

# **OTIMIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS HUMIVENT PARA SECAGEM DE PAREDES EM CONTACTO COM O SOLO**

**PEDRO MANUEL LEAL ALVES**

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

---

Orientador: Professora Doutora Ana Sofia Moreira dos Santos Guimarães  
Teixeira

---

Coorientador: Professora Doutora Isabel Cristina da Silva Martins Ribeiro

JUNHO DE 2017

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017**

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 - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo 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 eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha Avó.  
Aos meus Pais e à minha Irmã.  
À Salomé



## **AGRADECIMENTOS**

À Professora Doutora Ana Sofia Guimarães e à Professora Doutora Isabel Martins Ribeiro por toda a preocupação, paciência e disponibilidade, pelos preciosos conselhos e por todos os conhecimentos transmitidos.

Ao Gonçalo Cascarejo e ao João Freitas por todas as “dicas” ao longo destes meses de trabalho.

A todos os meus colegas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, por todo o companheirismo noitadas dentro.

Aos familiares que sempre me apoiaram.

À Salomé pelo apoio, incentivo e confiança nas minhas capacidades, muitas vezes, quando nem eu próprio acreditava.



## **RESUMO**

O Laboratório de Física das Construções – LFC – da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP – desenvolveu uma técnica inovadora de tratamento da humidade ascensional, designada por “sistema de ventilação da base das paredes - HUMIVENT”.

Este sistema consiste em ventilar, através da instalação de canais de circulação de ar, a base das paredes recorrendo a ventilação natural ou mecânica. O sistema HUMIVENT tem como principal vantagem a possibilidade de intervenção sem interferência em questões arquitectónicas do edifício.

Desta forma, esta técnica, tem especial interesse quando aplicada no tratamento da humidade ascensional em edifícios históricos, que constituem Património cujas características arquitectónicas não podem sofrer alteração. Este sistema encontra-se instalado e monotonizado numa Igreja no Norte de Portugal.

Com base nos registos efectuados, ao longo de cerca de quatro anos, procura-se otimizar o desempenho do sistema HUMIVENT, trabalhando sobre quatro novas hipóteses de funcionamento: A,B,C e D.

O sistema implementado é constituído por dois subsistemas, Norte e Sul, cujas admissões de ar estão localizadas no exterior e interior respectivamente.

As novas hipóteses de funcionamento desenvolvidas baseiam-se na possibilidade de qualquer um dos dois subsistemas admitir ar no interior ou no exterior, bem como, parar de ventilar dependendo de determinados critérios de funcionamento adotados.

O cálculo da diferença de pressão à entrada e à saída de cada um dos subsistemas de ventilação será preponderante para concluir em que ambiente será mais vantajoso admitir ar, ou, então, parar de ventilar no caso de se tratar da hipótese de funcionamento C.

**PALAVRAS-CHAVE:** Humidade ascensional; Análise de dados; Sistema de ventilação da base das paredes; Hipótese de funcionamento; Otimização.



## **ABSTRACT**

The “Laboratorio de Física das Construções” - LFC – “Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP” developed an innovative technique of rising damp treatment know as “ventilation system of the base of the walls- HUMIVENT”.

This system consists of ventilating, through the installation of air circulation channels, the base of the walls using natural or mechanical ventilation. The main advantage of the HUMIVENT system is the possibility of intervention without interference in the architectural issues of the building.

In this way, this technique is of special interest when applied in the treatment of rising damp in historical buildings, which are Heritage whose architectural characteristics cannot be changed. This system is installed and monotonized in a Church in the North of Portugal.

On the basis of the records made, over a period of about four years, we seek to optimize the performance of the HUMIVENT system, working on four new working hypotheses: A, B, C and D.

The implemented system is constituted by two subsystems, North and South, whose air admissions are located in the exterior and interior respectively.

The new working hypotheses are based on the possibility that either subsystem can admit air inside or outside, as well as stop ventilation depending on certain operating criteria adopted.

The calculation of the pressure difference at the inlet and outlet of each of the ventilation subsystems will be fundamental to conclude in which environment it will be more advantageous to admit air, or else to stop ventilating in the case of operating hypothesis C.

**KEYWORDS:** Rising Dump; Data Analysis; Wall Base ventilation System; Operating hypothesis; Optimization.



## ÍNDICE GERAL

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	i
<b>RESUMO</b> .....	iii
<b>ABSTRACT</b> .....	v

## **1. INTRODUÇÃO**..... 1

<b>1.1. ENQUADRAMENTO GERAL E OBJETIVO</b> .....	1
--	---

<b>1.2. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO</b> .....	2
---	---

## **2. HUMIDADE ASCENSIONAL EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS**.....3

<b>2.1. TÉCNICAS DE TRATAMENTO DA HUMIDADE ASCENSIONAL</b> .....	3
--	---

<b>2.2. SISTEMA HIGROREGULÁVEL DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES - HUMIVENT</b> .....	8
---	---

2.2.1. INTRODUÇÃO .....	8
-------------------------	---

2.2.2. EVOLUÇÃO DO MÉTODO.....	8
--------------------------------	---

2.2.3. ANÁLISE E VALIDAÇÃO DO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA – CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA.....	14
--	----

2.2.3.1. Constituição do sistema .....	14
--	----

2.2.3.2. Critérios de Funcionamento do Sistema.....	15
---	----

2.2.4. SISTEMAS SIMILARES .....	16
---------------------------------	----

2.2.4.1. Sifão atmosférico.....	16
---------------------------------	----

2.2.4.2. Sistema de ventilação de fundações .....	17
---	----

2.2.4.3. Sistema de ventilação para impermeabilização estrutural.....	18
---	----

2.2.4.4. Drenagem de paredes enterradas .....	18
---	----

2.2.4.5. Tubos de ventilação de rodapé.....	19
---	----

2.2.5. OUTRAS APLICAÇÕES DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES.....	20
--	----

2.2.5.1. Sistema de ventilação da base das paredes em caso de cheias .....	20
--	----

2.2.5.1.1. Propriedades dos parâmetros.....	21
---	----

2.2.5.1.2. Espessura da parede .....	21
--------------------------------------	----

2.2.5.1.3. Geometria, dimensões e número de renovações por hora do sistema de ventilação ..	21
---	----

2.2.5.1.4. Características da frente húmida, das diferentes simulações e da envolvente.....	21
---	----

2.2.5.1.5. Conclusões .....	22
-----------------------------	----

2.2.5.2. Aplicação do sistema de ventilação da base das paredes em armários .....	22
---	----

2.2.5.3. Aplicação do sistema de ventilação da base das paredes em coberturas ventiladas em desvão 23

2.2.5.4. Aplicação do sistema de ventilação da base das paredes em desvãos sanitários ..... 24

### **3. IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO HUMIVENT NUM EDIFÍCIO HISTÓRICO..... 25**

**3.1. HISTÓRIA DO EDIFÍCIO ..... 25**

**3.2. PATOLOGIAS OBSERVADAS..... 27**

**3.3. INTERVENÇÃO EFETUADA..... 29**

**3.4. CONSTITUIÇÃO E FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS..... 31**

**3.5. INFORMAÇÃO RECOLHIDA SOBRE O FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS..... 33**

3.5.1. SUBSISTEMA SUL ..... 33

3.5.2. SUBSISTEMA NORTE..... 37

3.5.3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS SUBSISTEMAS NORTE E SUL..... 40

3.5.4. OTIMIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS..... 41

**3.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO..... 42**

### **4. HUMIDADE ASCENSIONAL EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS..... 43**

**4.1. INTRODUÇÃO..... 43**

**4.2. CARACTERÍSTICAS DOS SUBSISTEMAS..... 44**

**4.3. QUANTIDADE DE ÁGUA RETIRADA PELOS SUBSISTEMAS ..... 45**

**4.4. PRESSÃO DE VAPOR À ENTRADA E À SAÍDA DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO ..... 45**

4.4.1. EXPRESSÃO MATEMÁTICA PARA O CÁLCULO DA PRESSÃO DE VAPOR ..... 45

4.4.2. POSSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE CONDENSAÇÕES ..... 45

**4.5. PERÍODOS DE FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS..... 46**

**4.6. OTIMIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS ..... 47**

4.6.1. HIPÓTESE A ..... 50

4.6.2. HIPÓTESE B ..... 51

4.6.3. HIPÓTESE C..... 51

4.6.4. HIPÓTESE D..... 52

**4.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS ..... 53**

4.7.1. SUBSISTEMA NORTE..... 54

4.7.2. SUBSISTEMA SUL..... 60

<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>69</b>
<b>5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>69</b>
<b>5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Possíveis origens da humidade ascensional .....	3
Fig. 2.2 – Corte hídrico com recurso a barreiras físicas.....	4
Fig. 2.3 – Redução da secção absorvente .....	5
Fig. 2.4 – Introdução de tubos de arejamento.....	5
Fig. 2.5 – Técnicas de electro-osmose .....	6
Fig. 2.6 – Colocação de forra no interior do espaço .....	6
Fig. 2.7 – Colocação de revestimento com camadas de porosidade e porometria controlada .....	7
Fig. 2.8 – Sistema de ventilação da base das paredes.....	7
Fig. 2.9 – Igreja no Norte de Portugal onde se instalou o sistema de ventilação da base das paredes- HUMIVENT .....	8
Fig. 2.10 – Modelo experimental do sistema de ventilação.....	9
Fig. 2.11 – Configurações com e sem sistema de ventilação e respectivas sondas .....	10
Fig. 2.12 – Valores de humidade relativa registados nos sensores 9A e 9B s/ sistema de ventilação ..	10
Fig. 2.13 – Valores de humidade relativa registados nos sensores 9A e 9B c/ sistema de ventilação ..	11
Fig. 2.14 – Configuração 2A – Impermeabilização do sistema superiormente, existindo contacto do sistema de ventilação com a areia.....	11
Fig. 2.15 – Configuração 2B – Impermeabilização do sistema de ventilação no paramento superior ..	12
Fig. 2.16 – Configuração 2C – Impermeabilização do sistema de ventilação a envolver todas as faces do canal de ventilação, com exceção da face que contacta com a parede.....	12
Fig. 2.17 – Modelo físico adotado com a localização das quatro sondas e do <i>data-logger</i> .....	12
Fig. 2.18 – <i>Data-logger</i> , programador, sondas de temperatura e HR, bateria e cabos de ligação ao computador .....	15
Fig. 2.19 – Esquema de funcionamento do sistema higroregulável com módulo de controlo .....	16
Fig. 2.20 – Sifão atmosférico.....	17
Fig. 2.21 – Condução de betão ventilada.....	17
Fig. 2.22 – Sistema de ventilação estrutural .....	18
Fig. 2.23 – Drenagem de parede enterrada .....	19
Fig. 2.24 – Rodapé ventilado.....	20
Fig. 2.25 – Aplicação do sistema de ventilação em caso de cheias.....	20
Fig. 2.26 – Exemplo de esquema de funcionamento de um armário ventilado .....	23
Fig. 2.27 – Esquema de funcionamento de uma cobertura ventilada em desvão não habitável.....	24
Fig. 2.28 – Ventilação de desvão sanitário .....	24
Fig. 3.1 – Igreja e Mosteiro situado na região Norte de Portugal.....	26
Fig. 3.2 – Planta da Igreja .....	27
Fig. 3.3 – Abóbada da nave principal de Igreja.....	27

Fig. 3.4 – Manchas esverdeadas na abóbada revelam presença de humidade .....	28
Fig. 3.5 – Paredes interiores com vestígios de humidade.....	28
Fig. 3.6 – Paredes exteriores marcadas com manchas e musgos, especialmente em toda a altura dos contrafortes .....	28
Fig. 3.7 – Corte construtivo do sistema de ventilação exterior com pormenor da grelha de ventilação	29
Fig. 3.8 – Corte construtivo do sistema de ventilação exterior.....	30
Fig. 3.9 – Planta com localização dos subsistemas de ventilação.....	30
Fig. 3.10 – Corte construtivo do sistema de ventilação interior na base da parede.....	31
Fig. 3.11 – Módulo de controlo e sistema de aquisição de dados.....	31
Fig. 3.12 – Flutuação dos valores de humidade relativa à entrada e à saída do subsistema Sul.....	33
Fig. 3.13 – Flutuação da temperatura à entrada e à saída do subsistema Sul .....	34
Fig. 3.14 – Esquema de localização das sondas no subsistema Sul.....	34
Fig. 3.15 – Flutuação da pressão de vapor e períodos de funcionamento do subsistema Sul .....	35
Fig. 3.16 – Diferencial de pressão de vapor à entrada e à saída do subsistema Sul .....	35
Fig. 3.17 – Quantidade de água acumulada retirada pelo subsistema Sul .....	36
Fig. 3.18 – Esquema de localização das sondas do subsistema Norte .....	37
Fig. 3.19 – Flutuação da humidade relativa à entrada e à saída do subsistema Norte .....	37
Fig. 3.20 – Flutuação da temperatura à entrada e à saída do subsistema Norte .....	38
Fig. 3.21 – Flutuação da pressão de vapor e períodos de funcionamento à entrada e à saída do subsistema Norte, ao longo do período em análise .....	38
Fig. 3.22 – Diferencial da pressão de vapor à entrada e à saída do subsistema Norte.....	39
Fig. 3.23 – Quantidade de água retirada do subsistema Norte.....	39
Fig. 3.24 – Quantidade de água retirada pelos subsistemas Norte e Sul e períodos de funcionamento mais favoráveis.....	40
Fig. 4.1 – <i>Data-logger</i> para registo de dados .....	43
Fig. 4.2 – Exemplo de períodos de tempo onde ocorrem condensações .....	46
Fig. 4.3 – Valores de diferença de pressão $\Delta P$ para o subsistema Sul .....	46
Fig. 4.4 – Valores de diferença de pressão $\Delta P$ para o subsistema Norte.....	47
Fig. 4.5 – Canal de ventilação de secção rectangular.....	48
Fig. 4.6 – Manilha perfurada.....	49
Fig. 4.7 – Exemplo de um subsistema de ventilação com possibilidade de admissão de ar do interior ou do exterior visto em planta... ..	50
Fig. 4.8 – Esquema de funcionamento dos subsistemas para a hipótese A.....	50

Fig. 4.9 – Esquema de funcionamento dos subsistemas para a hipótese B.....	51
Fig. 4.10 – Esquema de funcionamento dos subsistemas para a hipótese C .....	52
Fig. 4.11 – Esquema de funcionamento dos subsistemas para a hipótese D.....	52
Fig. 4.12 – Exemplo de possível corte longitudinal de uma secção do subsistema de ventilação com representação dos fluxos de vapor e água .....	53
Fig. 4.13 – Variação da temperatura à entrada e quantidade de água acumulada no subsistema de ventilação Norte .....	54
Fig. 4.14 – Variação da humidade relativa à entrada e quantidade de água acumulada no subsistema de ventilação Norte .....	55
Fig. 4.15 – Períodos de funcionamento para o subsistema Norte .....	56
Fig. 4.16 – Distribuição temporal de funcionamento para a hipótese A no subsistema Norte.....	56
Fig. 4.17 – Distribuição temporal de funcionamento para a hipótese B no subsistema Norte.....	57
Fig. 4.18 – Períodos de funcionamento do subsistema de ventilação para a hipótese C .....	57
Fig. 4.19 – Percentagem de funcionamento do subsistema de ventilação Norte para a hipótese C ....	58
Fig. 4.20 – Percentagem de funcionamento do subsistema Norte para a hipótese D.....	58
Fig. 4.21 – Quantidade de água acumulada no subsistema Norte .....	59
Fig. 4.22 – Número de horas em que ocorreram condensações para as diferentes hipóteses de funcionamento do subsistema de ventilação Norte .....	60
Fig. 4.23 – Variação da temperatura à entrada e quantidade acumulada no subsistema Sul.....	61
Fig. 4.24 – Variação da humidade relativa à entrada e quantidade de água acumulada no subsistema de ventilação Sul.....	62
Fig. 4.25 – Períodos de funcionamento para o subsistema original .....	62
Fig. 4.26 – Distribuição temporal de funcionamento para a hipótese A no subsistema Sul .....	63
Fig. 4.27 – Distribuição temporal de funcionamento para a hipótese B no subsistema Sul .....	64
Fig. 4.28 – Períodos de funcionamento do subsistema de ventilação para a hipótese C .....	64
Fig. 4.29 – Percentagem de funcionamento do subsistema Norte para a hipótese C.....	65
Fig. 4.30 – Percentagem de funcionamento do subsistema Norte para a hipótese D.....	65
Fig. 4.31 – Quantidade de água acumulada no subsistema Sul.....	66
Fig. 4.32 – Número de horas em que ocorreram condensações nas diferentes hipóteses de funcionamento do subsistema de ventilação Sul .....	67
Fig. 5.1 – Evolução da quantidade de vapor de água acumulado nas hipóteses em estudo relativamente ao sistema instalado originalmente.....	69
Fig. 5.2 – Número de horas em que o subsistema de ventilação se encontra desligado .....	71



## **ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 4.1 – Principais características dos subsistemas Norte e Sul.....	44
Quadro 5.1 – Quantidade de vapor de água acumulada nas diferentes hipóteses testadas e sua evolução comparativamente com o funcionamento original .....	70



## **SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS**

DEC - Departamento de Engenharia Civil  
Dm – coeficiente de difusão molecular [ $m^2/s$ ]  
FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto  
hmáx – altura atingida pela frente húmida [m]  
HR – humidade relativa [%]  
HRmáx - humidade relativa máxima [%]  
HRméd - humidade relativa média [%]  
HRmin - humidade relativa mínima [%]  
hs – altura do canal de ventilação [m]  
L – comprimento do sistema [m]  
LFC – Laboratório de Física das Construções  
OFF - desligado  
P – pressão de vapor [Pa]  
Pvmáx - pressão de vapor máxima [Pa]  
Pvméd - pressão de vapor média [Pa]  
PVmin – pressão de vapor mínima [Pa]  
Pe – pressão de vapor de água à entrada do sistema [Pa]  
Ps – pressão de vapor de água à saída do sistema [Pa]  
 $p_{sat}(T_a)$  – pressão de saturação para  $T_a$  [kPa]  
Q – caudal de ventilação [ $m^3/s$ ]  
 $r_a$  – resistência aerodinâmica [m/s]  
Rph – número de renovações horárias  
 $r_s$  – resistência superficial [m/s]  
 $\Theta$  – temperatura [ $^{\circ}C$ ]  
Tmáx - temperatura máxima [ $^{\circ}C$ ]  
Tméd – temperatura média [ $^{\circ}C$ ]  
Tmin – temperatura mínima [ $^{\circ}C$ ]  
To – temperatura à entrada do sistema [ $^{\circ}C$ ]  
Ts – temperatura à saída do sistema [ $^{\circ}C$ ]  
U – velocidade de circulação do ar [m/s]  
w – humidade absoluta do ar [ $kg/m^3$ ]  
W – quantidade de água retirada pelo sistema [kg]  
Wacum - quantidade de água acumulada retirada pelo sistema [kg]  
HREntrada – humidade absoluta do ar à entrada do sistema [ $kg/m^3$ ]  
HRsaída – Humidade absoluta do ar à saída do sistema [ $kg/m^3$ ]  
 $\theta$  – Temperatura do ar [k]  
 $\Delta Pa$  – Variação da pressão de vapor [Pa]  
 $\Delta t$  – Intervalo de tempo [s]







# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO GERAL E OBJETIVO

Face ao frequente aparecimento de patologias em edifícios histórico, relacionadas com a presença de água nos elementos construtivos, tem-se procurado nos últimos anos desenvolver novas técnicas de tratamento.

Várias são as soluções possíveis para o tratamento da humidade ascensional (corte hídrico, colocação de drenos, redução da seção absorvente, introdução de tubos de arejamento, técnicas electro-osmóticas, entre outras), mas no caso de se estar a atuar em edifícios antigos, cujas características de construção e as exigências arquitetónicas dificultam a aplicação destas técnicas, pensou-se em desenvolver uma nova técnica de tratamento da humidade proveniente do solo.

Face a estas necessidades, o Laboratório de Física das Construções – LFC – da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, desenvolveu uma técnica inovadora que se designa por “sistema higroregulável de ventilação da base das paredes – HUMIVENT”. Tal como o próprio nome indica, esta técnica consiste em ventilar a base das paredes através de um canal de ventilação associado a um dispositivo mecânico de ventilação higroregulável. Este dispositivo só é acionado caso se verifiquem as condições favoráveis para a secagem das paredes, ou seja, caso não estejam reunidas determinadas condições de funcionamento, que irão ser explicadas ao longo da presente dissertação, o dispositivo mecânico de ventilação encontra-se inactivo [3].

Nos últimos anos têm-se realizado diversos trabalhos e estudos no sentido de validar esta pioneira técnica de tratamento da humidade ascensional [1], [2], [3]. Começou-se por monitorizar a temperatura e a humidade relativa para dois sistemas distintos, um sem canal de ventilação, outro com canal de ventilação, e concluiu-se que a segunda hipótese poderia vir a constituir uma eficaz técnica de tratamento [1].

Após este primeiro ensaio, realizaram-se novos trabalhos bem como uma análise “in situ” com o intuito de avaliar a influência da geometria da parede, das condições climatéricas da envolvente, bem como a alteração do caudal de ventilação [2].

O presente trabalho foca-se na optimização do sistema de ventilação da base das paredes – HUMIVENT. A partir dos valores de temperatura e humidade relativa obtidos, através de sondas já instaladas à entrada e à saída de dois canais de ventilação existentes numa Igreja no Norte de Portugal, o objetivo passa por criar critérios inovadores de funcionamento que permitirão, espera-se, obter melhores resultados do ponto de vista do control da frente húmida que se manifesta em alguns elementos construtivos do edifício em questão.

## **1.2. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação estrutura-se em cinco capítulos, sendo que no presente apresenta-se o enquadramento do trabalho a realizar bem como os objetivos gerais.

No Capítulo 2 começa-se por apresentar o problema a tratar, as técnicas mais usuais, bem como a técnica implementada numa Igreja no Norte de Portugal. É também dissecado o funcionamento do “sistema de ventilação da base das paredes – HUMIVENT”. Mostram-se ainda, possíveis aplicações deste sistema de ventilação.

No Capítulo 3 é dada uma perspetiva histórica da Igreja, e mostram-se as patologias por ela apresentadas. Neste capítulo mostram-se os resultados obtidos com a aplicação do sistema higroregulável de ventilação da base das paredes no edifício, e explica-se os critérios de funcionamento do sistema implementado.

