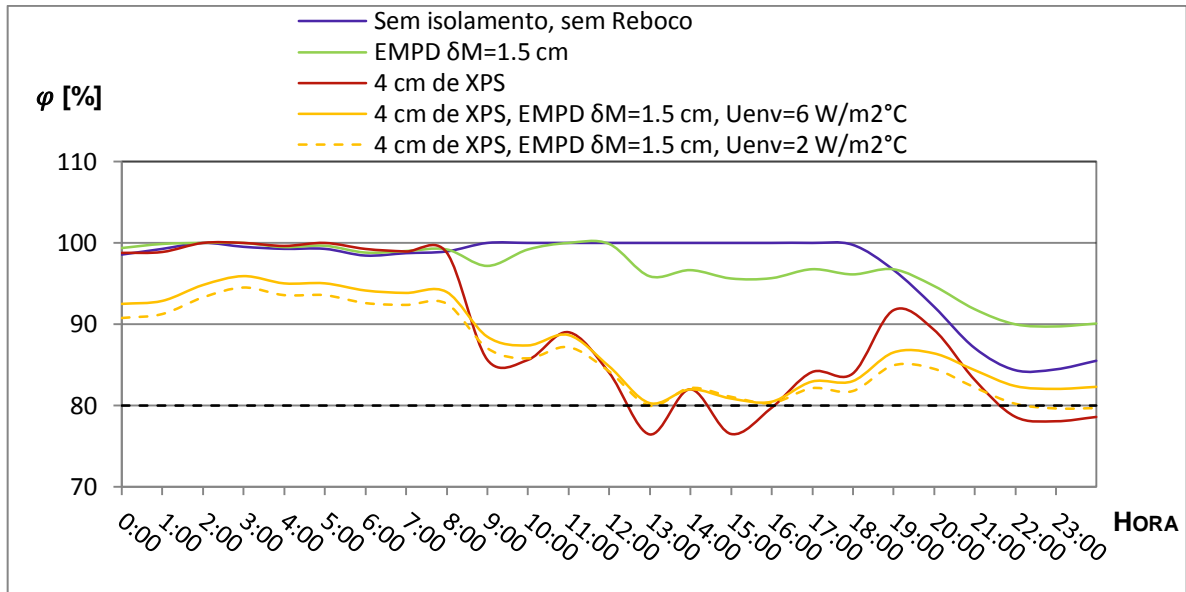


Fig. 54: Evolução da humidade relativa superficial no interior do edifício para o dia 5 de Janeiro.

Na Fig. 55 representam-se as frequências acumuladas para os dias mais críticos do ano: 4 e 5 de Janeiro. Note-se que não é possível de todo reduzir a humidade à superfície das paredes para que se respeite o imposto como limite para evitar o risco de aparecimento de fungos.