O Capítulo 4, de teor mais prático, procura-se apresentar novas hipóteses de funcionamento do sistema higroregulável, bem como apresentar os resultados obtidos com as novas hipóteses de otimização.

Por fim, no capítulo 5, de conclusão, dá-se uma perspetiva comparativa dos resultados das novas soluções testadas assim como possíveis soluções de otimização a desenvolver neste âmbito.

# 2

## HUMIDADE ASCENSIONAL EM EDIFÍCIOS HISTÓRICOS

### 2.1. TÉCNICAS DE TRATAMENTO DA HUMIDADE ASCENSIONAL

A humidade ascensional constitui uma das principais causas de degradação do património histórico em Portugal. Nos últimos anos, com a crescente preocupação com a reabilitação e tratamento de patologias presentes neste tipo de edifícios, torna-se necessário responder às exigências de reabilitação destas obras, procurando intervir de forma eficaz e objectiva [2].

A humidade ascensional surge nos pisos térreos dos edifícios e tem origem em águas freáticas ou superficiais. Quando se está perante humidade proveniente de águas freáticas, as manifestações encontram-se relativamente constantes ao longo do ano, uma vez que, a sua fonte está ativa constantemente. Já no caso da origem ser as águas superficiais, a sua presença é variável, pois depende, naturalmente, da pluviosidade do local. Este fenómeno é agravado pelo deficiente escoamento das águas superficiais que muitas vezes se acumulam junto às paredes do edifício, facilitando assim o processo de migração da humidade através do elemento construtivo [4].

Explicada pela elevada porosidade dos materiais de construção, a água que se encontra no solo migra por capilaridade através dos elementos construtivos manifestando-se nas paredes do edifício, constituindo assim uma frente húmida, cuja redução constituirá o maior objectivo da intervenção. A ausência de qualquer técnica que contrarie este problema em conjunto com a elevada porosidade dos materiais que constituem os edifícios históricos faz com que seja frequente observar em igrejas e outros edifícios antigos patologias localizadas na base das paredes tanto interiores como exteriores. Devido às condições menos favoráveis no interior dos edifícios (menor ventilação e humidade relativa mais elevada), a frente húmida apresenta-se mais elevada nas paredes/pilares interiores [2].

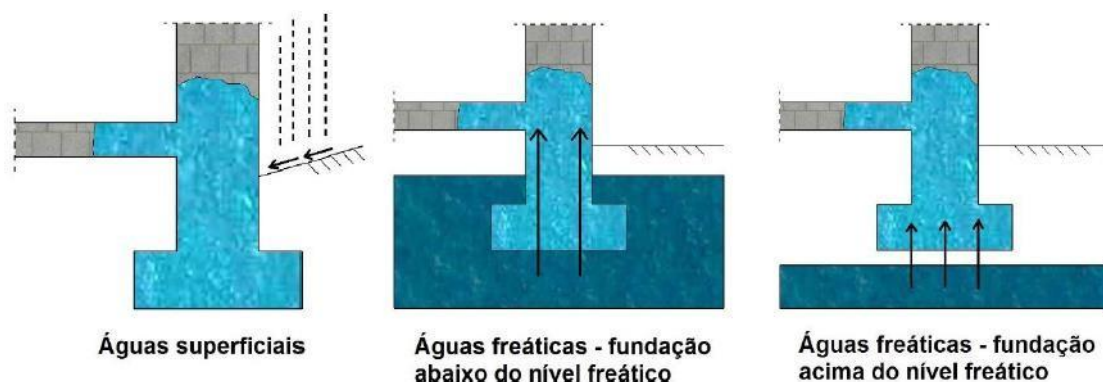


Fig. 2.1 – Possíveis origens da humidade ascensional [4]

Atualmente, as técnicas construtivas já permitem evitar este fenómeno de aparecimento de humidade ascensional. Ao contrário das construções antigas os edifícios mais recentes já dispõem de tecnologias que evitam a progressão da humidade proveniente do solo, através, nomeadamente, da existência de um corte hídrico.

Nos casos onde este fenómeno não foi tomado em consideração, é necessário intervir, existindo diversas possibilidades. Não se poderá definir qual a mais ou menos eficaz, pois cada caso requer um estudo completo de forma a ser possível combater a patologia, aplicando a solução que melhor se adapta ao caso em questão.

Apresentam-se, assim, as metodologias de tratamento de cuidado ascensional mais utilizadas:

- Execução de corte hídrico: utiliza-se esta solução quando estamos a tratar humidade ascensional proveniente de águas freáticas. Constitui uma barreira contínua, poderá ser física ou química, que dificulte a ascensão da água por capilaridade através de barreiras de elevada estanqueidade ou introdução de produtos hidrófugos. Constitui uma técnica bastante eficaz, embora possa criar alguma instabilidade na estrutura devido a causar vibrações (figura 2.2);



Fig. 2.2 – Corte hídrico com recurso a barreiras físicas [5]

- Redução da seção absorvente: esta técnica baseia-se na substituição de parte da alvenaria existente por espaços de ar, dificultando assim a progressão da frente húmida. A base desta solução prende-se com o facto da quantidade de água absorvida da nova seção reduzida da alvenaria, ser, também, compensada pela evaporação que se produz nos espaços de ar criados. Esta técnica tem como grande desvantagem a necessidade de intervir na arquitetura do edifício (figura 2.3);

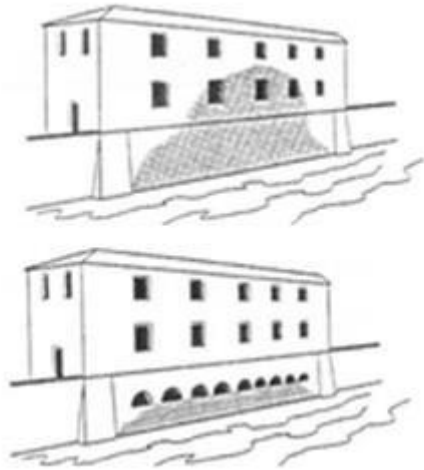


Fig. 2.3 – Redução da secção absorvente [6],[7]

- Introdução de tubos de arejamento: consiste na colocação de tubos inclinados na base da parede. Esta tecnologia baseia-se no princípio do ar húmido ser mais pesado que o ar quente, originando um processo de condução do ar húmido da parede para o exterior. Além da reduzida eficácia, as razões estéticas impedem a sua aplicação em edifícios históricos [4], [7]. O aspeto final da fachada após a aplicação da técnica pode ser observado na figura 2.4;



Fig. 2.4 – Introdução de tubos de arejamento [5]

- Electro-osmose: estas técnicas têm como objectivo criar um potencial eléctrico contrário ao potencial capilar. Consiste na introdução na parede de um conjunto de sondas condutoras que funcionam como ânodo ligadas a uma tomada de terra que atua como cátodo. Podem utilizar-se técnicas ativas, passivas, semi-passivas e forese. Esta técnica é inadequada quando estamos na presença de solo bastante resistente [4], [7]. Na figura 2.5 pode observar-se um esquema de explicação do funcionamento da técnica.

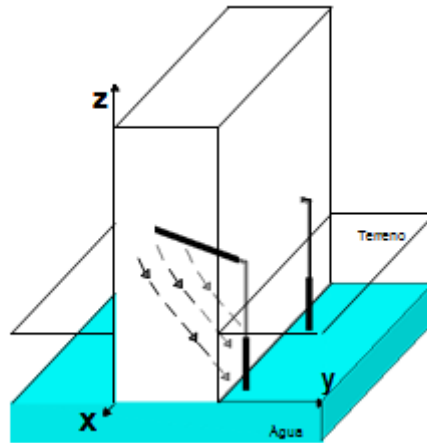


Fig. 2.5 – Técnicas de electro-osmose [3]

- Ocultação da anomalia: esta é uma técnica onde, ao contrário das outras, não se atua na origem do problema, procura-se “esconder” a anomalia seja através da execução de revestimentos com diferentes camadas que diminuem de porosidade quanto mais próximas do exterior (figura 2.7), ou através da execução de uma forra deixando, para maior eficácia da solução, um espaço de ar entre a forra e a parede (figura 2.6). Algumas limitações destas técnicas são a redução do espaço útil, a necessidade, para obtenção de melhores resultados, de ventilar o espaço de ar, bem como o aparecimento de efluorescências;

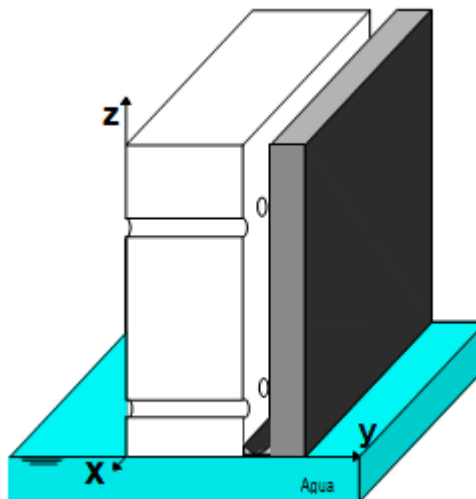


Fig. 2.6 – Colocação de forra no interior do espaço [3]

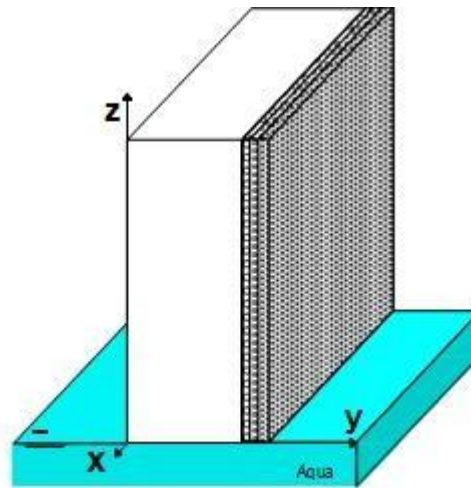


Fig. 2.7 – Colocação de revestimento com camadas de porosidade e porometria controlada [3], [8]

- Ventilação da base das paredes: consiste na colocação de um canal ventilado natural ou mecanicamente, procurando aumentar a evaporação (figura 2.8). Deve ser usada quando a cota do canal que se pretende colocar seja superior à cota do nível freático. Esta técnica é bastante eficaz embora possa em alguns casos originar instabilidade estrutural. Uma desvantagem prende-se com o facto de só ser executável acima no nível freático;

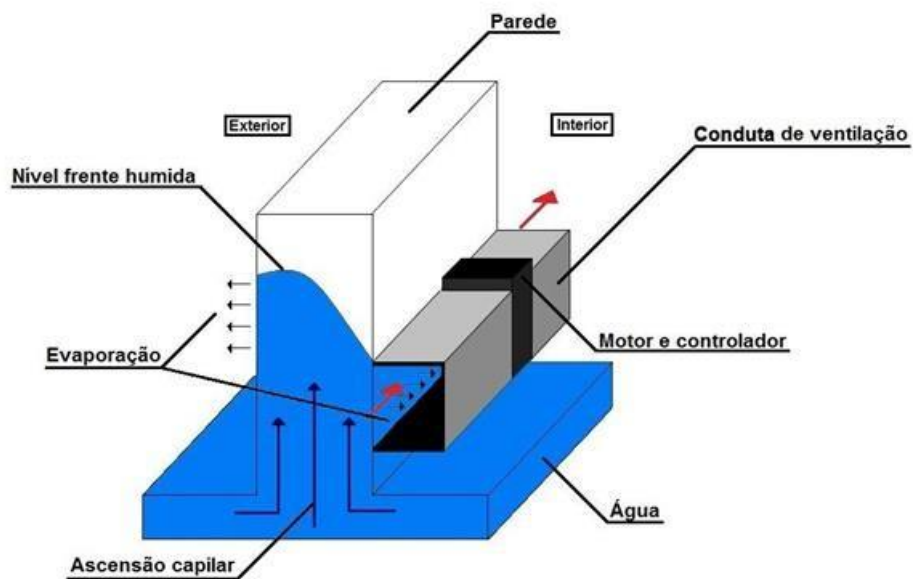


Fig. 2.8 – Sistema de ventilação da base das paredes [3]

## **2.2 SISTEMA HIGROREGULÁVEL DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES – HUMIVENT**

### **2.2.1. INTRODUÇÃO**

A generalidade dos sistemas de tratamento de humidade ascensional tem revelado algumas limitações quando a patologia se manifesta em edifícios de património monumental. Nestes edifícios é necessário intervir tendo em conta a impossibilidade de alterar a sua estética bem como muitas das características inerentes à construção o que dificulta ainda mais a intervenção.

No âmbito do tratamento destas patologias em edifícios que constituem património monumental, o Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto tem vindo a desenvolver nas últimas duas décadas diversas investigações com o objectivo de comprovar a eficácia de um sistema higroregulável de tratamento de humidade ascensional designado HUMIVENT. Em diversos casos a sua eficácia está já comprovada, tendo sido implementada numa igreja no Norte de Portugal e, actualmente, em mais de dez edifícios históricos. A figura 2.9 representa uma perspetiva da fachada principal da Igreja.

O método supracitado baseia-se no princípio da evaporação da água contida nas paredes, recorrendo à colocação de um canal da base da parede onde se pretende tratar a humidade ascensional.

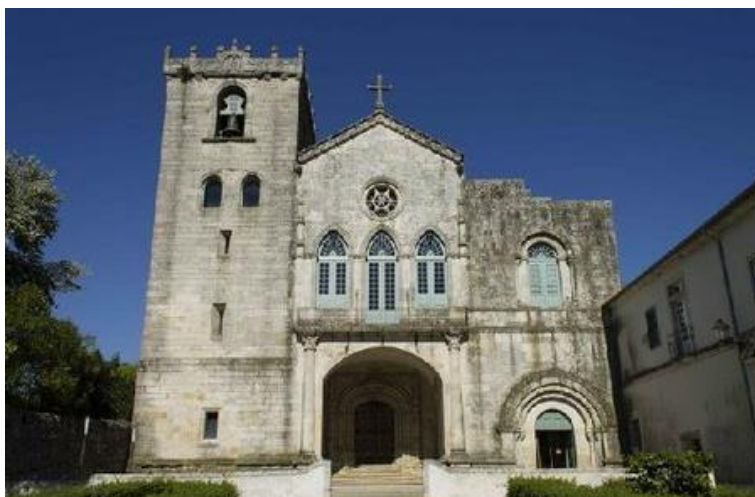


Fig. 2.9 – Igreja no Norte de Portugal onde se instalou o sistema de ventilação da base das paredes – HUMIVENT [9]

### **2.2.2. EVOLUÇÃO DO MÉTODO**

No início do ano 2000, começaram a ser desenvolvidos estudos laboratoriais e numéricos com o intuito de validar uma ideia, que começou por se basear em ventilação natural, mas que rapidamente passou a ser idealizada como um processo mecânico [4]. Esta ideia foi desenvolvida a partir da necessidade de resolver inúmeros problemas de humidade ascensional, que, até então, se vinham manifestando, sobretudo, em edifícios históricos, muito deles pertencentes ao Património Histórico Nacional. Os primeiros ensaios basearam-se na análise do comportamento da humidade ascensional numa parede com e sem o sistema de ventilação. O sistema foi então aplicado em alguns edifícios em Portugal quer com ventilação natural quer mecânica.

Em 2004, e após alguns anos de estudos onde foi possível comprovar a eficácia do sistema mecânico de ventilação, desenvolveu-se a validação experimental e numérica.

Neste trabalho estudou-se o comportamento de uma parede ventilada dos dois lados. De forma a garantir condições de humidade relativa e temperatura no interior do canal idênticas às proporcionadas em laboratório, o sistema de ventilação mecânica funcionou em permanência. Esta análise experimental permitiu validar a capacidade do sistema para a redução da altura da frente húmida [1]. Na figura 2.10 pode ver-se o modelo experimental usado.

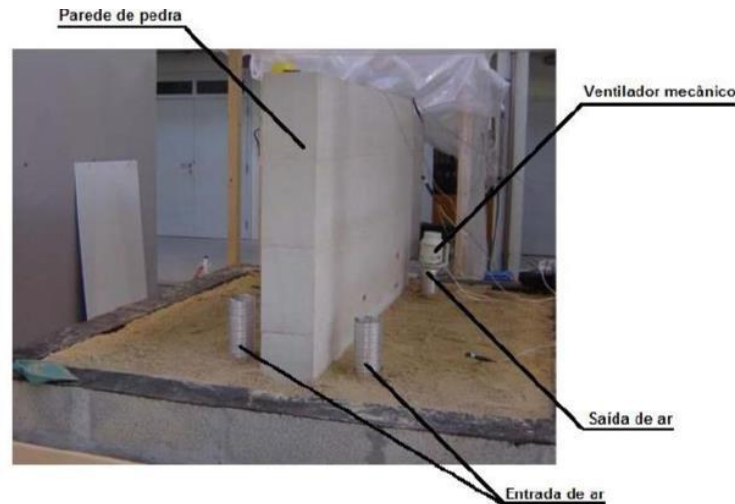


Fig. 2.10 – Modelo experimental do sistema de ventilação [1]

Os resultados numéricos foram obtidos através da simulação com recurso ao programa WUFI-2D desenvolvido no “Fraunhofer Institut für Bauphysik” em Holzkirchen, Alemanha e permitiram chegar a registos aproximados aos obtidos experimentalmente [10].

Apesar dos dados obtidos serem análogos aos dados experimentais, verificou-se um ligeiro atraso no aparecimento da frente húmida, indicando que tal se deveria a problemas nas interfaces das camadas [1], [11].

Foram colocadas sondas no interior das paredes para registo da temperatura e humidade relativa a diferentes alturas e profundidades nas paredes.

Para obtenção dos registos de forma continua todas as sondas foram conectadas a um sistema cuja função é receber e guardar os dados registados. Uma das sondas instaladas ficou encarregue de determinar as condições da ambiência (temperatura e humidade relativa), todas as outras ficaram localizadas no interior das paredes. Na figura 2.11 pode-se observar as configurações com e sem sistema de ventilação e a localização das sondas.

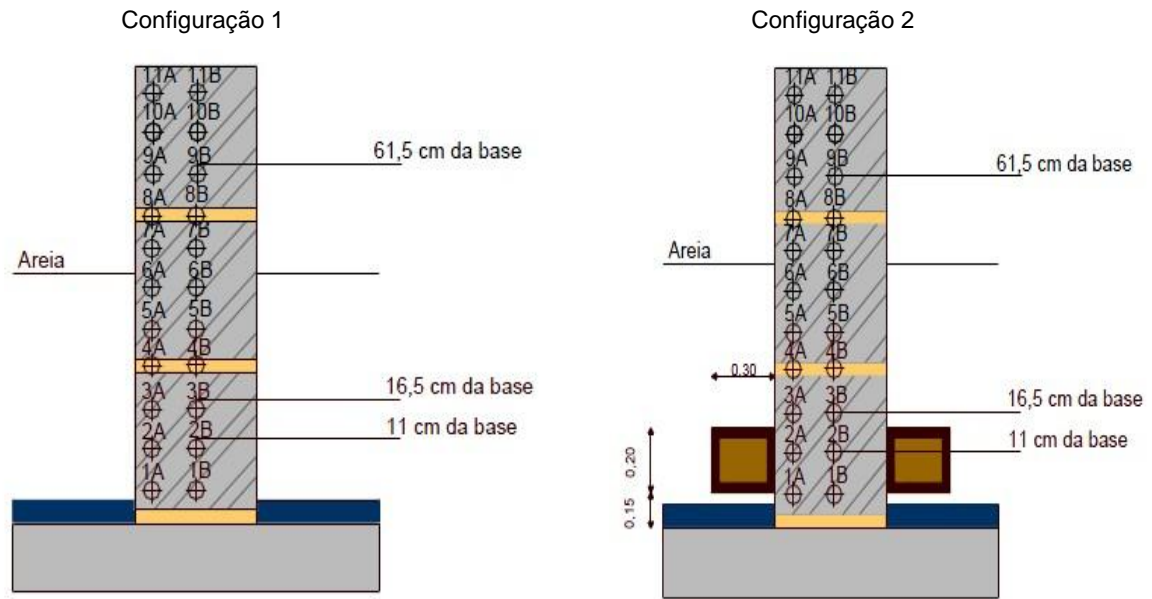


Fig. 2.11 – Configurações com e sem sistema de ventilação e respectivas sondas [1]

Os valores de humidade relativa estão representados para as duas configurações em dois gráficos (Fig. 2.12 e 2.13).