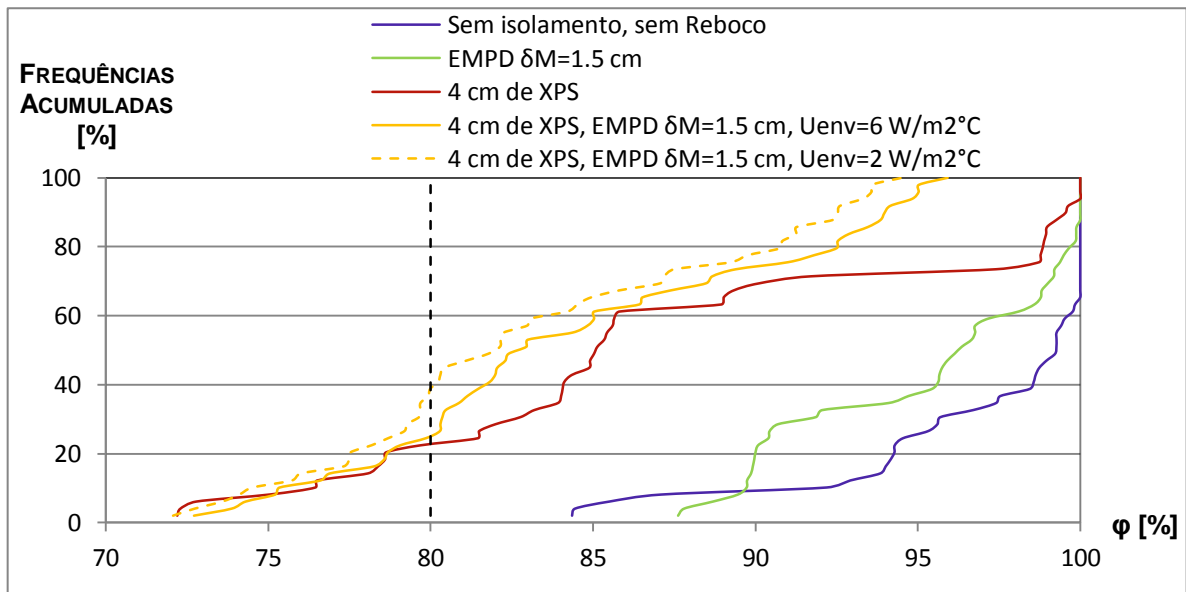


Fig. 55: Frequências acumuladas da variação da humidade relativa à superfície da parede para os dias mais críticos do ano: 4 e 5 de Janeiro

No entanto, é visível a influência da higroscopicidade, com o estreitamento dos gráficos amarelos e verde.

#### 5.4.2. INFLUÊNCIA DA VENTILAÇÃO NO CONJUNTO

Neste subcapítulo pretende-se verificar qual a influência da ventilação no comportamento higroscópico do edifício.

No presente momento, encontram-se regulamentados os valores mínimos de ventilação que deverão existir num determinado espaço. Ora, sabe-se que a ventilação tem uma enorme influência na regulação dos níveis de humidade de um espaço interior.

Pretende-se, então, efectuar uma análise de qual seria a resposta por parte dos materiais higroscópicos caso se adoptasse uma renovação horária de ar substancialmente menor.

Nas Fig. 56 e Fig. 57 apresentam-se os resultados de simulações com 2.2 e 1.0 renovações horárias, respectivamente, comparando os valores sem e com higroscopicidade. Em todos os gráficos de introduziu também isolamento térmico nas paredes de 4 cm e  $U_{env} = 6 \text{ W/m}^2\text{C}$ .