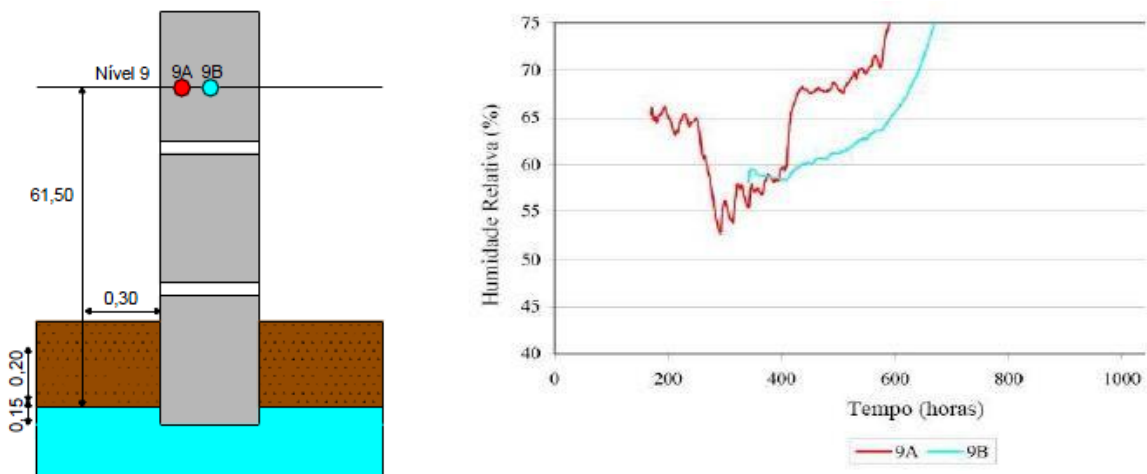


Fig. 2.12 – Valores de humidade relativa registados nos sensores 9A e 9B sem sistema de ventilação [3]

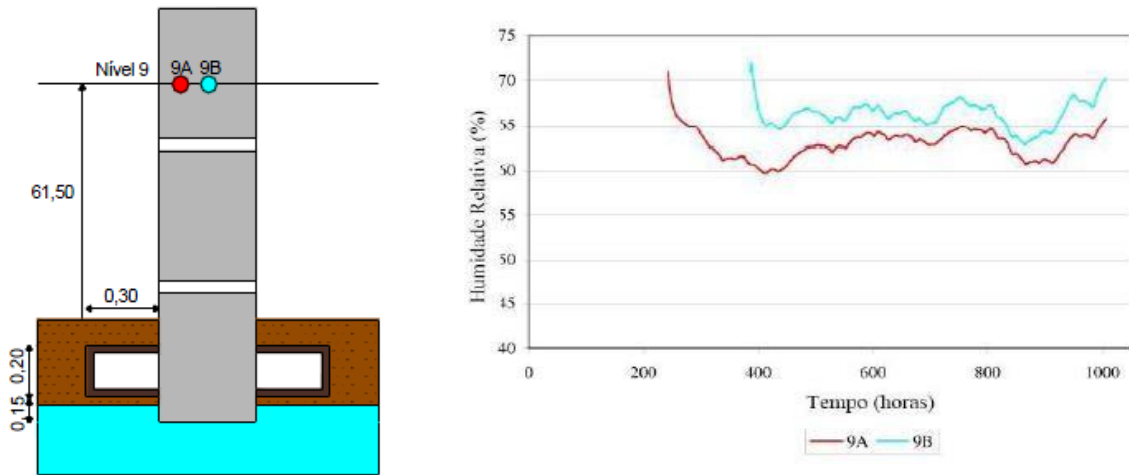


Fig. 2.13 – Valores de humidade relativa registados nos sensores 9A e 9B com sistema de ventilação [1]

Deste estudo experimental desenvolvido, pode concluir-se, que a ascensão capilar progrediu a uma menor velocidade na configuração ventilada e a frente húmida estabilizou mais cedo [12].

Ou seja, de forma muito sucinta podemos concluir que nesta primeira análise experimental a ventilação da base das paredes pode trazer resultados interessantes no controlo da humidade ascensional no controlo da frente humidade da parede [12].

Mais tarde, na sequência de novos estudos e ensaios, o sistema foi dinamizado e foram realizados estudos de sensibilidade onde o objectivo consistiu numa caracterização do sistema no que confere à sua geometria, caudal de ventilação e influência do clima exterior [2].

Nestes termos, um dos objetivos desenvolvidos neste estudo foi o de procurar analisar qual a influência das diferentes geometrias/configurações do sistema no comportamento da parede [2]. Assim desenvolveram-se três configurações de características distintas que estão representadas nas figuras 2.14, 2.15 e 2.16.

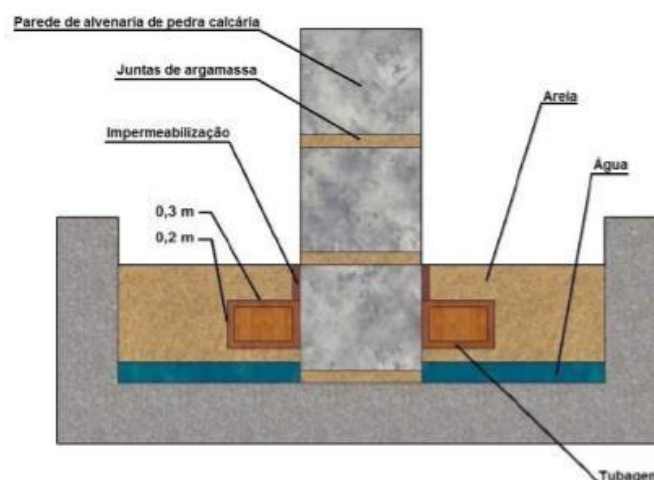


Fig. 2.14 – Configuração 2A – Impermeabilização do sistema superiormente, existindo contacto do sistema de ventilação com a areia [13]

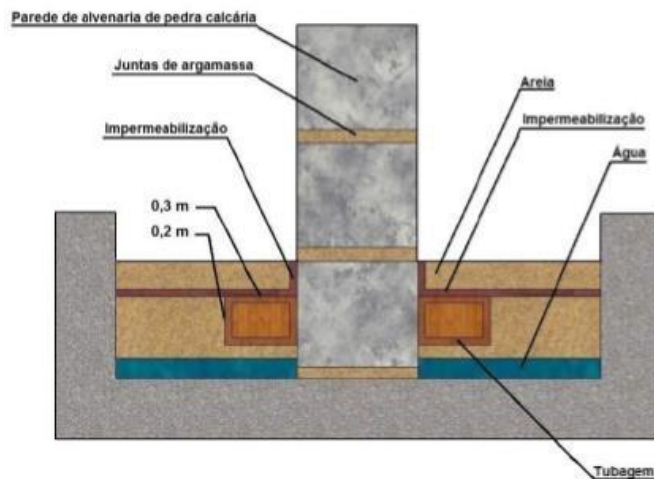


Fig. 2.15 – Configuração 2B – Impermeabilização do sistema de ventilação no paramento superior [13]

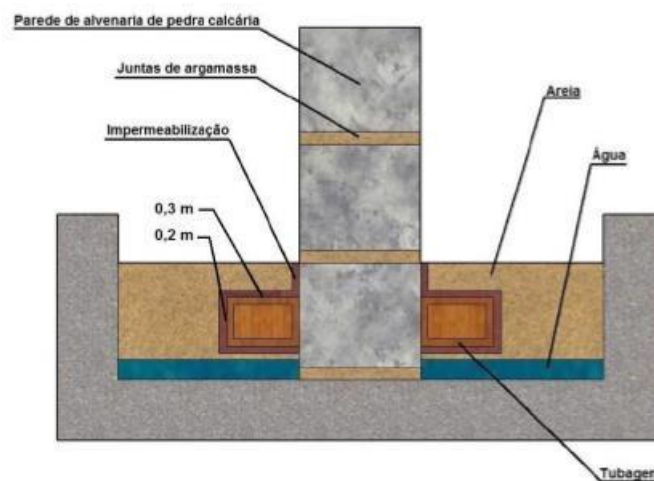


Fig. 2.16 – Configuração 2C – Impermeabilização do sistema de ventilação a envolver todas as faces do canal de ventilação com exceção da face que contacta com a parede [13]

Para o registo dos valores da temperatura e humidade relativa foram colocadas quatro sondas em posições distintas e com objectivos distintos (Fig. 2.17):

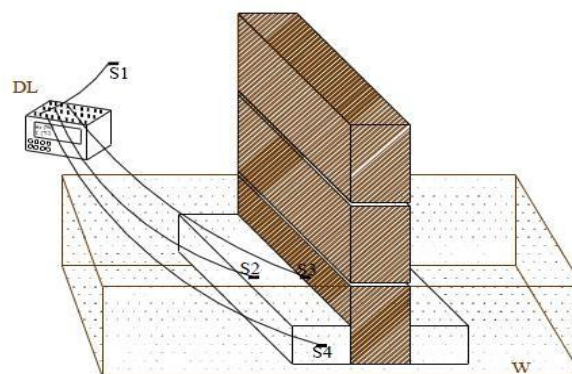


Fig. 2.17 – Modelo físico adotado com a localização das quatro sondas e do data-logger [3]

- Sonda 1 – Entrada: Medição das condições ambientais (humidade relativa e temperatura);
- Sonda 2 – Meio: Registo da temperatura e humidade relativa do ar interior do sistema, a meio do comprimento;
- Sonda 3 – Parede: Registo da temperatura e humidade relativa na parede do canal, a meio do comprimento;
- Sonda 4 – Saída: Registo da temperatura e humidade relativa do ar à saída do sistema.

A partir dos valores de humidade relativa e temperatura é possível determinar a pressão de vapor à entrada e à saída do sistema, bem como a quantidade de vapor de água retirada do sistema recorrendo às expressões:

$$P = \frac{611 \times e^{\frac{17.08 \times \theta}{234,18 + \theta}} \times HR}{100} \quad (2.1)$$

onde:

- P – pressão de vapor (Pa);
- $\theta$  – temperatura do ar (°C);
- HR – humidade relativa (%).

$$W = 0,002167 \times \frac{P}{\theta} \quad (2.2)$$

onde:

- W – humidade absoluta do ar (kg/m<sup>3</sup>);
- P – pressão de vapor (Pa);
- $\theta$  – temperatura do ar (°C).

$$W = (W_{saída} - W_{entrada}) \times Q \times \Delta t \quad (2.3)$$

onde:

- W – quantidade de água retirada do sistema (kg);
- $W_{saída}$  – humidade absoluta do ar à saída do sistema (kg/m<sup>3</sup>);
- $W_{entrada}$  – humidade absoluta do ar à entrada do sistema (kg/m<sup>3</sup>);
- Q – caudal de ventilação (m<sup>3</sup>/s);
- $\Delta t$  – intervalo de tempo (s).

Na sequência da informação obtida através dos registos no *data-logger*, refere-se o seguinte [1], [2], [16]:

- O sistema 2A funciona em permanência quando ocorrem humidades relativas baixas (períodos mais quentes), estando continuamente a retirar humidade [3];
- Em situações de humidades relativas mais altas (períodos mais frios) o sistema 2A apresenta condensações [3];
- O sistema 2B é, globalmente, mais eficaz que o sistema 2A [3];
- Para humidades relativas baixas e temperaturas elevadas (meses de Verão) o sistema 2B transporta um fluxo maior, sendo, por isso, mais eficaz [3];
- A ocorrência de condensações dá-se nas configurações 2A e 2B sendo que as mesmas são superiores na primeira, pelo contrário, em 2C não há registo de condensações [3];
- Na configuração 2C não se registam vantagens em aumentar o caudal ventilado [3];
- A configuração 2C apresenta diferenças de fluxo entre a saída e a entrada, sempre positivos e praticamente constantes ao longo do período em estudo apesar de inferiores ao registado na configuração 2B, que é a que apresenta os maiores fluxos [3].

Através do estudo dos dados obtidos nas diferentes configurações, conclui-se que a utilização de um sistema higrorregulável é fundamental para o controlo de condensações no sistema de ventilação. Este sistema permitiria controlar a pressão de vapor à entrada e saída do sistema, interrompendo o seu funcionamento sempre que a pressão à saída fosse inferior à pressão registada à entrada. Outra das capacidades deste sistema é o controlo da humidade relativa no interior do canal, permitindo evitar a ocorrência de cristalização/dissolução de sais [2], [14], [15].

Quanto às configurações, considera-se que a 2C é a que tem maior interesse do ponto de vista do seu funcionamento, pois permite conjugar fluxos constantes com especial vantagem em termos de poupança de energia e conforto, bem como é o único sistema onde não se verificam condensações [3].

Assim, no Laboratório de Física das Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (LFC/FEUP) nasceu uma tecnologia totalmente inovadora para o tratamento da humidade ascensional que foi patenteada com a designação “sistema higrorregulável de ventilação da base das paredes para tratamento de humidade ascensional – HUMIVENT”. □

## 2.2.3. ANÁLISE E VALIDAÇÃO DO PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA – CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA

### 2.2.3.1. Constituição do sistema

O sistema de ventilação da base das paredes – HUMIVENT tem como principal objectivo criar condições de secagem e evaporação favoráveis na base das paredes através da criação de canais que permitem a passagem de ar. Inicialmente o ar circulava através de ventilação natural, mas com o passar do tempo concluiu-se que a eficácia do sistema seria maior se se aplicasse um sistema de ventilação mecânico higrorregulável. Com este sistema é possível reduzir a altura atingida pela frente húmida significativamente [3].

O ventilador entra em funcionamento quando a pressão de vapor à entrada é menor que a pressão de vapor à saída, condição necessária para ocorrer transferência de humidade da parede para o ar que

circula na conduta [16], [17]. Os parâmetros necessários para calcular a pressão de vapor são a humidade relativa e a temperatura, valores que se obtêm através de duas sondas estrategicamente localizadas à entrada e à saída do sistema [2], [18], [19].

O sistema só pode ser implementado quando a base da parede onde se instalará estiver a cota superior à cota do nível freático e o seu comprimento pode variar, sem nunca ser demasiado extenso, sobre pena de perder eficácia.

A geometria e dimensão podem variar, já a sua constituição é fixa. Constitui o sistema HUMIVENT um módulo de controlo, uma sonda de temperatura e humidade relativa à entrada e outra à saída e uma bateria (Figura 2.18).



Fig. 2.18 – *Data-logger*, programador, sondas de temperatura e HR, bateria e cabos de ligação ao computador [3]

### 2.2.3.2. Critérios de Funcionamento do Sistema

Para fazer face às condensações assim como às cristalizações e/ou dissoluções verificadas no interior do sistema de ventilação foi necessário adoptar o sistema de novos critérios de funcionamento. Assim dotou-se o sistema higroregulável de um módulo de controlo que acciona ou desliga o ventilador tendo por base dois critérios: humidade relativa mínima à entrada e diferença de pressão de vapor de água entre a entrada e a saída. O critério da diferença de pressão  $\Delta P$  é para evitar a ocorrência de condensações, enquanto o critério da humidade relativa mínima, que se determinou ser de 35%, estabeleceu-se para combater as cristalizações e/ou dissoluções de sais.

O funcionamento do sistema higroregulável encontra-se sintetizado na figura 2.19, onde se pode ver os critérios para o funcionamento do ventilador, diferenças de pressão entre a saída e a entrada e um valor mínimo ou máximo de humidade relativa pré-estabelecido. É possível também observar o posicionamento das sondas que registam a temperatura e humidade relativa à entrada e à saída.

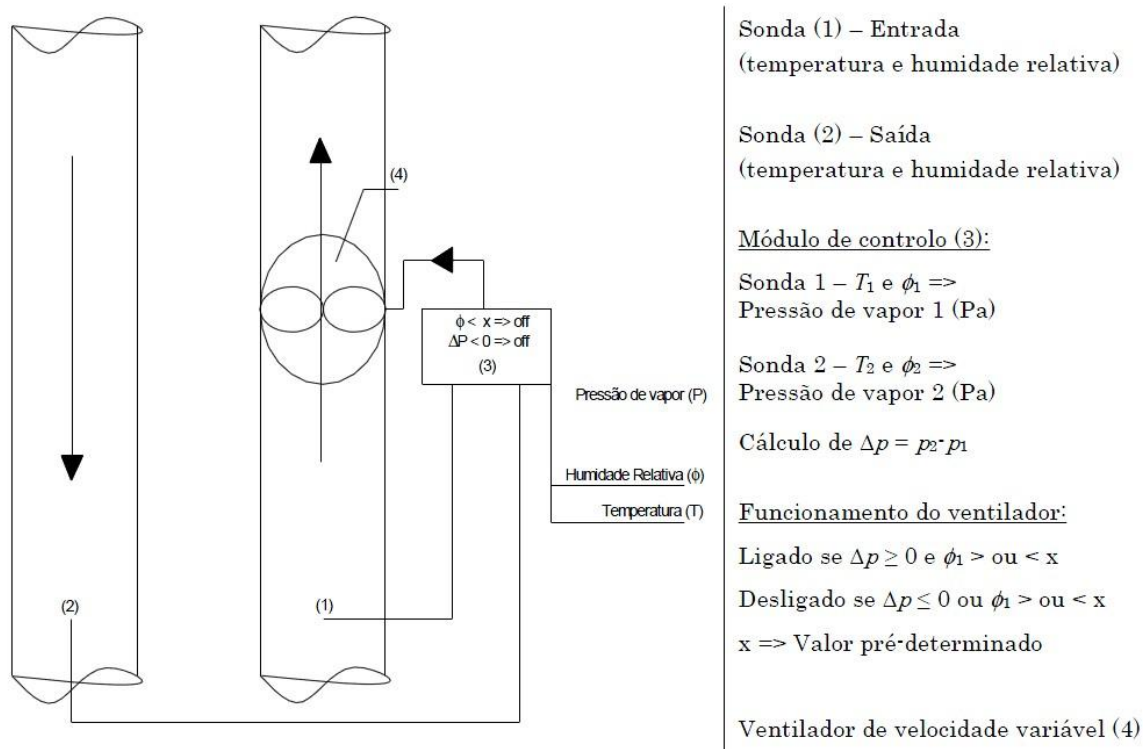


Fig. 2.19 – Esquema de funcionamento do sistema higroregulável com módulo de controlo [3]

## 2.2.4. SISTEMAS SIMILARES

### 2.2.4.1. Sifão atmosférico

Esta técnica consiste na evaporação da humidade em paredes, através de troca gasosa, por acção capilar, osmótica, capilar e pelo impulso gerado pelos gases ascensionais através de um sifão atmosférico, o qual é formado por dois tubos unidos.

O tubo localizado superiormente conduz o ar proveniente do exterior até ao tubo inferior que tem como função absorver a humidade interior e libertá-la através de perfurações de sifões, que se localizam obliquamente em relação à parede. Desta forma ocorrem trocas de gases nos sifões que permitem expulsar o ar mais pesado e húmido pela zona inferior e admitir ar seco e leve proveniente do exterior. Estas trocas são a base do funcionamento desta técnica onde o fluxo de ar natural é que vai secar a parede.

A eficácia desta técnica é maior em paredes menos espessas, em paredes com mais de 50 cm a técnica é bastante menos eficaz, o que obriga a recorrer a um maior número de sifões [20]. Portanto, em paredes de edifícios antigos (paredes de grande espessura), será fundamental recorrer a bastantes sifões, alargando a sua área de influência.

Este conjunto é embutido na parede com argamassa, que permite a passagem da humidade e estabelece o contacto com a parede. O tubo superior tem forma cilíndrica e tem paredes lisas de forma a permitir que o ar deslize facilmente no seu interior. Por sua vez, o tubo inferior é constituído por material cerâmico bastante poroso, permitindo absorver a humidade da parede provocando a sua evaporação. Na figura 2.20 representa-se o esquema de funcionamento de um sifão atmosférico.

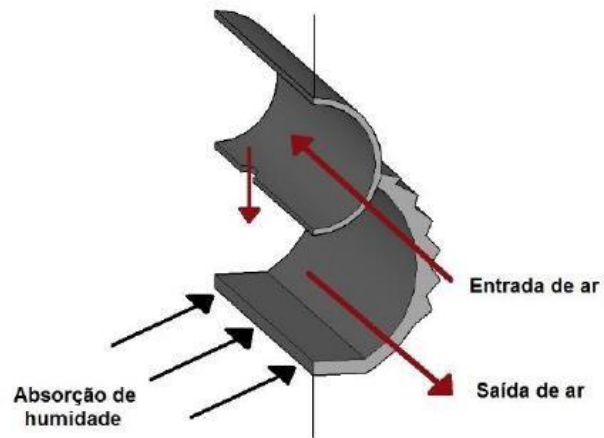


Fig. 2.20 – Sifão atmosférico [13]

#### 2.2.4.2. Sistema de ventilação de fundações

O sistema consiste na instalação de uma conduta em betão com aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de arco de circunferência no lado exterior da parede parcialmente enterrada no solo (Figura 2.21). Esta conduta vai permitir criar um espaço de ar que, ao reduzir a secção absorvente e permitir a circulação de ar, vai reduzir o nível da frente húmida. A circulação de ar no canal dá-se através da conduta, promovido por pelo menos uma ligação desta ao exterior.

É uma solução bastante interessante, pois para além de ser de fácil execução, é também uma solução de baixo custo e bastante polivalente uma vez que pode ser usada em paredes de várias espessuras.

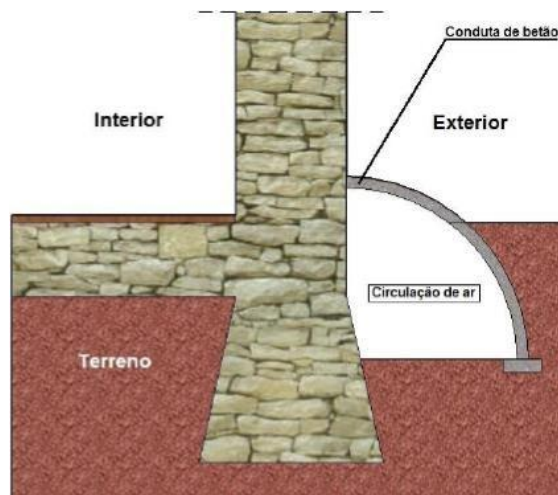


Fig. 2.21 – Conduta de betão ventilada [13]

#### 2.2.4.3. Sistema de ventilação para impermeabilização estrutural

Este sistema é bastante semelhante ao sistema de ventilação da base das paredes HUMIVENT na medida em que o princípio de funcionamento passa por fazer circular ar numa conduta junto a base das paredes de forma a aumentar o potencial de evaporação da base da parede.

O circula na conduta com recurso a meios mecânicos e é admitido a partir do interior do espaço e extraído para o exterior. Junto ao local de admissão de ar é possível colocar um desumificador bem como um sensor, com o intuito de melhorar a qualidade do ar que temos a circular bem como ativar ou desativar o sistema em função dos valores de humidade relativa registados. A figura 2.22 representa um sistema de ventilação para impermeabilização estrutural [21].

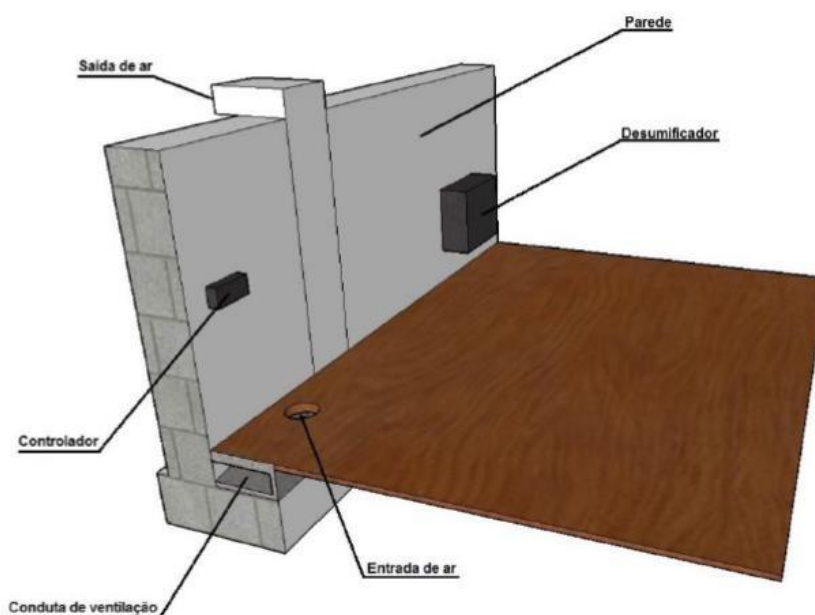


Fig. 2.22 – Sistema de ventilação estrutural [13]

#### 2.2.4.4. Drenagem de paredes enterradas

Esta solução é aplicável quando se pretenda drenar paredes enterradas fundadas sobre sapatas de um edifício com pavimento térreo em betão. O sistema é constituído por duas condutas, uma colocada longitudinalmente ao longo da parede e outra vertical, sendo que a primeira permite a drenagem do solo, enquanto a segunda garante a drenagem da parede. De forma a controlar as condensações no pavimento, na concepção da conduta, deve ser colocado um isolante térmico sobre a conduta horizontal.

É uma solução eficaz, embora só possa ser aplicada neste tipo de solução construtiva. A circulação de ar húmido dá-se para interior do compartimento, situação que pode promover o aparecimento de outras patologias causadas pelo consequente aumento dos valores de humidade relativa interior. A figura 2.23 mostra a localização da conduta de drenagem [22].

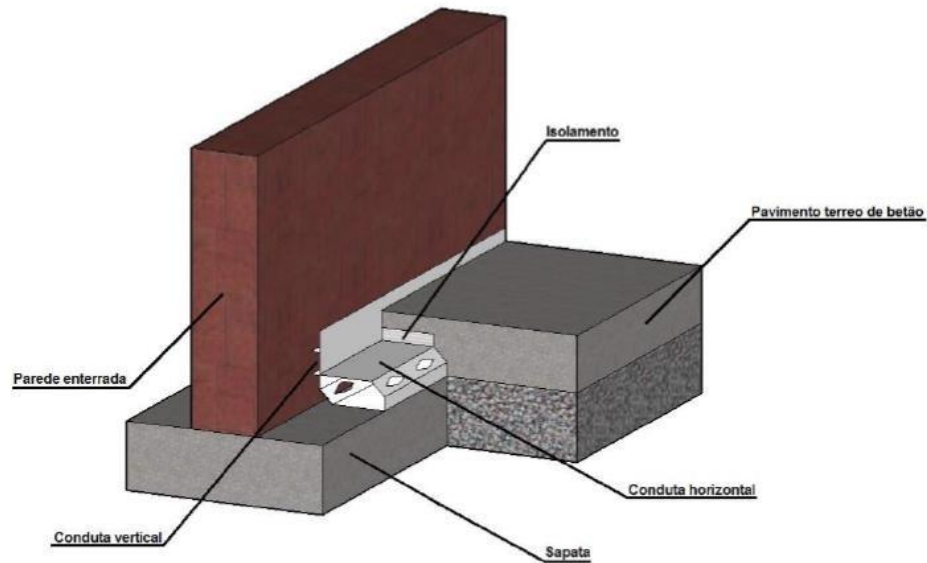


Fig. 2.23 – Drenagem de parede enterrada [13]

#### 2.2.4.5. Tubos de ventilação de rodapé

A introdução de tubos cerâmicos nas paredes dos edifícios anexados a um rodapé é mais uma técnica que permite combater a humidade ascensional. Estes tubos têm como objectivo fazer com que a humidade presente na parede migre para os tubos e evapore na cavidade existente entre o rodapé e a parede.

Este rodapé é em material plástico e contém orifícios para entrada e saída de ar, que se encontram protegidos por uma rede de protecção de forma a evitar a introdução no sistema de insetos que poderiam interferir na eficácia do mesmo. Na zona do rodapé a parede não deverá ser revestida por gesso de forma a evitar a propagação da humidade proveniente nos tubos, já nas restantes áreas da parede podem-se utilizar qualquer tipo de revestimentos.

O ar proveniente do compartimento interior entra no sistema pelo orifício superior do rodapé, e quando em contacto com o ar húmido proveniente do tubo, tornando-se mais pesado e descendo sai pelos orifícios inferiores do rodapé retornando ao compartimento.

Desta forma, é criado um circuito natural de ar, onde o ar seco entra no rodapé superiormente, absorve a humidade e desce, saindo pelos orifícios inferiores.

Este tipo de processo trará repercussões na qualidade do ar do compartimento, visto que o ar húmido é libertado para o interior. Em casos onde a temperatura do ar interior é baixa este processo de circulação baseado na densidade do ar torna-se bastante lenta e pode em muitos casos fazer introduzir ar no sistema húmido, o que levará a que o sistema não seja eficaz.

Outra da desvantagem desta técnica é a necessidade de interferir na componente arquitectónica do edifício, tanto na face exterior das paredes com a existência de tubos de migração de ar, bem como na face interior da parede onde terá de existir um rodapé através do qual se dá a circulação do ar. Assim, esta técnica torna-se desaconselhável para tratar humidades ascensionais em edifícios históricos. Na figura 2.24 mostra-se um corte esquemático do funcionamento de um rodapé ventilado [20].

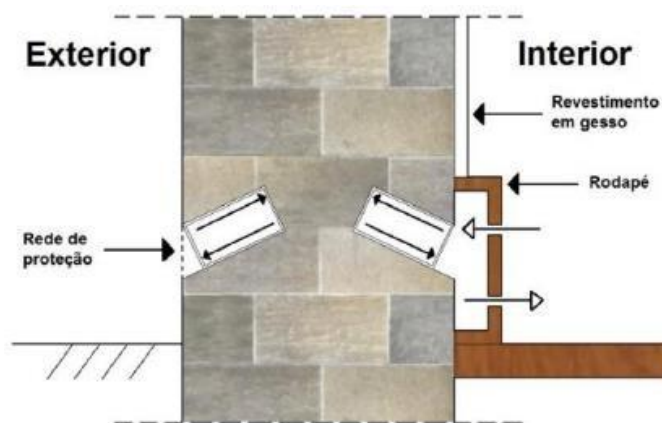


Fig. 2.24 – Rodapé ventilado [13]

## 2.2.5. OUTRAS APLICAÇÕES DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES

### 2.2.5.1 Sistema de ventilação da base das paredes em caso de cheias

Para além das virtudes do sistema de ventilação, já comprovadas em estudos anteriores, como por exemplo, para combater as patologias associadas à humidade ascensional, uma nova aplicação deste sistema será abordada neste subcapítulo: redução da frente húmida provocada pela ocorrência de uma inundação.

Apresenta-se, neste caso, uma parede saturada e um canal na base da parede onde irá circular ar de forma a acelerar o processo de secagem da parede. O sistema de circulação de ar, tal como nos outros casos será higroregulável e terá de ser revestido por uma membrana impermeável de forma a impedir que a água penetre no sistema, afectando a sua eficiência.

Através do programa de cálculo WUFI 2D [7], foi simulada uma parede com a constituição pretendida de forma a poder analisar o comportamento da mesma, onde foram estudados diferentes cenários.

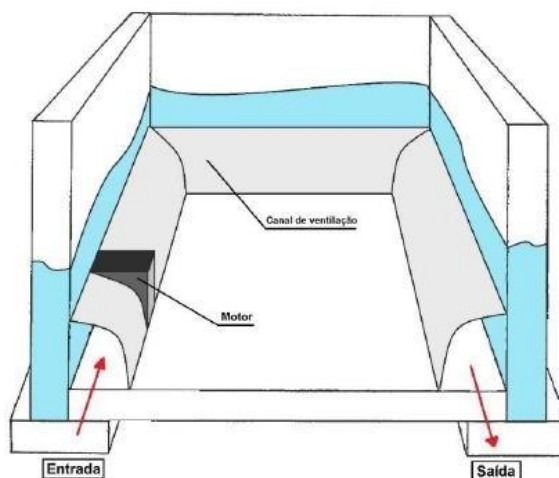


Fig. 2.25 – Aplicação do sistema de ventilação em caso de cheias [3]

#### 2.2.5.1.1. Propriedades dos parâmetros

Tendo em conta a maioria dos edifícios afectados por inundações baseou-se o trabalho em edifícios históricos. Estas construções apresentam bastantes especificidades que as tornam mais sujeitas a serem afectadas por patologias relacionadas com a presença de humidade.

Por forma a ser possível tirar conclusões, foi necessário fazer variar os parâmetros. Nas simulações realizadas as variáveis são as seguintes:

- Espessura da parede;
- Dimensões do sistema
- Velocidade do ar

As características dos materiais que constituem a parede, definem o comportamento da mesma face à presença de humidade, permitindo *à posteriori* chegar a uma solução para a patologia em questão. Tendo em conta que estamos perante um problema presente em edifícios históricos, o material que iremos trabalhar é o granito, predominante neste tipo de construções.

O granito foi bastante utilizado na construção no passado devido às suas características de resistência e durabilidade. É constituído por uma associação de vários minerais, entre eles o feldspato, micas e quartzo. Atualmente esta pedra é utilizada nas construções mais com funções decorativas e menos com funções estruturais, mesmo assim está bastante presente em alguns edifícios históricos, barragens, calçadas, entre outros.

#### 2.2.5.1.2. Espessura da parede

Para o estudo do comportamento da parede face à presença da humidade, a espessura é uma variável com grande influência. Este estudo considerou, inicialmente, uma espessura da parede de 20cm e a mesma foi aumentando de 20 em 20 cm, chegando a um máximo de 1,4 m. Após analisar o comportamento da parede com diferentes espessuras, é possível tirar conclusões acerca da influência da espessura da parede no comportamento da mesma [27].

#### 2.2.5.1.3. Geometria, dimensões e número de renovações por hora do sistema de ventilação

Para o estudo da influência do canal de ventilação na secagem da parede saturada foi necessário definir as dimensões e geometrias das diferentes soluções para o canal e qual a ventilação a que o mesmo está sujeito.

Assim, o objectivo final é concluir qual a geometria do canal e renovações por hora do sistema mecânico de ventilação mais eficazes para as diferentes situações.

Através da equação do número de renovações horárias, podemos concluir que o número de renovações horárias não depende da seção do canal mas sim do seu comprimento e da velocidade do sistema de ventilação [27].

#### 2.2.5.1.4. Características da frente húmida, das diferentes simulações e da envolvente

O principal objectivo da colocação do sistema de ventilação da base das paredes é reduzir a altura da frente húmida presente na parede saturada. Como tal, foi testada a presença do canal de ventilação e qual a sua influência na altura da frente húmida nas diferentes configurações. O estudo da secagem das paredes começou pela análise da parede com e sem sistema de ventilação [27].

O tempo de simulação foi de dois anos e as condições climatéricas irão estar o mais próximas possível das reais, sem interferência da chuva e vento. Considerou-se uma temperatura ambiente de 20°C e uma humidade relativa de 60%. O terreno terá uma humidade relativa de 70%.

Nestas condições testaram-se diferentes cenários onde se fez variar o número de renovações por hora (Rph), a seção do canal e a espessura da parede granítica [27].

#### 2.2.5.1.5. Conclusões

Após testadas todas as configurações por um período de dois anos, é possível retirar algumas conclusões relativamente às soluções apresentadas:

- A eficácia do sistema de ventilação da base da parede diminui com o aumento da espessura da mesma [27];
- O aumento da seção do sistema de ventilação tem preponderância na redução da frente húmida da parede até à seção 40cmx40cm. Em seções maiores a altura máxima atingida pela frente húmida tem tendência a estabilizar [27].

Tendo em conta as situações anteriormente referidas, é possível concluir que o sistema de ventilação da base das paredes poderá ter um grande contributo na secagem de paredes de edifícios históricos afectados por inundações. Traz resultados positivos para qualquer espessura da parede embora, seja mais eficaz em paredes menos espessas. Por fim, o número de renovações horarias proporcionado pelo sistema higrorregulável tem como valor óptimo determinado valor de Rph, como tal não teremos grandes vantagens em ter um sistema com capacidade superior aquela que necessitamos [27].

#### 2.2.5.2 Aplicação do sistema de ventilação da base das paredes em armários

O homem produz cerca de três a cinco litros de vapor de água por dia, por isso a presença numa habitação de várias pessoas em conjunto com a produção de vapor de água ao cozinhar, ao tomar banho bem como a lavagem e secagem de roupa são actividades que fazem muitas vezes disparar as humidades relativas dentro dos edifícios para valores elevados, o que pode trazer consequências para a saúde. Atualmente, todos estes factores despertam bastante preocupação para quem dimensiona os edifícios, existindo mesmo muito casos onde já temos projectos de ventilação.

Nos edifícios, existem locais onde as humidades relativas tendem a ter valores ainda mais elevados, devido a serem locais fechados, sem passagens de ar, e onde muitas vezes se guardam objectos ou roupas molhados. Os armários constituem assim locais problemáticos onde temos um ambiente ideal à proliferação de fungos e outros seres patogénicos.

Com provas dadas no tratamento de humidade ascensional, na secagem de paredes afectadas por cheias/inundação, seria de grande utilidade procurar adaptar este sistema de ventilação a armários localizados em casas, escritórios, armazéns, etc.

Idealmente, o sistema de ventilação aplicado em armários funcionaria exactamente da mesma maneira que o aplicado na base das paredes, embora aqui o aparelho responsável pela indução de ar no canal terá de ter dimensões bastante menores.

Na figura 2.26 ilustra-se um possível esquema de ventilação para um armário corrente. Como se pode constatar, a solução de ventilação passa por colocar uma grelha inferior, junto ao chão, para admissão de ar e uma grelha superior, junto ao teto, para exaustão.

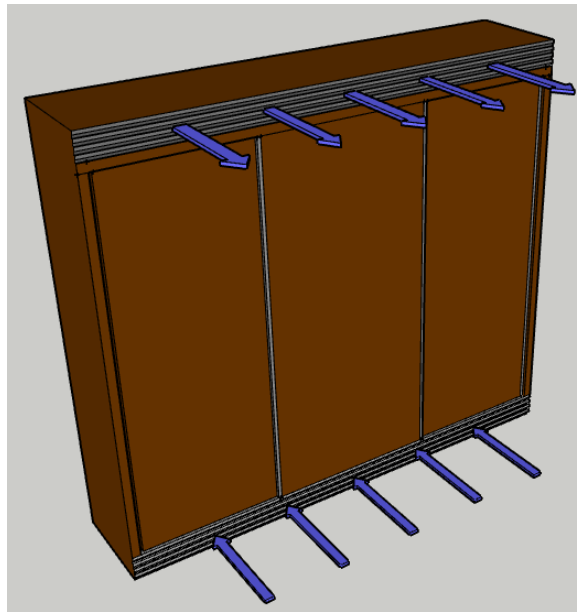


Fig. 2.26 – Exemplo de esquema de funcionamento de um armário ventilado

### 2.2.5.3 Aplicação do sistema de ventilação da base das paredes em coberturas ventiladas em desvão

O clima de Portugal é caracterizado por elevadas amplitudes térmicas entre dias amenos e noites com forte arrefecimento. As amplitudes térmicas interferem no conforto térmico dos edifícios e dificultam o planeamento de soluções que garantam a eficácia durante todo o ano. É ainda caracterizado por valores significativamente altos de radiação solar, principalmente no Verão, originando elevadas temperaturas nas superfícies do telhado. O sobreaquecimento do revestimento da cobertura durante a incidência solar pode causar condições térmicas indesejadas nos edifícios. As coberturas em Portugal são tipicamente inclinadas e revestidas com telhas cerâmicas fazendo parte do património edificado Português. No entanto, este tipo de solução por vezes apresenta diversas anomalias, tais como, colonização biológica, defeitos no isolamento térmico, cor e desníveis inadequados. Outro problema está associado a defeitos no sistema de ventilação, dando-se-lhe pouca importância e muitas vezes desconhecendo-se as suas vantagens. Uma das soluções passivas consiste na construção de coberturas ventiladas que diminuam a transferência de calor através do telhado, diminuindo os gastos a nível energético, e consequentemente o aumento do conforto térmico do edifício [26]

A aplicação do sistema de ventilação da base das paredes neste tipo de estruturas irá permitir reduzir a os valores de humidade relativa na face interior das coberturas e consequentemente no espaço por elas envolvido e assim melhorar as condições de salubridade e habitabilidade do edifício em questão. A figura seguinte mostra um possível esquema de funcionamento de uma cobertura ventilada em desvão não habitável. A figura 2.27 representa o funcionamento de uma cobertura em desvão ventilado.

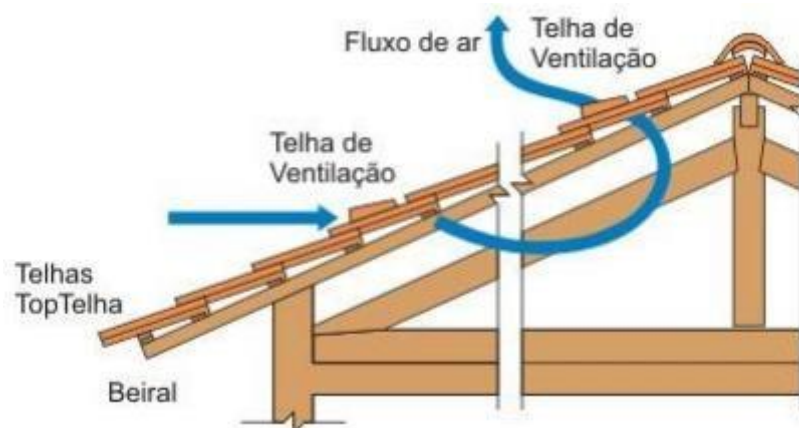


Fig. 2.27 – Esquema de funcionamento de uma cobertura ventilada em desvão não habitável [25]

#### 2.2.5.4 Aplicação do sistema de ventilação da base das paredes em desvãos sanitários

A aplicação do sistema de ventilação em desvão sanitário tem uma grande importância no controlo da humidade relativa proveniente do terreno. Esta técnica permite combater de forma eficaz o desenvolvimento de fungos, bactérias e bolores e outras patologias nefastas aos elementos construtivos, sobretudo madeiras.

O sistema higrorregulável de ventilação da base das paredes – HUMIVENT é uma solução interessante para desvãos sanitários, uma vez que através da circulação de ar, permite retirar humidade dos mesmos e accionar o mecanismo apenas quando necessário. Desta forma, teremos ventilação mais eficiente, permitindo poupar em manutenção e nos gastos energéticos.

Na figura 2.28, é possível ver um corte esquemático de um desvão sanitário. Pode constatar-se que através da parede do lado esquerdo do edifício se admite ar que circula no desvão sanitário e sai na junto à parede do lado contrário [23], [24].

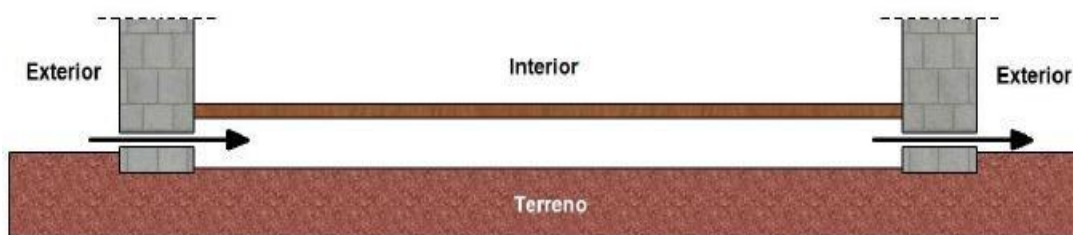


Fig. 2.28 – Ventilação de desvão sanitário [13]

# 3

## IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMA DE TRATAMENTO HUMIVENT NUM EDIFÍCIO HISTÓRICO

### 3.1. HISTÓRIA DO EDIFÍCIO

A Igreja de São Salvador de Vilar de Frades, localiza-se junto à margem esquerda do rio Cávado, na freguesia de Areias de Vilar, concelho de Barcelos. Esta Igreja constitui parte do complexo do Convento da Congregação dos Cónegos Seculares de S. João Evangelista, tendo sido, no passado, um mosteiro beneditino.

Segundo Frei Leão de São Tomás, terá existido uma carta escrita por um Monge Beneditino em 571, onde constava que a data de construção do mosteiro seria o ano de 566.

No entanto, em 714 o mosteiro terá ficado completamente destruído devido às invasões muçulmanas. Segundo Jorge de São Paulo, terá sido reconstruído em 1070 ao estilo românico, ainda sobre alçada da Ordem Beneditina [9].

No séc. XIV o Mosteiro encontrava-se em mau estado de conservação e foi entregue a uma nova congregação de Cónegos Seculares de São Salvador de Vilar de Frades, originando uma nova congregação, os Cónegos Seculares de São João Evangelista, mais conhecidos por Lóios. A partir desta altura foram-se, progressivamente, anexando várias Igrejas pela mão de D. Fernando da Guerra.

A partir do séc. XVI, o mosteiro sofreu inúmeras ampliações e criaram-se novos espaços como dormitórios, biblioteca, cozinha, um refeitório, uma nova torre e um claustro. A fachada principal foi reabilitada no séc. XVIII e os interiores da Igreja foram concluídos [9], [28].

No séc. XIX foram extintas várias ordens religiosas, passando o Mosteiro de Vilar de Frades a pertencer ao Estado Português que o vendeu em hasta pública, com excepção da Igreja e do claustro. No final do séc. XIX um incêndio destruiu o Mosteiro e já no séc. XX começaram as obras de recuperação e conservação, realizadas pelos Serviços de Conservação do Instituto Português do Património Arquitectónico e da Direcção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. Na figura 3.1 pode ver-se uma fotografia aérea do Mosteiro de Vilar de Frades [20], [28], [29].



Fig. 3.1 – Igreja e Mosteiro situado na região Norte de Portugal [9]

A Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades foi concluída em 1694, com projeto do Arquiteto Espanhol João Castilho. A Planta é em forma de cruz latina e o corpo da nave única encontra-se separado lateralmente por cinco capelas intercomunicantes, revestidas por painéis de azulejo separadas do corpo principal por gradeamento em madeira [28], [32].

A capela-mor apresenta uma planta rectangular e uma grande volumetria. Pelo contrário, o transepto apresenta uma volumetria mais humilde. A nave central da Igreja é coberta por uma abóbada complexa, assim como, as coberturas das capelas laterais. O suporte da abóbada da capela-mor é realizado por contrafortes, facto que na época gerou alguma desconfiança em termos de segurança. Na zona Sul da Igreja encontra-se o claustro, a sacristia e o Mosteiro.