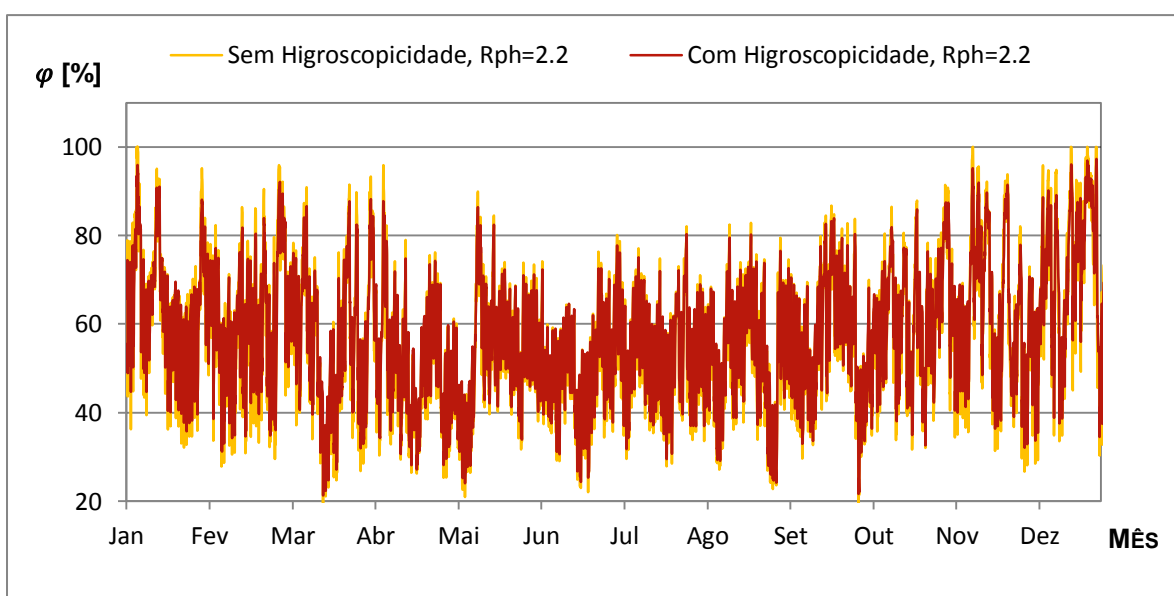


Fig. 56: Evolução da humidade relativa à superfície para uma ventilação de 2.2 renovações por hora

Comparando as duas figuras, pode-se dizer que o efeito da higroscopicidade é mais evidente quando se efectua uma renovação horária de ar de 1.0. O efeito da inércia higroscópica é mais evidente para menores valores de ventilação.

Quer isto dizer que a capacidade de adsorção de vapor de água por parte dos materiais higroscópicos é mais evidente quando os níveis de ventilação são baixos.

Quando os níveis de renovação horários são altos, a contribuição para a regulação da humidade faz-se em conjunto com o revestimento, pelo que se denota uma menor eficácia por parte dos materiais higroscópicos na atenuação da humidade relativa.

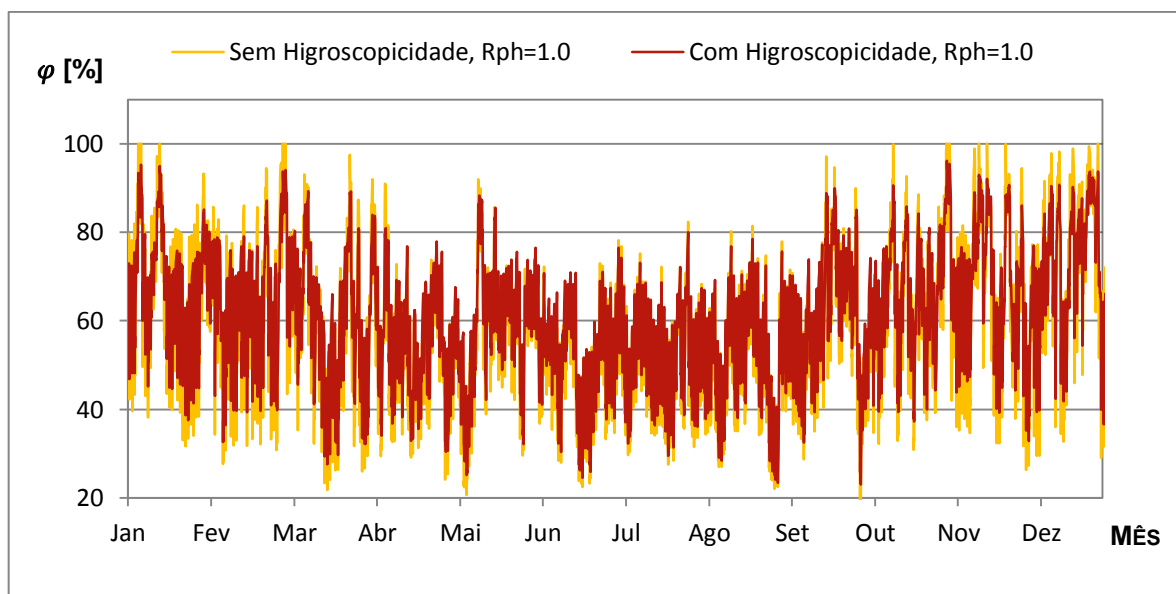


Fig. 57 Evolução da humidade relativa à superfície para uma ventilação de 1.0 renovações por hora

## 5.5. SÍNTESE DOS RESULTADOS

O presente capítulo tem como objectivo efectuar uma síntese dos estudos que foram desenvolvidos até ao momento, de forma a analisar qual a contribuição, separadamente e em conjunto, de cada um deles na correcção das patologias que o bloco escolar apresentava.