Já nos anos 90 realizaram-se obras de limpeza, restauro, drenagem, recuperação da cobertura, estabilização estrutural, reabilitação de caixilharias e fachadas, bem como isolamento de paramentos e cantarias. Concluíram-se também as obras em algumas salas que se destinam a práticas religiosas, e foram realizadas sondagens arqueológicas [20], [28], [29].

No ano de 2006, após mais um restauro, o Mosteiro abriu portas ao público e passou a fazer parte dos roteiros turísticos da zona Norte de Portugal. Na obra podem ser observados estilos arquitectónicos de diversas épocas, como o estilo românico, manuelino, barroco e neoclássico. Na atualidade, o Mosteiro está classificado como Monumento Nacional desde 1910, sendo propriedade do Estado Português. A Igreja é utilizada para práticas religiosas e outra parte do Mosteiro utiliza-se como lar [30]. As figuras 3.2 e 3.3 representam, respectivamente, a planta da Igreja e a abóbada da nave principal.

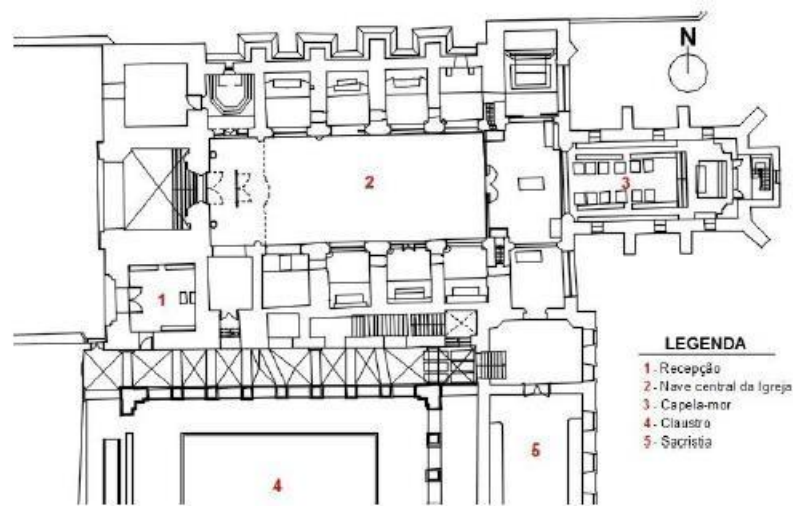


Fig. 3.2 – Planta da Igreja [31]



Fig. 3.3 – Abóbada da nave principal da Igreja [33]

### 3.2. PATOLOGIAS OBSERVADAS

Como é habitual em edifícios históricos, as patologias reveladas pela Igreja estão relacionadas com a presença de água nas paredes interiores e exteriores, pavimentos, pilares e até mesmo nas coberturas, podendo manifestar-se através de humidade ascensional, condensações internas e infiltrações. A presença de humidade surge do facto de, como é normal neste tipo de edifícios, existirem condições de evaporação desfavoráveis à secagem, pois verificam-se, no interior da Igreja, temperaturas baixas, humidades relativas elevadas e fraca ventilação [3], [31]. As figuras 3.4, 3.5 e 3.6, pretendem ilustrar algumas das patologias observadas.

A conclusão acerca destas patologias advém do facto de se ter constatado, no local, os seguintes factos [3], [20]:

- As paredes exteriores apresentavam manchas e musgos com predominância das partes mais próximas do solo e em toda a altura dos contrafortes das paredes exteriores;
- Na capela-mor verificavam-se musgos na face interna das paredes sobretudo até cerca de 1 metro de altura;

- Os pilares de granito, localizados da nave central, apresentavam manchas esverdeadas;
- Nas capelas laterais notou-se a presença de manchas de humidade, nas paredes interiores;
- Os pavimentos da capela-mor e das capelas laterais encontravam-se saturados;
- As coberturas apresentavam vestígios da presença de humidade na face interior, com predominância nos cantos junto às abobadas.

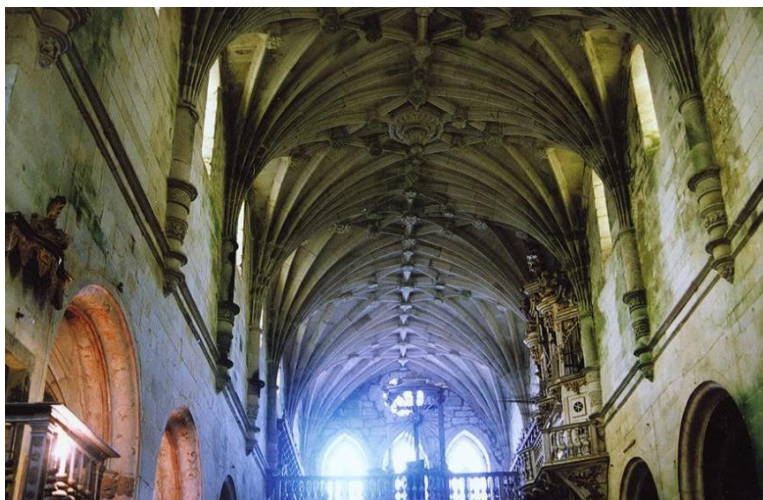


Fig. 3.4 – Manchas esverdeadas na abóbada revelam presença de humidade



Fig. 3.5 – Paredes interiores com vestígios de humidade [2]



Fig. 3.6 – Paredes exteriores marcadas com manchas e musgos, especialmente em toda a altura dos contrafortes [2]

Segundo Freitas V.P. [31], as patologias verificadas devem-se sobretudo a:

- Fenómenos de ascensão capilar através das paredes graníticas associados à dificuldade da secagem de elementos construtivos quando em contacto com o solo;
- Deficiente ventilação do espaço;
- Condensações superficiais;
- Infiltrações através da cobertura e dos contrafortes.

### 3.3. INTERVENÇÃO EFETUADA

Tratando-se de um edifício de cariz histórico, classificado como Monumento Nacional, cuja arquitetura deverá ser preservada, foi necessário intervir, procurando manter as suas características de autenticidade.

Assim, durante os trabalhos de reparação, a preocupação prendeu-se com a aplicação de métodos e tratamentos eficazes que não tenham impacto visual e arquitectónico no património [1]:

- Impermeabilização dos contrafortes, com especial incidência na face superior;
- Reforço de ventilação da Igreja;
- Impermeabilização das superfícies inclinadas de granito à vista nas paredes exteriores;
- Drenagem e impermeabilização dos pavimentos da capela-mor, das capelas laterais e do transepto;
- Realização de um sistema de ventilação da base das paredes.

De todas as medidas implementadas, a que se revelou mais eficaz foi o sistema higroregulável de ventilação da base das paredes, que irá ser estudada ao longo do presente capítulo.

Na envolvente exterior da parede existe um canal de ventilação em betão pré-fabricado que possui aberturas pontuais ao ar exterior, por intermédio de um mecanismo de ventilação. Noutras zonas da Igreja, a ventilação das paredes é realizada através de um sistema localizado na face interior das paredes. Nas figuras 3.7 e 3.8 mostram-se dois cortes construtivos do canal de ventilação.

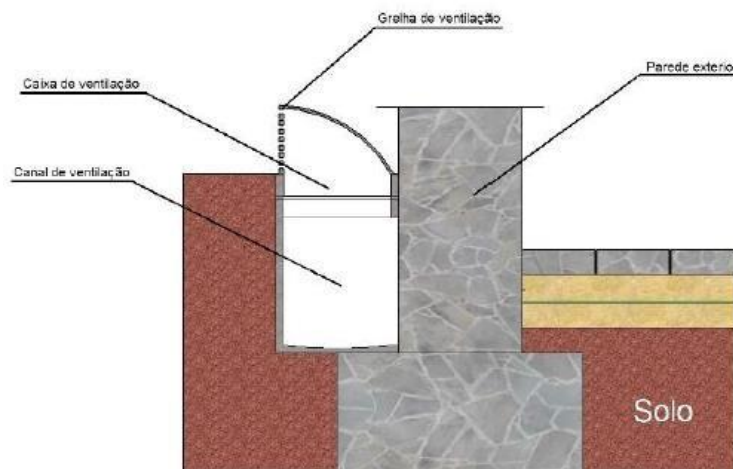


Fig. 3.7 – Corte construtivo do sistema de ventilação exterior com pormenor da grelha de ventilação [13]

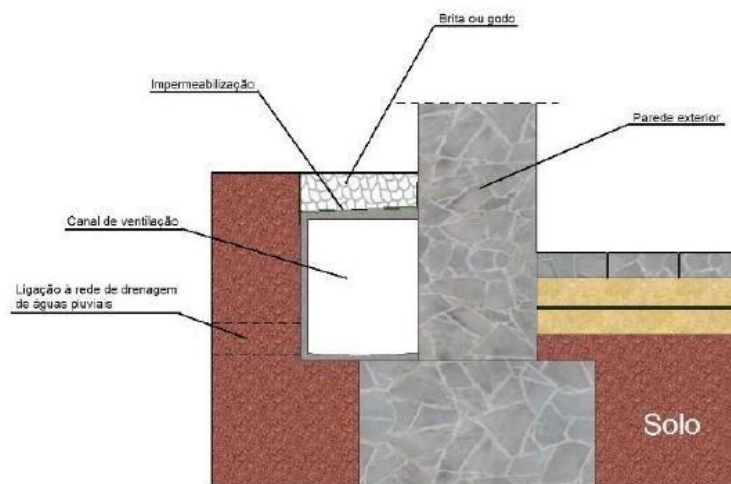


Fig.3.8 – Corte construtivo do sistema de ventilação exterior [13]

Assim, pode verificar-se a existência de dois subsistemas que funcionam de forma independente, um subsistema Norte e um subsistema Sul, cuja extensão é de 130 e 70 metros, respetivamente.

A admissão de ar no subsistema Norte é feita a partir do exterior, através de uma abertura existente na fachada. A exaustão para o exterior da Igreja é controlada pelo sistema higroregulável na fachada poente.

No subsistema Sul, a admissão de ar é feita através de duas grelhas de admissão localizadas no interior da Igreja, portanto o ar admitido é proveniente do interior. A exaustão é realizada para o claustro e é, tal como no subsistema Norte, controlado por um sistema higroregulável. É constituído por elementos tubulares pré-fabricados em betão, com 200 mm de diâmetro, que se encontram perfurados ao longo do seu desenvolvimento. Na figura 3.9 é possível ver a planta da Igreja com os respectivos subsistemas de ventilação.

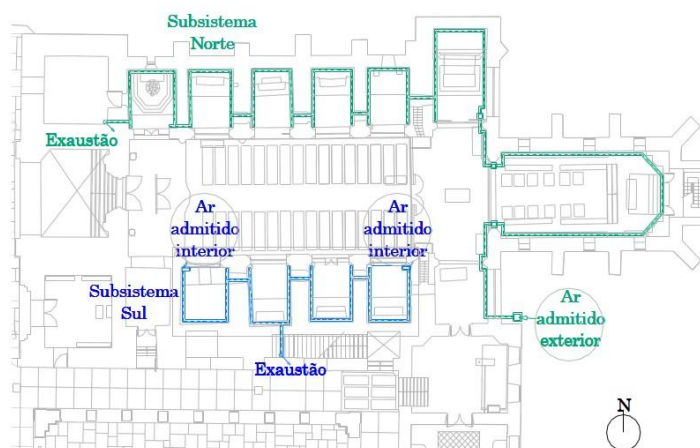


Fig. 3.9 – Planta com localização dos subsistemas de ventilação [34]

A impermeabilização dos subsistemas de ventilação da base das paredes é ao nível do pavimento (corresponde à solução 2B tratada no Capítulo 2), o que leva a que a humidade recolhida pelo sistema

possa ser proveniente da parede mas também da areia molhada que constitui a base do pavimento lajeado. A figura 3.10 representa um corte construtivo do sistema de ventilação interior.

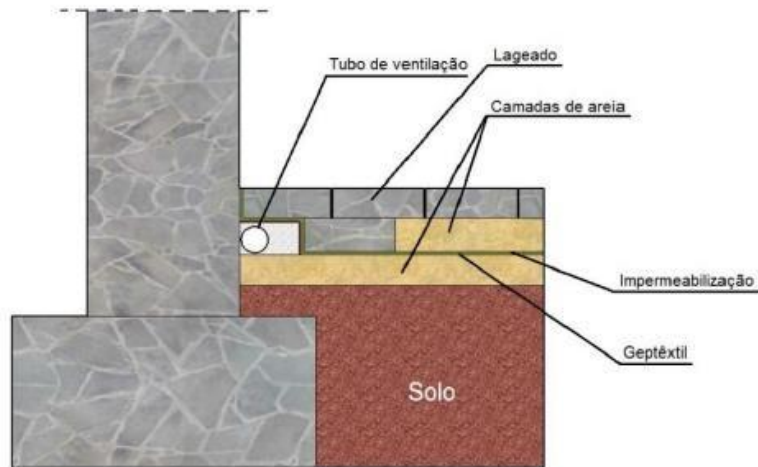


Fig. 3.10 – Corte construtivo do sistema de ventilação interior localizado na base da parede [13]

### 3.4. CONSTITUIÇÃO E FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS

Cada um dos subsistemas é constituído por duas sondas e dois transmissores de humidade relativa e temperatura, um módulo de comando, um módulo de aquisição de dados para registo (*data-logger*).

A localização de cada uma das sondas é junto à grelha exterior da Igreja e no interior da tubagem de ventilação, encontrando-se ligadas a um transmissor de temperatura e humidade relativa. Estes transmissores encontram-se ligados ao módulo de comando, que em função dos dados recolhidos pelas sondas, liga ou desliga o dispositivo mecânico de ventilação tendo em conta os parâmetros pré determinados de pressão de vapor e humidade relativa. Na figura 3.11 pode-se ver o módulo de controlo e o sistema de aquisição de dados [1].



Fig. 3.11 – Módulo de controlo e sistema de aquisição de dados

O sistema de registo de dados, fá-lo a cada 15 minutos, e encontra-se, tal como o dispositivo de controlo, fixado junto ao dispositivo de extracção do respectivo sistema. Este sistema fornece registos de temperatura e humidade relativa.

Inicialmente, apesar do sistema registar o valor da temperatura e humidade relativa, apenas os valores de humidade relativa (à entrada e à saída) têm interferência no seu funcionamento. Nesta fase, o critério de funcionamento do sistema higroregulável tinha como princípio de funcionamento períodos onde se tinha registado uma humidade relativa à saída superior, no mínimo em 5% à registada à entrada.

No âmbito da sua Dissertação de Mestrado, Guimarães A.S. [2] desenvolveu estudos que comprovam que este critério conduzia a condensações internas bem como à ocorrência de dissoluções/cristalizações de sais no sistema de ventilação. Estas ocorrências contribuem para a menor eficácia do sistema, com consequências em termos de consumo energético e longevidade de todo o sistema.

Desta forma, passou a adoptar-se um critério mais adequado para evitar condensações internas, onde o sistema passou a entrar em funcionamento sempre que a pressão de vapor à saída for superior à pressão de vapor à entrada.

Com o intuito de evitar a ocorrência de cristalizações e/ou dissoluções de sais, adicionou-se um novo critério de funcionamento, onde o sistema só é ativado caso a humidade relativa à entrada do sistema seja superior a 35%.

Com esta alteração do critério de funcionamento do sistema, tornou-se necessário calcular a pressão de vapor à entrada e à saída do sistema a partir dos valores de temperatura e humidade relativa registados pelas sondas. Para este cálculo, foi necessário colocar um programador que dispõe de uma conversão digital de psicometria, e que permite proceder à calibração das sondas sempre que necessário [3].

Apresenta-se de seguida, uma das expressões matemáticas que relaciona a temperatura com a pressão de saturação.

$$P_s = 611 \times e^{\frac{(a \times t)}{(t'+b)}} \quad (3.1)$$

onde:

$P_s$  - pressão de saturação em Pa

$e$  - número de Nepper –  $e \approx 2,718$

$t$  - temperatura em °C

$a = 22,14$ ;  $t' = 271,44$  °C – para  $t < 0$  °C

$a = 17,08$ ;  $t' = 234,18$  °C – para  $t \geq 0$  °C

Concluiu-se que o sistema funcionou ininterruptamente neste período de tempo, sem qualquer tipo de reparação a Sul, já a Norte um problema no sistema de aquisição de dados, devido ao excesso de

humidade no local onde havia sido instalado, não permitiu o registo das leituras. Desta forma, o acesso aos registos do subsistema Norte só foi possível a partir de 2010.

As leituras realizadas são transferíveis para um computador com recurso a um programa designado por MMGRAFIX7 da Micromec Multisens. Este programa efetua a passagem da informação, sob forma de tabelas ou gráficos, realizando também algumas análises estatísticas como a média, desvio padrão e valores máximos e mínimos [3].

### 3.5. INFORMAÇÃO RECOLHIDA SOBRE O FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS

Com o sistema de ventilação da base das paredes, implementado em conjunto com o protótipo – HUMIVENT, obtiveram-se registos que foram analisados no passado. De seguida apresentar-se-ão esquemas, diversos gráficos e análises aos dados obtidos.

#### 3.5.1. SUBSISTEMA SUL

Os valores de humidade relativa e a temperatura foram registados nas duas sondas (uma à entrada e outra à saída do subsistema). Na figura 3.12 apresentam-se os valores registados no *data-logger* à entrada e à saída.

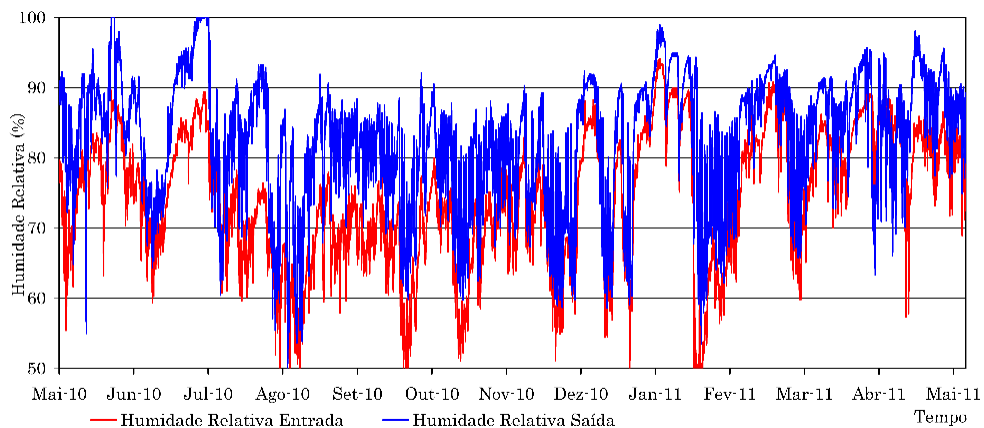


Fig. 3.12 – Flutuação dos valores de humidade relativa à entrada e à saída do subsistema Sul [3]

Neste subsistema, a humidade relativa à entrada apresenta valores elevados durante o ano, com uma média de cerca de 80%.

Analisando o gráfico da figura 3.13, conclui-se quanto à temperatura, que à entrada é superior à temperatura registada à saída, nos meses mais quentes. Em contrário, nos meses mais frios a temperatura à entrada é inferior à temperatura à saída. Através da análise dos gráficos da temperatura, pode concluir-se que têm o mesmo comportamento à entrada e à saída, embora desfasado no tempo. A inércia térmica é um factor importante e que justifica este comportamento [11].

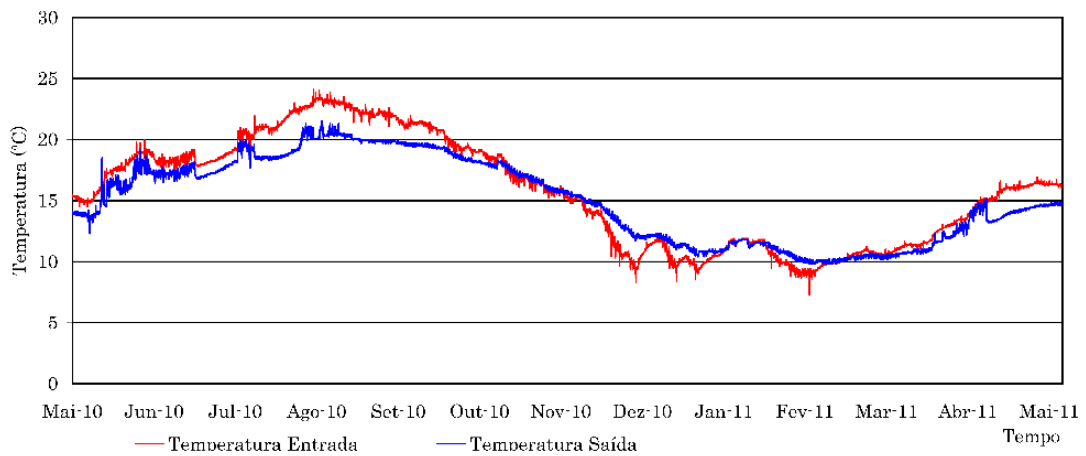


Fig. 3.13 - Flutuação da temperatura à entrada e à saída do subsistema Sul [3]

Na figura 3.14 encontra-se um esquema onde é possível ver a localização das sondas de temperatura e humidade relativa no subsistema Sul.

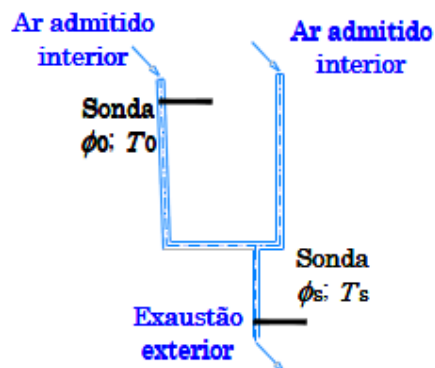


Fig. 3.14 – Esquema de localização das sondas no subsistema Sul [3]

Com os valores de temperatura e humidade relativa, e recorrendo à expressão 2.1, obteve-se os valores da pressão de vapor, representados no gráfico da figura 3.15, em conjunto com os períodos em que a ventilação esteve em funcionamento. Pode concluir-se que o ventilador esteve a trabalhar durante 82% do ano e parado 18% do tempo.

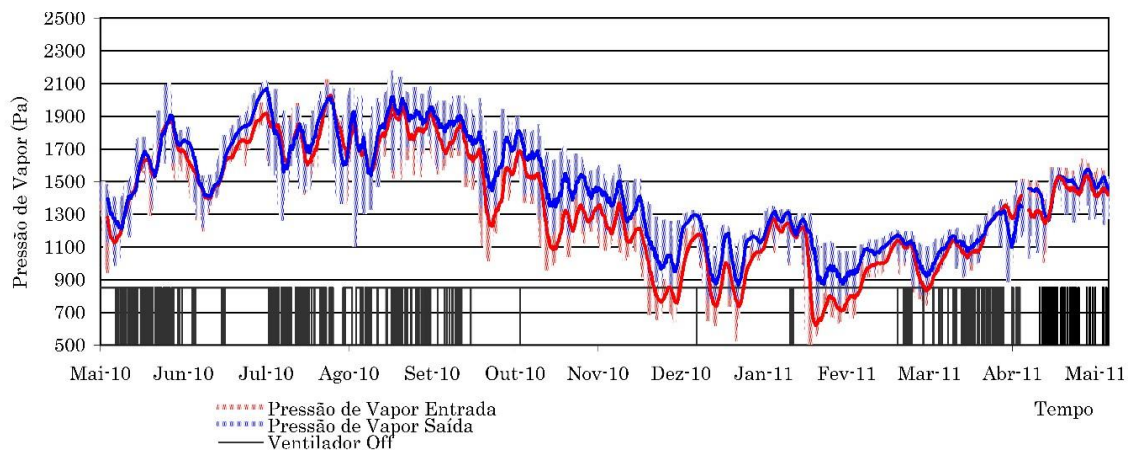


Fig. 3.15 – Flutuação da pressão de vapor e períodos de funcionamento do subsistema Sul ao longo do tempo [3]

Como já foi referido anteriormente, para verificar se ocorrem condensações no interior do canal de ventilação, é necessário calcular a diferença de pressão de vapor entre a saída e a entrada do subsistema. O gráfico da figura 3.16 representa a variação ao longo do tempo da pressão de vapor à entrada e à saída do subsistema Sul.

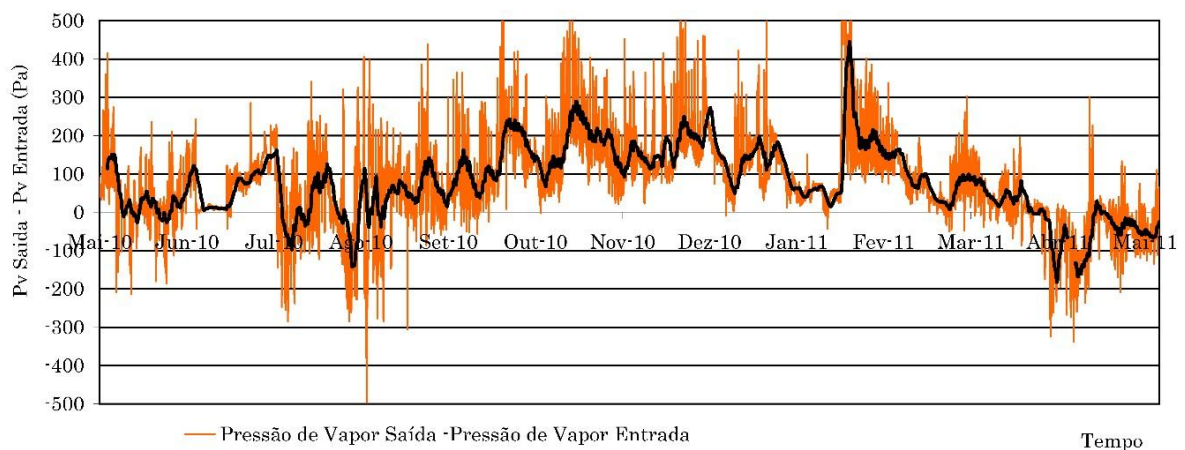


Fig. 3.16 – Diferencial de pressão de vapor à entrada e à saída do subsistema Sul [3]

Com o conhecimento do diferencial de pressão, o caudal de ventilação e o tempo em que se consideram os valores constantes, recorrendo às fórmulas matemáticas apresentadas em 2.2, calcula-se a quantidade de vapor de água retirada através do sistema. No gráfico da figura 3.17 mostra-se a quantidade de água acumulada pelo subsistema de ventilação Sul desde Maio de 2010 até Maio de 2011.

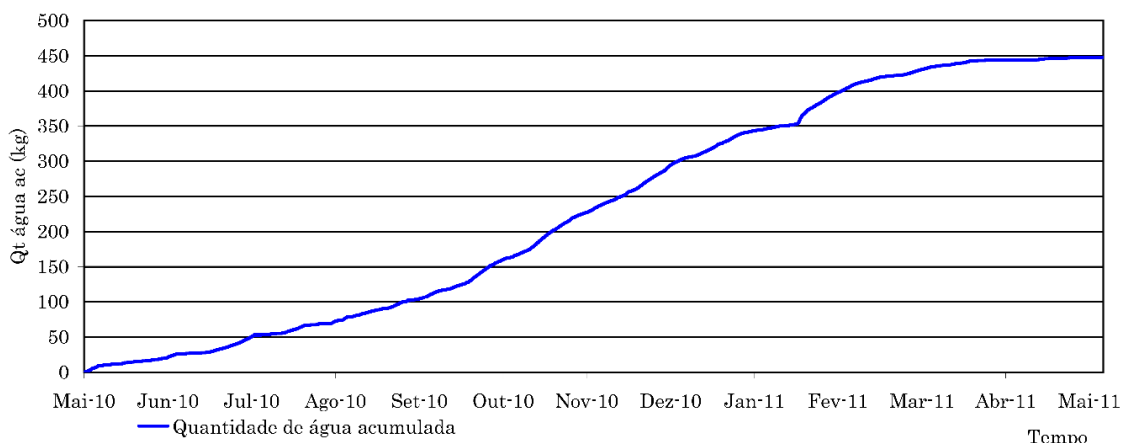


Fig. 3.17 – Quantidade de água acumulada retirada pelo subsistema Sul [3]

Este caudal retirado foi calculado recorrendo a um anemómetro, apresentando um valor médio de 0,02 m<sup>3</sup>/s (só contabilizando o período em que esteve a funcionar).

Recorrendo aos gráficos que traduzem o vapor de água retirado do sistema, conclui-se que para o subsistema Sul os valores são, em média, mais elevados nos meses de Inverno comparativamente com os meses de Verão.

Após análise dos valores de temperatura, humidade relativa, diferenças de pressão de vapor à entrada e à saída e ventilação durante cerca de 1 ano no subsistema Sul, é possível retirar as seguintes conclusões [3]:

- As condensações no sistema ocorrem com grande preponderância nos meses de Verão, onde o sistema apresenta no seu interior temperaturas inferiores às do ar admitido, e valores de humidade relativa elevados (em média, 80%);
- No Inverno, o sistema tem um comportamento mais eficaz sob o ponto de vista das condensações, uma vez que a humidade relativa à entrada é aproximadamente igual durante todo o ano, e a temperatura à entrada do sistema de ventilação é inferior à temperatura registada no interior o que faz com que ao entrar no sistema, o ar aqueça e transporte humidade para o exterior;
- Como traduzido anteriormente no gráfico da figura 3.13, os valores da temperatura à saída do subsistema de ventilação têm valores homólogos aos registados à entrada, embora com um desfazamento temporal, facto explicado pela inércia térmica;
- O dispositivo de ventilação mecânica esteve mais tempo desligado nos períodos de verão, e esta situação deve-se à existência de condensações neste período de tempo. Esta ocorrência ajuda a explicar o porquê do sistema ter retirado mais água durante os meses de Inverno;
- Um dos critérios para o funcionamento do sistema de ventilação é que a humidade relativa à entrada seja superior a 35%, como os valores registados à entrada foram sempre superiores a 50%, podemos concluir que quando o sistema parou, não foi por incumprimento deste critério. Ainda assim, podem ter ocorrido cristalizações e/ou dissolução de sais pois os valores de humidade relativa oscilaram entre os 50 e 95%;
- Durante o período de funcionamento do sistema de ventilação, desde Maio de 2010 a Maio de 2011, foram retirados 448 kg de água (calculado com recurso à expressão matemática 2.3).

### 3.5.2. SUBSISTEMA NORTE

Os gráficos e as análises do subsistema de ventilação Norte compreendem o período de Maio de 2010 até Maio de 2011, tal como acontece no subsistema de ventilação Sul. Na figura 3.18 mostra-se um esquema do subsistema de ventilação Norte com a localização das sondas nele instaladas.

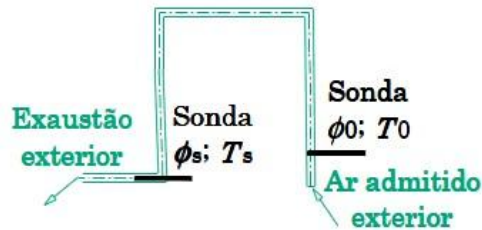


Fig. 3.18 – Esquema de localização das sondas do subsistema Norte [3]

Nas figuras 3.19 e 3.20 apresentam-se os valores de humidade relativa e temperatura, respectivamente, registados à saída e entrada do sistema com recurso ao *data-logger*.

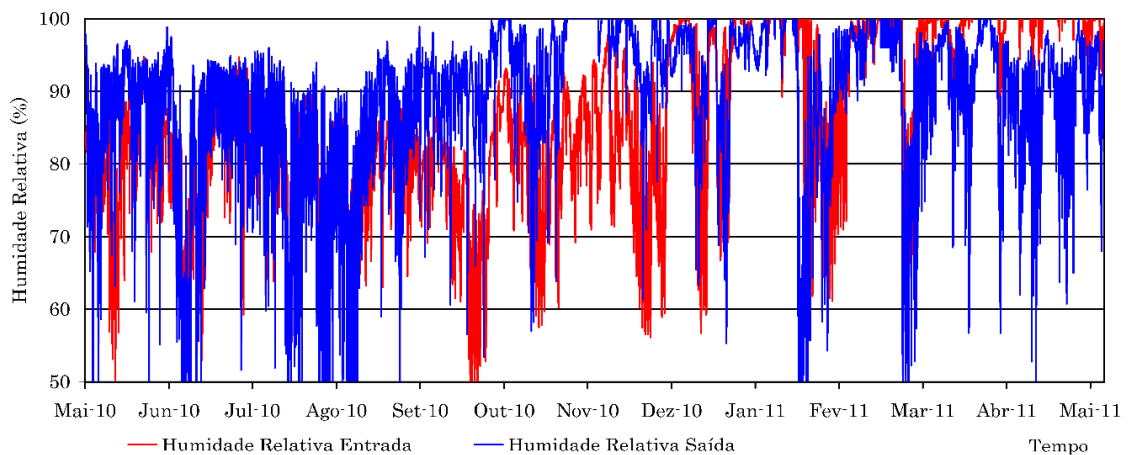


Fig. 3.19 – Flutuação da humidade relativa à entrada e à saída do subsistema Norte [3]

A humidade relativa apresenta valores elevados que representam em média 85%, desde Maio de 2010 até Maio de 2011. Este valor é substancialmente mais elevado que o registado no subsistema Sul, que era cerca de 80%.

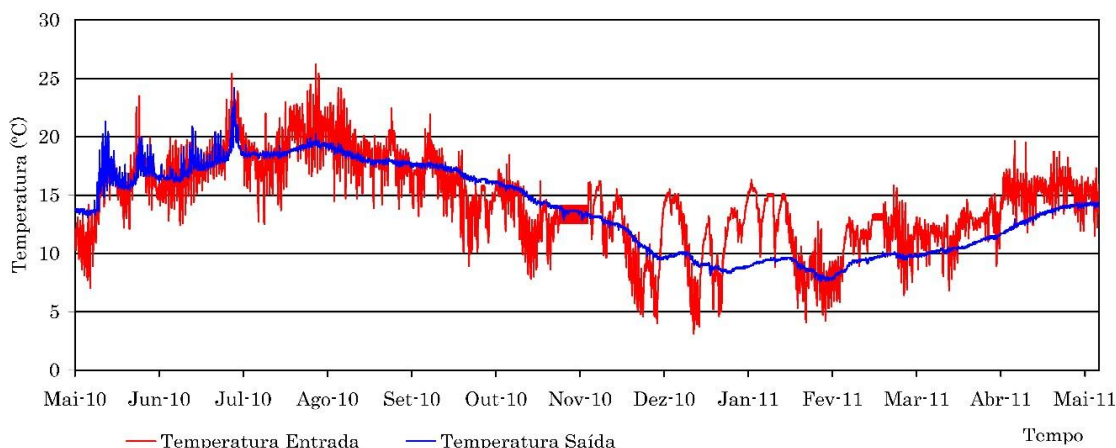


Fig. 3.20 – Flutuação da temperatura à entrada e à saída do subsistema Norte [3]

A temperatura à entrada do subsistema Norte é, em média, superior à registada à saída durante os meses de Verão e inferior durante o período de Inverno, embora tenhamos, pontualmente, períodos onde ocorre um comportamento semelhante ao de Verão.

O desfazamento na temperatura interior à saída do sistema de ventilação, ocorre no subsistema Norte à semelhança do que acontecia no subsistema Sul pelo mesmo motivo, a Inércia térmica.

Tendo registo dos valores de humidade relativa e temperatura, e recorrendo à expressão matemática 3.1, calcula-se a pressão de vapor, representada na figura 3.21.

A pressão de vapor registada nos meses de Verão é benéfica, permitindo a secagem da parede durante alguns períodos de tempo.

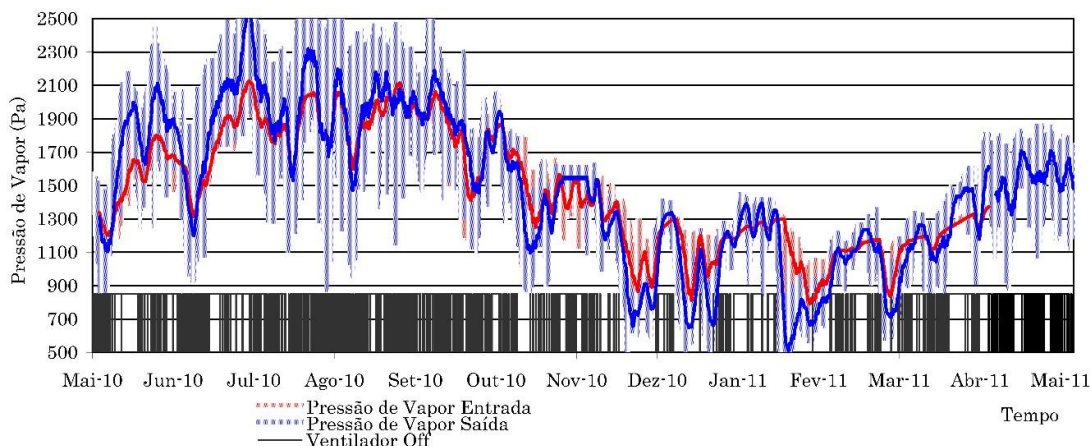


Fig. 3.21 – Flutuação da pressão de vapor e períodos de funcionamento à entrada e à saída do subsistema Norte ao longo do período em análise [3]

O dispositivo de ventilação esteve ligado durante 52% do tempo, com base nos critérios de funcionamento já referidos anteriormente.

Tal como já referido para o subsistema Sul, com os dados da temperatura, ventilação, humidade relativa à entrada e à saída e recorrendo à fórmula matemática representada em 2.2 calcula-se a

quantidade de vapor de água retirada do sistema. Na figura 3.22 pode-se observar os valores da pressão de vapor à saída e à entrada.

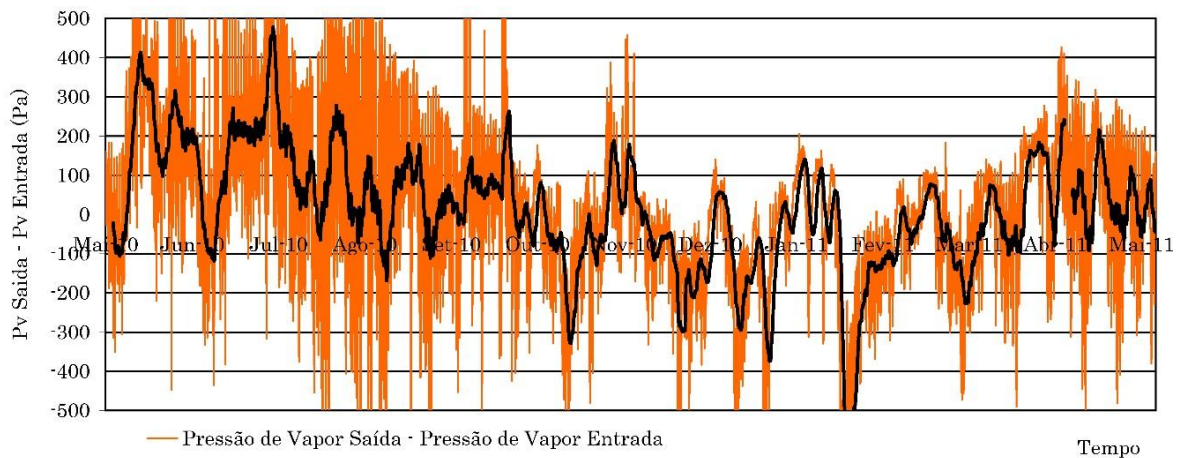


Fig. 3.22 – Diferencial da pressão de vapor à entrada e à saída do subsistema Norte [3]

Verifica-se, a partir da análise deste gráfico, que durante os meses mais quentes o subsistema Norte retirou maior quantidade de vapor de água.

Por fim, apresenta-se o gráfico da quantidade de vapor de água acumulada no subsistema de ventilação Norte (figura 3.23).

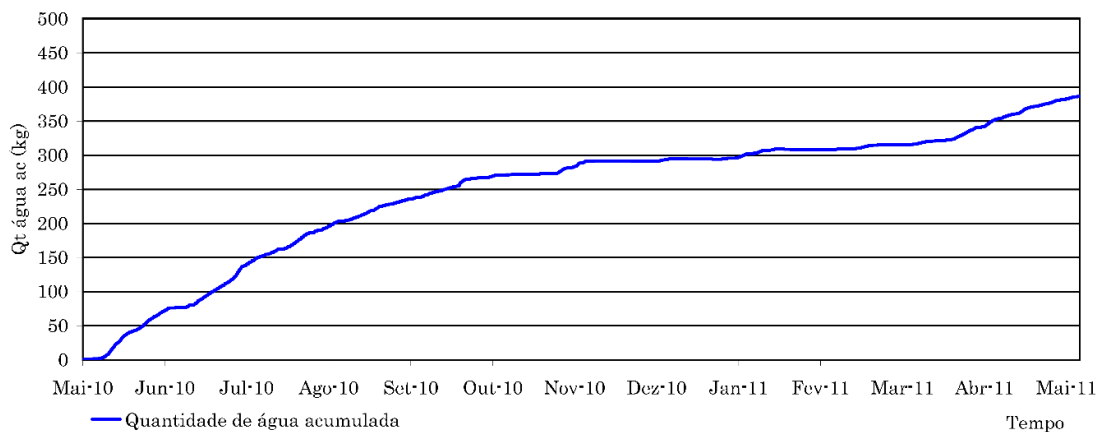


Fig. 3.23 – Quantidade de água retirada no subsistema Norte [3]

Dos valores obtidos de temperatura e humidade relativa, bem como dos valores calculados de diferenças de pressão e ventilação, podemos concluir que no subsistema Norte [3]:

- A humidade relativa à entrada manteve-se com valores médios de 85% durante todo o ano, o que em conjugação com a elevada temperatura do ar admitido gera condensações internas no sistema de ventilação, tal como acontece no subsistema Sul. Apesar de ocorrerem condensações, durante os meses mais quentes, no subsistema Norte o ar é admitido a partir do exterior, assim a pressão de vapor à entrada é mais elevada, existindo por isso, no Verão,

períodos onde temos secagem da parede, o que prova a eficácia do sistema em alguns períodos mais quentes;

- O ar encontra-se próximo da saturação durante grande parte dos meses de Inverno, onde regista valores de humidade relativa média de 95%. Desta forma, mesmo que a temperatura exterior ao sistema seja mais baixa que a temperatura interior, ocorrem condensações, uma vez que, o ar admitido está bastante próximo da saturação;
- Tal como aconteceu no subsistema Sul, os valores de temperatura interior junto à saída do sistema acompanharam os valores medidos de temperatura à entrada do sistema, embora com algum desfasamento. Este registo é explicado pela inércia térmica do sistema;
- O sistema de ventilação mecânico esteve desligado 48% do tempo, o que se deve muito provavelmente à ocorrência de condensações no sistema. Estas ocorrências deram-se tanto no período de Inverno como no período de Verão, explicados por fenómenos já referidos anteriormente;
- O subsistema Norte retirou maior quantidade de água no Verão do que no Inverno;
- O subsistema nunca parou devido à humidade relativa ser inferior a 35% visto que à entrada o valor mínimo da mesma foi cerca de 50%. Com valores de humidade relativa a oscilarem entre os 50% e 100%, podem ter ocorrido cristalizações e/ou dissolução de sais no interior do sistema;
- O subsistema Norte entre Maio de 2010 e Maio de 2011 retirou cerca de 386kg de água.

### 3.5.3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS SUBSISTEMAS NORTE E SUL

Uma análise comparativa dos dois subsistemas permitiu concluir que, o subsistema Sul esteve em constante funcionamento, durante o Inverno, e teve interrupções pontuais nos períodos de Verão e que o subsistema Norte teve interrupções mais aleatórias ao longo de todo o ano. A explicação destas paragens mais distribuídas ao longo do ano, prende-se com o facto do ar admitido no subsistema Norte ser proveniente do exterior da Igreja, o que origina valores de pressão mais variáveis com grande frequência, o que leva a que o ventilador interrompa o seu funcionamento mais vezes.

A partir do gráfico que conjuga a quantidade de água acumulada nos dois sistemas ao longo do ano (figura 3.24), é possível retirar a conclusão que o subsistema Sul tem um funcionamento mais interessante durante o Inverno e o subsistema Norte é mais eficaz durante os meses de Verão [3].