Pode-se dizer que cada um dos parâmetros estudados tem um objectivo e uma melhoria específica, que na maioria das vezes só está optimizada quando interage com um ou mais parâmetros.

O objectivo final na reabilitação do edifício era o de possibilitar um ambiente termicamente confortável para a prática do ensino, pelo se definiu como objectivo desta optimização do conjunto a limitação da humidade ao intervalo entre 30% e 80%, referido em 2.1.6.4.

No Quadro 16 apresentam-se em resumo os vários parâmetros estudados ao longo do capítulo e respectivas repercussões na humidade relativa superficial. Com a introdução de cada uma das novas propriedades, conseguiu-se baixar estas humidades à superfície para o intervalo limite, em 90% do tempo.

Pela análise do quadro e pelo que foi sendo comentado ao longo do capítulo, pode-se dizer que o coeficiente de transmissão térmica do envidraçado, quando não é colocado em conjunto com o isolamento térmico, não tem uma influência activa no abaixamento da humidade. Isto acontece porque, por mais que se melhorem as características dos envidraçados, reduzindo as perdas de calor pelas janelas, há grandes perdas pelas paredes. Não conseguindo melhorar a temperatura no interior do bloco, não é possível reduzir a humidade relativa à superfície das paredes.

A introdução do isolamento térmico introduz melhorias no comportamento higrotérmico do edifício. Esta melhoria é uma consequência da melhoria do comportamento térmico, ou seja, o isolamento térmico provoca uma subida da temperatura média no interior do edifício. Com temperaturas mais altas, menos humidade relativa.

Quadro 16: Influência dos diferentes parâmetros estudados na humidade relativa à superfície da parede

$U_{env}$ [W/m <sup>2</sup> °C]	6	4	2	6	2	6	6	2
XPS [cm]				1	1	4	4	4
$\delta_M$ [cm]							1.5	1.5
$\varphi_{média}$ [%]	74	74	74	62	61	57	57	55
$P_{90}$ [%]	94	94	94	83	81	79	78	73
$P_{10}$ [%]	54	55	43	43	43	38	40	38
Nº de dias com Condensação	32	32	31	7	7	6	0	0

A espessura mais favorável seria a maior, porém há que haver um compromisso entre vantagens de comportamento higrotérmico e a área útil retirada pelo acréscimo do material à envolvente.

Finalmente, a introdução do revestimento higroscópico introduziu algumas melhorias no comportamento higrotérmico do edifício. A sua introdução reflectiu-se essencialmente nos picos de humidade, tanto máximos como mínimos. Quer isto dizer que a introdução do revestimento provoca uma redução da amplitude entre os máximos e mínimos de humidade, acabando por não interferir de uma forma muito significativa na humidade relativa média registada. No entanto, estas melhorias não foram muito acentuadas, já que os níveis de ventilação eram altos, realizando uma regulação, à partida, dos níveis de humidade registados no edifício.

É de notar que, para um modelo optimizado, mas sem higroscopicidade, ocorriam 6 dias com condensação à superfície da parede. Juntando o revestimento higroscópico ao modelo, conseguiu-se eliminar as condensações à superfície da parede na sua totalidade.

Analisou-se, ainda, o risco de desenvolvimento de fungos. Para isso definiu-se um indicador temporal em que a humidade não poderia ser superior aos 80%. Verificou-se que tal indicador foi respeitado para o conjunto: isolamento térmico de 4 cm, coeficiente de transmissão térmica do envidraçado de 6 W/m<sup>2</sup>°C e revestimento higroscópico com  $\delta_M = 1.5$  cm, numa análise anual e mensal do mês mais crítico, Janeiro.

Porém, numa análise centralizada nos dois dias mais críticos, 4 e 5 de Janeiro, tal indicador não foi respeitado. Relembre-se o que foi referido em 2.1.6.2, que o risco de aparecimento de fungos é muito mais elevado quando os picos de humidade relativa alta persistem durante um grande período de tempo. Foi referido em 2.1.6.2 que, para humidades constantes na ordem dos 80%, o crescimento de fungos apenas será potenciado ao fim de 16 semanas.

Por este motivo, pode-se dar como razoável que nos dois dias mais críticos do ano o indicador não seja respeitado.

# 6

## Conclusões

### 6.1. CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO

O conforto térmico e a qualidade do ar são dois conceitos que devem ser analisados com muito cuidado, já que afectam de forma activa os utilizadores dos edifícios. Ao longo dos três estudos desenvolvidos até ao momento, analisaram-se vários procedimentos que poderão tornar o edifício mais confortável e aumentar a sua qualidade geral.

Neste capítulo pretende-se resumir as conclusões retiradas no decorrer deste exercício e verificar se foram atingidos os objectivos propostos no início do trabalho.

De seguida apresentam-se as conclusões retiradas ao longo deste estudo:

- Existem cada vez mais programas de simulação na área da higrotérmica, melhores e mais desenvolvidos. Estes programas simulam cada vez melhor a realidade, permitindo aos projectistas identificar detalhadamente quais as características que satisfazem os objectivos.
- Estudar o fenómeno das condensações superficiais é um desafio por várias razões, mas principalmente por implicar o conhecimento da influência de múltiplos factores que, directa ou indirectamente, promovem este fenómeno.
- A ferramenta EnergyPlus revelou-se muito útil no estudo deste fenómeno de condensações, uma vez que permitiu introduzir em simultâneo muitos factores que influenciam a variação da humidade.
- Para que o modelo seja fiel à realidade, há uma necessidade de recolha de todos os dados do edifício, tais como as características da envolvente, o tipo de utilização, o clima a que está sujeito e qual o regime de ventilação adoptado. Sem estes dados, não é possível efectuar uma análise acertada do comportamento higrotérmico do edifício.
- O estudo exaustivo do modelo inicial existente e a realização de simulações sem introdução de novas propriedades permitiu que se pudesse conhecer o programa, o seu correcto funcionamento e quais as suas potencialidades.
- Quando o edifício foi simulado sem higroscopicidade, registou-se um elevado número de dias em que ocorriam condensações à superfície das paredes.
- A introdução do revestimento com higroscopicidade traduziu-se numa sensível melhoria das características higrotérmicas do bloco escolar. Esta melhoria reflecte-se mais nos picos máximos e mínimos do que no nível de humidades relativas médias.