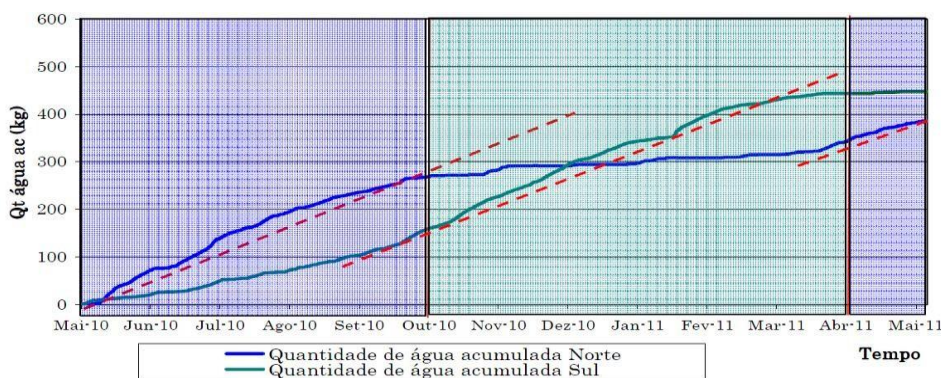


Fig. 3.24 – Quantidade de água retirada pelos subsistemas Norte e Sul e períodos de funcionamento mais favoráveis [3]

Mesmo tendo em conta que poderemos ter água proveniente do terreno, uma vez que, como já foi referido, o sistema é impermeabilizado apenas superiormente, é possível concluir que, a eficácia dos sistemas tem muito a ver com as características do ar admitido. Daí as diferenças de comportamento do subsistema Sul, onde o ar admitido é proveniente do interior, e do subsistema Norte, onde o ar admitido é proveniente do exterior da Igreja.

Este sistema é, portanto, uma tecnologia eficaz, funcional e económica, embora haja bastante por explorar para o tornar ainda mais eficiente.

#### 3.5.4. OTIMIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS

Partindo do princípio que os subsistemas Norte e Sul têm melhores desempenhos sazonalmente, seria interessante explorar a possibilidade de trabalharem alternadamente. Assim, o ideal seria que o subsistema Norte, onde o ar admitido provém do exterior, trabalhasse sobretudo nos meses de Verão e o subsistema Sul, onde o ar admitido provém do interior da Igreja, funciona-se nos meses de Inverno.

A optimização do funcionamento sazonal dos dois subsistemas requer conhecimento do clima de forma a saber quando é ideal parar um subsistema e colocar a funcionar outro. Neste caso em concreto, consideram-se meses de Verão os compreendidos entre Abril e Setembro e meses de Inverno os compreendidos entre Outubro e Março. Para o clima em questão esta solução é interessante, embora haja sempre a possibilidade de afinar estes períodos.

Globalmente, a ideia de optimização do sistema, passa por reduzir os períodos de tempo em que o sistema está parado, devido à ocorrência de condensações no seu interior. O funcionamento do sistema de ventilação permanentemente vai permitir obter resultados mais satisfatórios na evaporação, na retirada da água e consequentemente na secagem da parede.

Partindo deste princípio de funcionamento, onde entre os meses de Abril a Setembro admite-se ar proveniente do exterior e de Outubro a Março admite-se ar do interior, temos os períodos de funcionamento de cada um dos subsistemas representados nas figuras 3.15 e 3.21 para Sul e Norte respectivamente. As diferenças de pressão estão representadas nas figuras 3.16 e 3.22.

Com base no gráfico da figura 3.22 conclui-se que, durante os meses de Verão, ocorrem condensações pontuais em situações onde o sistema de encontra desligado. Esta ocorrência deve-se ao facto do sistema ser aberto e, por isso, quando está a admitir ar do exterior, local onde se verificam oscilações de temperatura e humidade relativa.

Por forma a acabar com as condensações provocadas pelas variações de temperatura e humidade relativa exterior é necessário fechar o sistema, onde este passa a funcionar somente com a ventilação mecânica. Assim, quando se interrompe o funcionamento do sistema mecânico, é garantido que nas condutas não temos caudal a circular.

Na figura 3.23 está representada quantidade de água acumulada no subsistema Norte, no subsistema Sul, e num funcionamento optimizado dos dois sistemas.

É, por isso, possível concluir que, com um funcionamento optimizado o sistema é bastante mais eficaz, retirando quantidades de água bastante superiores do que quando funciona independentemente.

### **3.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO**

Devido aos problemas relacionados com a presença de humidade ascensional em edifícios históricos, surgiu a necessidade de se procurar desenvolver uma técnica que permita combater este tipo de patologias em casos com a especificidade que são os que ocorrem neste tipo de edifícios.

Em edifícios que constituem património nacional e cultural é necessário intervir de forma a não interferir com a estrutura e arquitectura dos mesmos. Outra dificuldade que se encontra, nestes casos, é a elevada espessura das paredes que dificulta o tratamento da humidade ascensional.

Com base nestas necessidades e condicionantes, desenvolveu-se um sistema que passa por ventilar a base das paredes, implementado Freitas, V. P. [34] na Igreja de Vilar de Frades, Barcelos, entre outras.

Guimarães, A. S. [3], após vários anos de estudo na optimização desta técnica de tratamento de humidade ascensional concluiu, na sua tese de Doutoramento realizada para a FEUP e concluída em 2011, que os subsistemas Norte e Sul quando a funcionar sazonalmente reduzem os períodos de interrupção do ventilador. Deste funcionamento mais contínuo do sistema, temos uma evaporação mais significativa o que leva a que seja retirada maior quantidade de água.

# 4

## OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES-HUMIVENT

### 4.1. INTRODUÇÃO

O sistema de ventilação da base das paredes aplicado na Igreja em estudo, passou por várias fases de aperfeiçoamento do seu funcionamento. Desde a última alteração foram registados dados com intervalos de 15 min com início a 10 de Maio de 2010 com registos até 13 de Dezembro de 2013. Os registos realizaram-se através de *data-loggers* ligados a quatro sensores de temperatura e humidade relativa em cada um dos dois subsistemas. No subsistema Sul foram registados os valores de temperatura e humidade relativa à entrada e à saída do sistema, bem como no subsistema Norte. De forma a facilitar o tratamento dos resultados obtidos, o trabalho desenvolvido realizou-se a partir de valores registados com intervalos de uma hora. Os valores espaçados de uma hora foram obtidos através do cálculo do valor médio dos quatro registos nessa mesma hora. A figura 4.1 representa um *data-logger* para registo de dados.



Fig. 4.1 – *Data-logger* para registo de dados

Nesta análise pretende-se otimizar o funcionamento do sistema com base nos valores de humidade relativa e temperatura registados nas sondas instaladas. Com o objectivo de reduzir os períodos de paragem do sistema, estudou-se uma solução que permite que, sempre que o ventilador de um dos dois subsistemas Norte ou Sul pare devido a diferenças de pressão desfavoráveis no seu interior, a admissão do ar seja no outro ambiente sempre que deste advenham condições que permitam reatar o

funcionamento do ventilador, ou seja, se o ar admitido do interior (subsistema Sul) em determinados períodos de tempo promover condensações procura-se avaliar se há vantagem de, durante esse período, admitir ar proveniente do ambiente exterior. O mesmo será válido para o subsistema Norte.

No trabalho de optimização desenvolvido em 2007 na Dissertação de Mestrado realizada por Guimarães A.S., concluiu-se haver necessidade de ajustar os critérios de funcionamento do sistema [2]. Assim, procurou-se alterar o funcionamento do sistema, dotando-o de maior eficácia, assim de Abril a Setembro os subsistemas deverão admitir ar proveniente do exterior, e de Outubro a Março deverão admitir ar proveniente do interior. Esta alteração permitiu reduzir os períodos de interrupção de funcionamento do sistema, onde poderão ocorrer condensações no seu interior.

Desta forma, o funcionamento dos sistemas deverá ser mais contínuo e permanente, o que resulta numa maior quantidade de água retirada do sistema e melhores condições de evaporação.

Com base neste princípio de funcionamento obtiveram-se valores de temperatura e humidade relativa dos dois subsistemas que servirão de base para desenvolver um novo estudo de optimização. De forma, a reduzir os períodos de interrupção de funcionamento do sistema, foram analisadas quatro novas hipóteses para funcionamento de cada um dos subsistemas. No presente capítulo pretende-se, a partir dos dados existentes, testar a eficácia de três propostas para o funcionamento dos dois subsistemas. Estas propostas baseiam-se num princípio de funcionamento base que se prende com a possibilidade de determinado subsistema de ventilação poder admitir ar de outro ambiente (interior ou exterior) segundo determinados critérios que irão ser apresentados no presente Capítulo. O critério que servirá de base às possibilidades de funcionamento está relacionado com a possibilidade de determinado subsistema quando verificar uma diferença de pressão de vapor à saída e à entrada negativa, alternar o local de admissão de ar. Assim, seriam reduzidos os períodos em que o ventilador desse sistema estaria desligado, o que permitiria à partida obter um desempenho mais eficaz do subsistema.

Os registos dos valores de temperatura e humidade relativa, bem como os cálculos, foram realizados em programa Excel. Devido à falha de alguns registos, foi necessário completar os mesmos. Este problema verificou-se somente no subsistema Sul, e afetou cerca de 15 registos, optando-se por completar os valores em falta com valores iguais ao do último registo imediatamente antes da paragem.

#### 4.2. CARACTERÍSTICAS DOS SUBSISTEMAS

Apresenta-se no seguinte quadro 4.1 uma síntese das principais características dos dois subsistemas de ventilação, que terão influência nos resultados obtidos.

Quadro 4.1 – Principais características dos subsistemas Norte e Sul [13]

	Norte	Sul
<b>Comprimento</b>	130 m	70 m
<b>Orientação</b>	60% Norte / 40% Este	100% Sul
<b>Entrada de ar</b>	Exterior / Este	Interior / Sul
<b>Saída de ar</b>	Exterior / Oeste	Exterior / Sul
<b>Diâmetro da conduta</b>	200 mm	200 mm

### 4.3. QUANTIDADE DE ÁGUA RETIRADA PELOS SUBSISTEMAS

A quantidade de água retirada do sistema foi calculada recorrendo à expressão matemática apresentada em 4.1. Os valores de humidade relativa e a temperatura de entrada e saída necessárias para o cálculo foram retiradas do equipamento de registo e obtidos a partir de sondas instaladas no sistema, tal como já foi referido no capítulo 2 da presente dissertação.

$$w = 0,002167 \times \left( \frac{P_s}{273 + \theta_s} - \frac{P_e}{273 + \theta_e} \right) \times Q \times \Delta t \quad (4.1)$$

onde:

- $w$  – quantidade de água retirada pelo sistema (kg);
- $P_s$  – pressão de vapor à saída do sistema (Pa);
- $P_e$  – pressão de vapor à entrada do sistema (Pa);
- $\theta_s$  – temperatura à saída do sistema (°C);
- $\theta_e$  – temperatura à entrada do sistema (°C);
- $Q$  – caudal de ventilação (m<sup>3</sup>/s);
- $\Delta t$  – intervalo de tempo (s).

### 4.4. PRESSÃO DE VAPOR À ENTRADA E À SAÍDA DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO

#### 4.4.1 EXPRESSÃO MATEMÁTICA PARA O CÁLCULO DA PRESSÃO DE VAPOR

O valor da pressão de vapor à entrada e à saída necessários para o cálculo da água retirada do sistema (4.1) é calculado recorrendo à expressão 4.2.

$$p = 611 * e^{\left( \frac{-17,08 * \theta}{234,18 + \theta} \right)} \times HR \quad (4.2)$$

onde:

- $p$  – Pressão de vapor de água (Pa);
- $\theta$  – Temperatura (°C);
- $HR$  – Humidade relativa (-).

#### 4.4.2. POSSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE CONDENSAÇÕES

Após o cálculo da pressão de vapor à entrada e à saída do sistema de ventilação com recurso às expressões 4.1 e 4.2, calcula-se a diferença de pressão à saída e à entrada  $\Delta P$ . Caso o valor de  $\Delta P$  seja negativo, ou seja, a pressão de entrada seja superior à pressão de saída, ocorrerão condensações no canal de ventilação. A ocorrência destas condensações prejudica o desempenho dos subsistemas de ventilação, pelo que, o objetivo passará por reduzir ao máximo a sua ocorrência.

O gráfico da figura 4.2 representa a pressão de vapor à entrada e à saída no subsistema Sul para meados de Junho. Constata-se que em vários períodos ocorrem condensações, que correspondem a

períodos de tempo onde o gráfico da pressão de vapor de entrada (linha azul) tem valores mais elevados que a pressão de saída (linha vermelha).

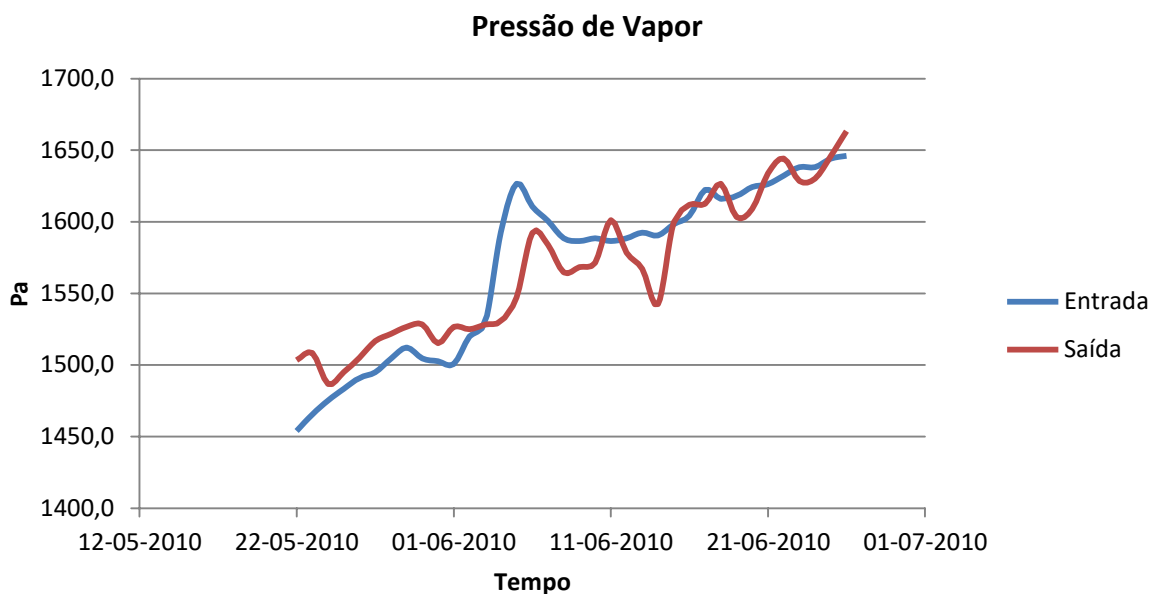


Fig. 4.2 – Exemplo de períodos de tempo onde ocorrem condensações

#### 4.5. PERÍODOS DE FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS

Tal como se pode observar no quadro 4.1 os subsistemas Norte e Sul apresentam características distintas o que explica que tenham desempenhos bastante diferentes. Na figura 4.3 estão representados os valores das diferenças de pressão de vapor  $\Delta P$  dos subsistemas Norte e Sul, onde se constata que o subsistema Sul está durante mais tempo em funcionamento que o subsistema Norte, ou seja, a diferença de pressão  $\Delta P$  ( $P_s - P_e$ ) assume durante mais tempo valores negativos no subsistema Norte que no subsistema Sul.

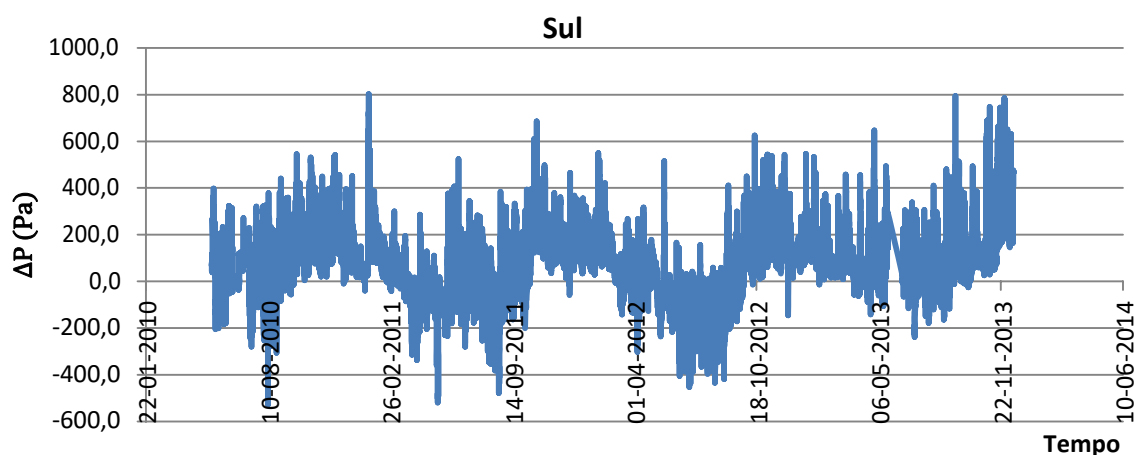


Fig. 4.3 – Valores de diferença de pressão  $\Delta P$  para o subsistema Sul

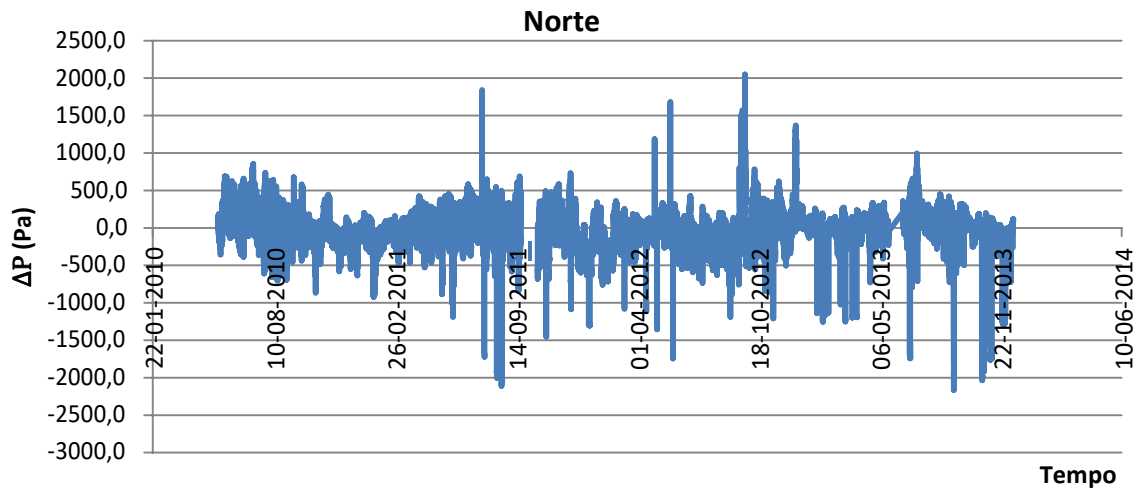


Fig. 4.4 – Valores de diferença de pressão  $\Delta P$  para o subsistema Norte

Após análise dos dados, conclui-se que durante o período em estudo, entre 10 de Maio de 2010 e 13 de Dezembro de 2013, o subsistema de ventilação Sul encontra-se em funcionamento em 77% do tempo, e o subsistema Norte encontra-se em funcionamento cerca de 48% do tempo.

Desta forma, concluiu-se que é possível otimizar o funcionamento destes subsistemas, aumentando a sua eficácia e reduzindo os períodos de tempo em que os subsistemas não estariam em funcionamento.

#### 4.6. OTIMIZAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS

Tal como referido no subcapítulo 4.2, o objectivo passará pela apresentação de quatro possibilidades de funcionamento para cada sistema de ventilação da base das paredes. Pretende-se considerar que sempre que se registem diferenças de pressão entre a entrada e a saída negativas, se admite ar de outra ambiência, ou então deixa-se de ventilar, dependendo dos critérios de funcionamento. Assim, espera-se ser possível reduzir os tempos de paragem dos subsistemas de ventilação da base das paredes, permitindo acumular maior quantidade de água proveniente das paredes do edifício.

Caso um determinado subsistema não esteja em funcionamento por não estarem reunidas condições favoráveis de secagem, este subsistema admitirá ar proveniente de outra ambiência, sendo assim necessário calcular as novas pressões de saída com estes novos ajustes, por forma a ser possível quantificar a “nova” quantidade de água retirada.

A pressão de saída depende, naturalmente, da pressão de entrada, do comprimento da conduta entre outras variáveis e foi calculada com recurso à expressão 4.3.

$$p_s = p_e + \frac{Dm}{Q} h_s (p^* - p_e) \left[ \frac{2}{\pi} \left( \frac{u \times L}{Dm} \right)^{1/4} + \frac{4}{\pi} \left( \frac{u \times L}{Dm} \right) \right]^{1/2} \quad (4.3)$$

onde:

$p_s$  – Pressão de vapor à saída do sistema (Pa);

$p_e$  – Pressão de vapor à entrada do sistema (Pa);

$Dm$  – Coeficiente de difusão molecular ( $m^2/s$ );

$Q$  – Caudal de ventilação ( $m^3/s$ );

$h_s$  – Altura do canal em contacto com a parede (m);

$p^*$  – Pressão parcial de vapor de água na superfície da parede (Pa);

$u$  – Velocidade de circulação do ar no canal (m/s);

$L$  – Comprimento do canal (m).

$$Dm = 2,23 * 10^{-5} \left( \frac{T+273,15}{273,15} \right)^{1/5} \quad (4.4)$$

onde:

$Dm$  – Coeficiente de difusão molecular ( $m^2/s$ );

$\theta$  – Temperatura ( $^{\circ}C$ ).

Nota: na realização do cálculo considerou-se  $\theta = 20^{\circ}C$ , portanto  $Dm = 2,5 * 10^{-5} m^2/s$ .

$$p^* = 611 \times e^{\left( \frac{17,08 \times \theta}{234,18 + \theta} \right)} \times HR \quad (4.5)$$

onde:

$p^*$  – Pressão de vapor de água na superfície da parede (Pa);

$\theta$  – Temperatura ( $^{\circ}C$ );

$HR$  – Humidade relativa (-).