- A ventilação para renovação de ar no interior dos edifícios revela-se num factor muito importante na avaliação da humidade relativa. Quando a renovação de ar é muito elevada, esta também contribui para a regulação dos níveis de humidade.
- Os materiais com higroscopicidade têm como consequência a uniformização da humidade relativa no interior dos edifícios, dotando os compartimentos de inércia higroscópica. A média da humidade relativa a longo prazo interior não é, porém, alterada pela inércia higroscópica.
- O foco principal do programa EnergyPlus é a previsão das flutuações de temperatura, necessidades energéticas e taxas de renovação de ar.
- O EMPD é um modelo simplificado para simular a adsorção e desadsorção de vapor de água à superfície de paredes.
- Como modelo simplificado, apresenta no entanto algumas limitações.
- A principal limitação do modelo é a necessidade de determinação da camada de adsorção de vapor de água. Esta fina camada, na realidade, não é constituída por toda a espessura do revestimento, mas apenas por uma fina camada à sua superfície.
- O cálculo desta fina camada é complexo e a sua determinação correcta é fundamental para o perfeito funcionamento do modelo de cálculo na simulação. Alterações deste cálculo resultam em registos errados da variação da humidade relativa.
- O modelo de cálculo utilizado apenas contabiliza como materiais higroscópicos os revestimentos localizados na superfície interna das paredes. Para ser um modelo mais fidedigno, deveriam ser integrados no cálculo todos os materiais higroscópicos presentes no espaço estudado.
- Os meses mais críticos em termos de humidade relativa foram dois e por diferentes razões: Janeiro, por ser o mês com registos de temperaturas mais baixas, e o mês de Novembro, por ter oscilações de temperaturas muito grandes.
- Os dias mais críticos em termos de humidade relativa foram os dias 4 e 5 de Janeiro. Nestes dias, mesmo com a introdução da inércia higroscópica, não foi possível eliminar completamente, durante todo o dia, a ocorrência de condensações.
- A melhoria das características higrotérmicas não foi muito acentuada devido à existência de uma forte ventilação. Grandes renovações horárias de ar contribuem para a regulação dos níveis de humidade, em conjunto com o revestimento higroscópico.
- A incorporação de todos os estudos desenvolvidos até ao momento revelou-se numa melhoria das condições higrotérmicas do edifício.
- A humidade relativa do ar interior pode afectar significativamente o conforto térmico, a percepção da qualidade do ar, a saúde dos utilizadores, a durabilidade dos materiais de construção e o consumo de energia dos edifícios.
- A imposição de um indicador do risco de desenvolvimento de fungos permitiu identificar o modelo optimizado do conjunto de propriedades estudadas até ao momento, para o cenário e condições estudadas: Coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados de  $6 \text{ W/m}^2\text{°C}$ , isolamento térmico XPS de 4 cm de espessura e revestimento higroscópico à superfície das paredes de 1.5 cm de espessura e  $\delta_M = 1.5 \text{ cm}$ .
- Com o modelo optimizado, o limite tido como indicador foi cumprido, numa perspectiva anual e mensal. Nos dias 4 e 5 de Janeiro não se conseguiu cumprir tal limite. Porém, como o risco aumenta quando os picos de humidade relativa alta persistem durante um grande período de tempo, considera-se como aceitável o seu incumprimento para estas datas.

## **6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

No âmbito desta dissertação foi estudado um modelo de cálculo aproximado para estudar o efeito de materiais higroscópicos na humidade interior dos edifícios.

Por ser um modelo com simplificações, seria interessante realizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos e os resultados de um cálculo analítico. Ainda relativamente ao modelo, seria interessante incluir no cálculo a determinação do comprimento da camada de adsorção, já que a sua determinação correcta é fundamental na determinação das variáveis do modelo.

Além do revestimento higroscópico, existem muitos outros no interior dos edifícios que contribuem para a inércia higroscópica. Por isto, seria uma mais-valia introduzida às simulações a sua inclusão nas propriedades.

Por último, sugeria-se a utilização do programa de Optimização, desenvolvido por Ramos et al. (2011) no estudo da inércia higroscópica com o intuito de otimizar a solução a adoptar, com a introdução de todas as propriedades estudadas até ao momento.



## Bibliografia

- Abadie, M. and Mendonça, K. (2009), 'Moisture performance of building materials: From material characterization to building simulation using the Moisture Buffer Value concept'.
- ANSI/ASHRAE-55 (1992), *Thermal environmental conditions for human occupancy*.
- ASHRAE (1997), *ASHRAE Handbook-Fundamentals* (Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.).
- Cunningham, M. J. (1992), 'Effective penetration depth and effective resistance in moisture transfer', *Building and Environment*, 27 (3).
- EnergyPlus (2010a) *Engineering Reference* [online text], US Department of Energy
- (2010b) *Getting Started with EnergyPlus* [online text], US Department of Energy <<http://apps1.eere.energy.gov>>
- Esteves, T. (2011), 'Optimização da Envolvente Exterior para Minimização do Risco de Condensações Superficiais', Dissertação de Mestrado (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto).
- Ferreira, C. (2008), 'Importância da Inércia Higroscópica em Museus', Dissertação de Mestrado (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto).
- Freitas, V., Torres, M., and Guimarães, A. (2008), *Humidade Ascensional* (Porto: Feup Edições).
- Gueifães 'Agrupamento Vertical de Escolas de Geufães', <<http://www.educar.maiadigital.pt/MDE/Internet/PT/Basico/Agrupamentos/Gueifaes/InformacaoGeral/Historia/HistoriaEB23.htm>>, accessed 15 de Maio de 2011.
- Hagentoft, C.-E. (2001), *Introduction to Building Physics* (Lund, Sweden).
- Hens, H. (1991), *Condensation and Energy*, ed. Annex XIV IEA (Modelling: higric aspects).
- INMG/LNEC (1988), 'Dados Climáticos de Referencia para estudos em Edifícios', in Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica/Laboratório Nacional de Engenharia Civil (ed.), (Lisboa, Portugal).
- ISO-7730 (1994), *Moderate thermal environments- Determination of the PMV and PPD indices and specificarion of the conditions for thermal comfort* [Moderate thermal environments- Determination of the PMV and PPD indices and specificarion of the conditions for thermal comfort].
- Kalagasidis, A. S. (2004), *HAM-Tools: An Integrated Simulation Tool for Heat, Air and Moisture Transfer Analyses in Building Physics* (Gothemburg, Sweden: Chalmers University of Technology).
- Koronthalyova, O. and Mihalka, P. (2008), 'Accuracy of simplified indoor humidity simulation'.
- Kosonen, R. and Tan, F. (2004), 'Assessment of productivity loss in air-air conditioned buildings using PMV index', *Energy and Buildings*.
- Melão, D. B. (2009), 'Análise experimental da variação da humidade relativa em compartimentos', Dissertação de Mestrado (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto).
- Mendonça, L. V. (2005), 'Condensações em edificios', *Arquitectura & Vida*, nº 63.
- Ouazia, B. 'Híbrid Ventilation', <<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/ibp/irc/ci/volume-11-n4-3.html>>, accessed 15 de Junho de 2011.

- ParqueEscolar 'Parque escolar', <<http://www.parque-escolar.pt/m-enquadramento-Historico-parque-escolar.php>>, accessed 15 de maio de 2011.
- Raatschen, W., Erhorn, H., and Herbak, Z. (1991), *IEA-Annez XIV: Condensation and Energy*, ed. Sourcebook.
- Ramos, N. (2007), 'A importância da Inércia Higroscópica no Comportamento Higrotérmico', Dissertação de Doutoramento (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto).
- Ramos, N. and Ribeiro, I. (2011), *Programa de Optimização*
- RCCTE (4 de Abril 2006), 'Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios, Decreto-Lei nº 80/2006'.
- RSECE (4 de Abril de 2006), 'Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios - Decreto de Lei nº 79-2006', in *Diário da República 1º série - A* (ed.), 2438.
- Santos, P. (2010), 'Optimização da Resistência Térmica da Envolvente de Edifícios Escolares', Dissertação de Mestrado (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto).
- Sedlbauer, K. (2001), 'Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components', PhD (Fraunhofer Institut for Building Physics).
- Simonson, C., Salonvaara, M., and Ojanen, T. (2001), *Improving Indoor Climate and Comfort with Wooden Structures* (Espoo: VTT Publications).
- Teixeira, A. (2007), 'Caracterização experimental do funcionamento de sistemas de ventilação da base das paredes para tratamento da humidade ascensorial', Dissertação de Mestrado (Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto).
- Teodoro, A. (2003), *Educação e Políticas Educativas no Portugal contemporâneo: Da construção do modelo escolar ao tesouro a descobrir*, ed. Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias (Revista Lusófona da Educação).
- Tuomo, O., Hannu, V., and Ruut, P. (2007), 'Modelling of Mould Growth in building Envelopes', *Annex 41 ST4*, (Porto).
- Woloszyn, M. and Rode, C. (2006), 'Annex 41, Whole Building Heat, Air, Moisture response', (*International Energy Agency*).
- Zolnier, S. (1994), 'Psicometria I - Caderno didático 13', *Universidade Federal de Viçosa*, (Imprensa Universitária).