Nota: na realização dos cálculos considerou-se  $HR=1$ , para uma parede saturada.

As expressões foram obtidas considerando um canal com secção rectangular tal como se pode observar na figura 4.5. Considera-se a altura  $h_s$  como a altura do canal que está em contacto com a parede.

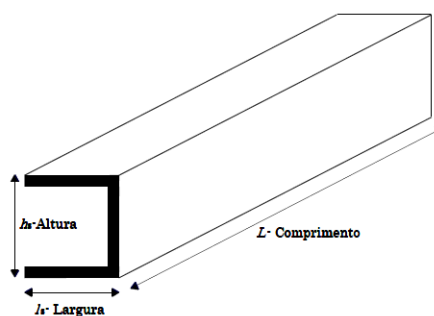


Fig. 4.5. – Canal de ventilação de secção rectangular [3]

No caso aqui estudado, a ventilação dos sistemas decorre do recurso a uma manilha perfurada com seção circular (figura 4.6). Assim, foi necessário converter a altura  $h_s$  num valor que dependerá da percentagem de furação da manilha. Conforme foi possível constatar em alguns catálogos deste tipo de produtos a percentagem de furação deverá ser de 6% do perímetro por metro de comprimento. Sabendo que, como avaliado anteriormente, a manilha aplicada tem 200 mm de diâmetro, obteve-se o respectivo perímetro. Desta forma, calcula-se o valor de  $h_s$ , multiplicando-se o perímetro pelo comprimento da conduta e pela percentagem de perfuração, 6%, para qualquer uma das manilhas dos dois subsistemas.

Para o cálculo da quantidade de água retirada pelo sistema, é necessário saber qual o caudal de ventilação. Partindo da expressão matemática 4.6, é possível obter o caudal de ventilação.

$$Q=U*S \quad (4.6)$$

onde:

$Q$ – Caudal de ventilação ( $m^3/s$ );

$U$ – Velocidade (m/s);

$S$ – Secção do canal de ventilação ( $m^2$ ).

O valor da seção  $S$  do canal de ventilação é calculável através da fórmula matemática da área da seção circular  $\pi * R^2$ , onde  $R$  representa o raio da seção. A velocidade de ventilação utilizada foi de 0,631 m/s. Desta forma, com uma seção de diâmetro 200 mm e velocidade de ventilação de 0,631 obteve-se a um caudal  $Q$  de 0,0198  $m^3/s$ .

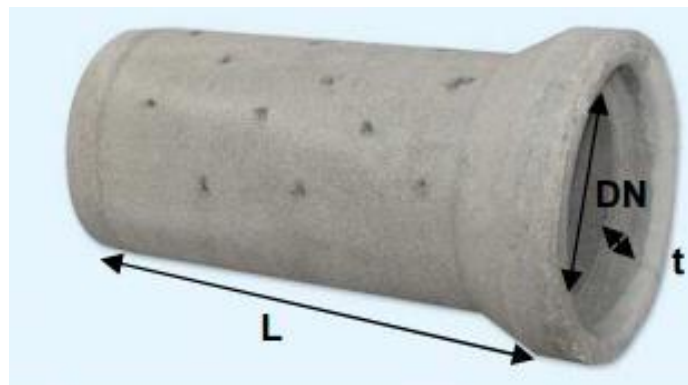


Fig. 4.6. – Manilha perfurada [35]

Com a aplicação das expressões matemáticas neste subcapítulo apresentadas, chega-se a todos os dados necessários para calcular a quantidade de água retirada no subsistema.

Como já referido anteriormente a otimização do sistema de ventilação da base das paredes passou pelo estudo de quatro alternativas que estão designadas por hipóteses de otimização A, B, C e D.

O princípio de funcionamento das alternativas desenvolvidas passa pela capacidade de determinado subsistema, Norte ou Sul, admitir ar numa ambiência, interior ou exterior, que não estava inicialmente

prevista no princípio de funcionamento original do subsistema. Assim, dependendo de determinados critérios, os subsistemas têm capacidade de a dada altura alternar a admissão de ar no interior ou no exterior conforme seja mais vantajoso. Na figura 4.7 apresenta-se uma ilustração daquilo que poderá ser um subsistema de ventilação com capacidade de admitir ar no interior ou no exterior.

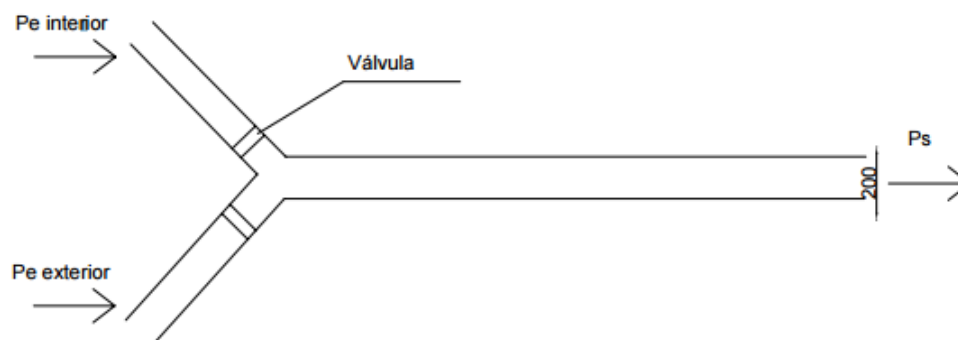


Fig. 4.7. – Exemplo de um subsistema de ventilação com possibilidade de admissão de ar do interior ou do exterior visto em planta

#### 4.6.1. HIPÓTESE A

O princípio de funcionamento é admitir ar de outra ambiência caso a diferença de pressão de vapor de água entre a saída e a entrada,  $\Delta P$  se apresentar negativa, ou seja, caso a pressão de saída seja menor de que a pressão de entrada.

Assim, caso a diferença de pressão  $\Delta P$  seja positiva o sistema funciona normalmente, o subsistema Norte admite ar do exterior do edifício e o subsistema Sul do interior. Caso este valor seja negativo, o sistema recruta ar na outra ambiência independentemente de este ter para aquele instante uma diferença de pressão positiva ou negativa. Desta forma, implementado este sistema de ventilação, o sistema nunca pára, apesar de em determinados períodos o ventilador funcionar com valores de diferença de pressão  $\Delta P$  negativos. Na figura 4.8 mostra-se o esquema de funcionamento para a hipótese A.

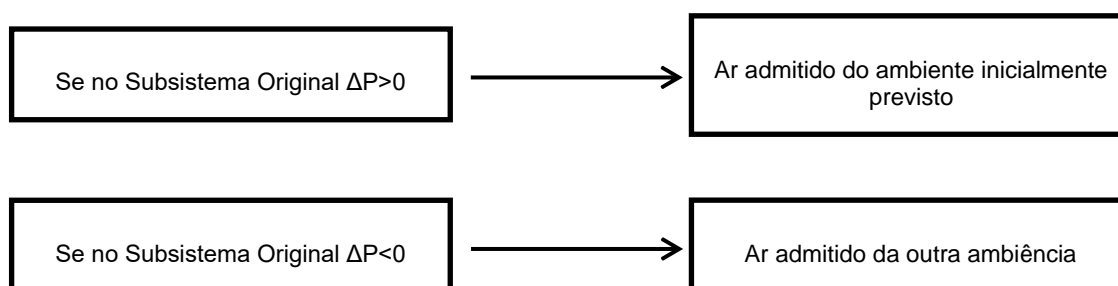


Fig. 4.8. – Esquema de funcionamento dos subsistemas para a hipótese A

#### 4.6.2. HIPÓTESE B

Esta hipótese assemelha-se à anterior, no entanto, quando o ar admitido no interior ou no exterior apresentem diferenças de pressão negativas, o sistema de ventilação recorre ao ambiente que tenha valores de diferença de pressão  $\Delta P$  “menos negativo” ou seja mais próximo de zero.

Esta hipótese constitui uma melhoria em relação à anterior no sentido em que embora semelhante, caso a diferença de pressão no sistema original se apresente negativa, o subsistema admite ar da ambiência que prejudique menos o processo de secagem da parede, ou seja, onde a diferença de pressão seja maior. O funcionamento do subsistema segundo esta hipótese, é permanente, ou seja, nesta base o ventilador nunca pára. Na figura 4.9 mostra-se o esquema de funcionamento para a hipótese de funcionamento B.

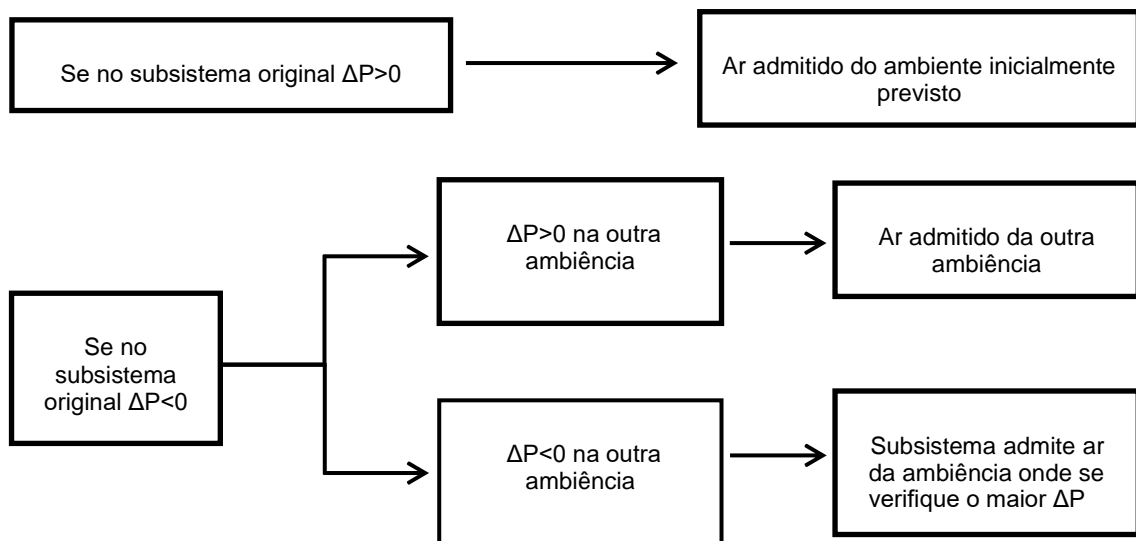


Fig. 4.9. – Esquema de funcionamento dos subsistemas para a hipótese B

#### 4.6.3 HIPÓTESE C

Caso a diferença de pressão  $\Delta P$  seja positiva o ar é admitido do ambiente inicialmente previsto, a Norte do exterior e a Sul do interior. Caso a diferença de pressão seja negativa o subsistema admite ar na outra ambiência caso nesta ambiência se verifique uma diferença de pressão  $\Delta P$  positiva. No caso de na ambiência alternativa se registre uma diferença de pressão negativa, o ventilador interrompe o seu funcionamento, anulando assim um possível contributo negativo, no caso de ambos os ambientes registarem diferenças de pressão negativas. Esta hipótese de funcionamento tem o inconveniente de alternar entre modo on/off, o que trará um desgaste adicional ao sistema e maiores custos de energia. Apresenta-se na figura 4.10 o esquema de funcionamento desta hipótese C.

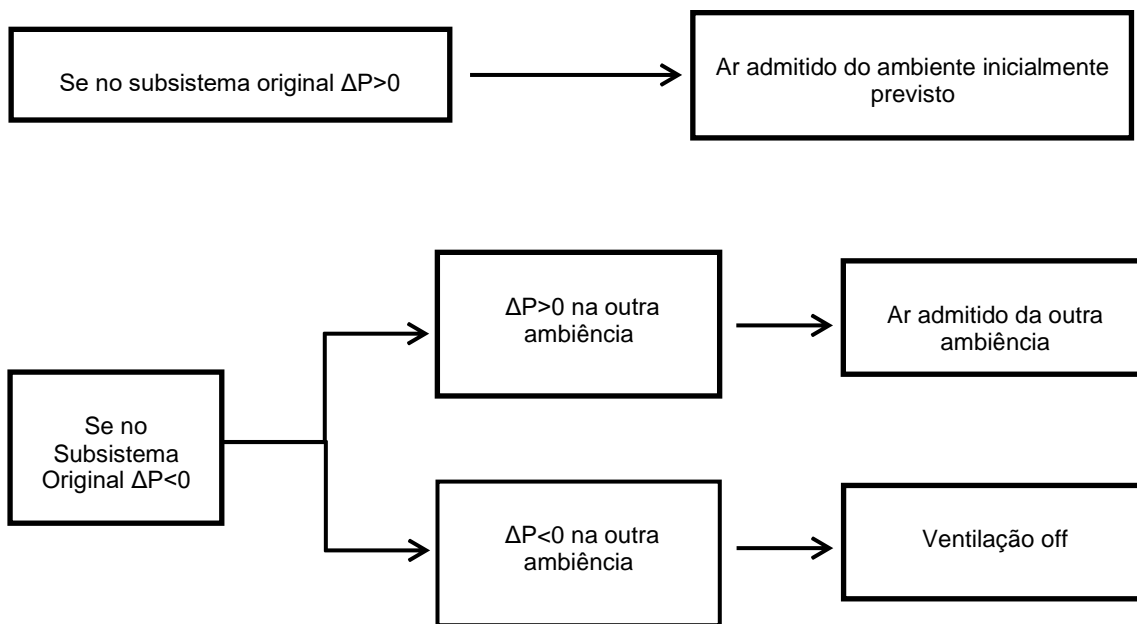


Fig. 4.10. – Esquema de funcionamento dos subsistemas para a hipótese C

#### 4.6.4 HIPÓTESE D

O princípio de funcionamento da última alternativa de funcionamento é igual ao da hipótese A com a diferença de no caso de, para determinado momento, os dois ambientes (interior e exterior) registarem valores de pressão de vapor de água  $\Delta P$  positivos, admite-se ar daquele que permitir retirar maior quantidade de água, ou seja, o que registar valores de pressão mais elevados.

Este tipo de funcionamento irá gerar um maior número de alternâncias no funcionamento do ventilador, o que trará maiores custos de manutenção e operação, mas deverá ser o mais eficaz das quatro alternativas apresentadas. O esquema de funcionamento desta hipótese está representado na figura 4.11.

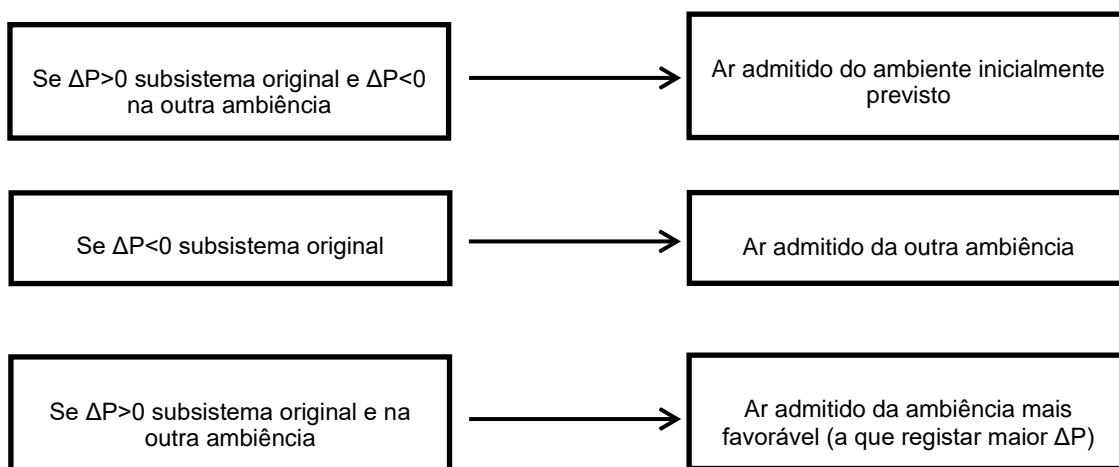


Fig. 4.11. – Esquema de funcionamento dos subsistemas para a hipótese D

#### 4.7. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Estas quatro soluções foram testadas, para os cerca de 30000 registos de temperatura e humidade relativa para cada um dos subsistemas, espaçados de uma hora compreendidos entre 10-05-2010 e 13-12-2013. Há a realçar uma falha nos registos que compreendeu o período entre 21-05-2013 e 14-06-2013, como tal os cálculos foram realizados sem contabilizar este período de tempo. Esta falha é traduzida em alguns gráficos onde, para este período de tempo, não há informação a apresentar.

Os resultados que irão ser apresentados deverão ser interpretados com alguma razoabilidade não sendo possível garantir qual o nível de exatidão dos mesmos. Sabe-se que estarão relativamente próximos dos que seria possível obter em situação real, mas não contemplam, por exemplo, as perdas derivadas das condensações que, inevitavelmente ocorrem nas paredes da manilha.

Parte-se do princípio que a manilha perfurada tem diâmetro suficiente para que o escoamento não entre em contacto com as paredes do canal, mas na realidade estamos perante uma manilha de 200mm de diâmetro, dimensão que originará algumas perdas de escoamento nas paredes da manilha impossíveis de quantificar. O corte da figura 4.12 pretende mostrar a localização da manilha perfurada relativamente à parede e os fluxos de vapor que ocorrerão ao longo do canal.

É importante ter em conta que no estudo realizado parte-se do princípio que nos canais circula somente ar devido à ventilação mecânica, mas é necessário ter em conta que as condutas não são estanques portanto, tem-se sempre alguma ventilação natural que não será quantificada.

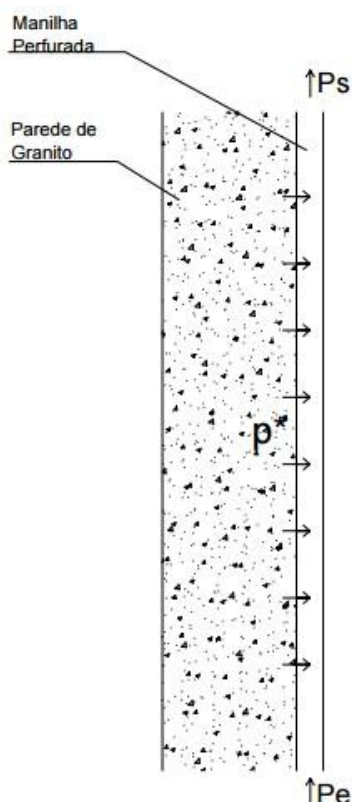


Fig. 4.12. – Exemplo de possível corte longitudinal de uma seção do subsistema de ventilação com representação dos fluxos de vapor de água

#### 4.7.1. SUBSISTEMA NORTE

Com base nos registos da temperatura e humidade relativa fornecidos e recorrendo à expressão matemática 4.1 para o cálculo da quantidade da água acumulada pelo sistema, apresenta-se na figura 4.13 os registos horários da temperatura de entrada do subsistema Norte e a evolução da quantidade de água retirada aplicando as hipóteses referidas no subcapítulo anterior.

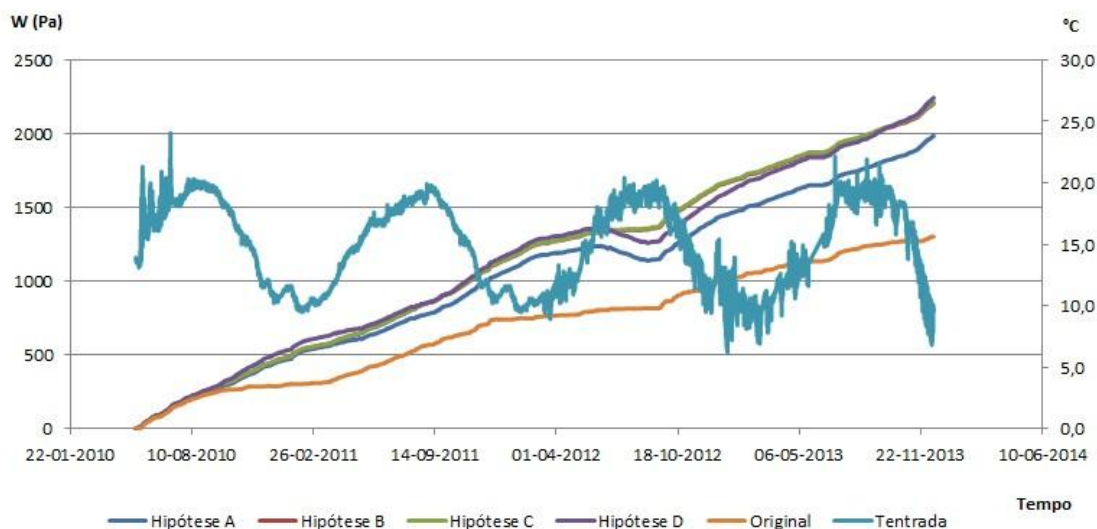


Fig. 4.13 – Variação da temperatura à entrada e quantidade de água acumulada no subsistema de ventilação Norte

Analisando a figura 4.13 verifica-se, para a hipótese original, existe uma relação entre a temperatura à entrada do subsistema Norte e a quantidade de água retirada. Nos períodos onde a temperatura é mais elevada é quando a curva da hipótese original tem maior declive, ou seja, quando o sistema retira maior quantidade de água. Esta maior capacidade do subsistema coincide com os períodos de verão.

O facto de no período de verão a temperatura da conduta apresentar-se inferior à temperatura registada no interior da igreja, aumentando a possibilidade de ocorrência de condensação o que faz com que o sistema tenha várias interrupções no seu funcionamento.

No que toca às várias hipóteses testadas, verifica-se um comportamento próximo no que diz respeito à quantidade de água retirada. Ao longo dos quase 4 anos de registos analisados a evolução da quantidade de água retirada é aproximadamente diretamente proporcional, ou seja, o comportamento das curvas aproxima-se ao de uma reta, com exceção de um período de tempo onde se acumulou menos água que o habitual que coincidiu com o período de verão do ano de 2012 mais evidente nas hipóteses A e D.

A existência de menos períodos onde temos baixa capacidade de acumular água explica-se pelo facto de, em todas estas hipóteses, o subsistema ter capacidade de alternar o seu funcionamento, o que permite nos períodos mais desfavoráveis para o subsistema Norte este admitir ar no interior.

Quando aplicadas ao subsistema Norte as hipóteses testadas traduzem um aumento de eficácia de funcionamento do subsistema de 60% para a hipótese A e cerca de 80% para as hipóteses B,C e D. A quantidade de água retirada apresenta um mínimo de 1222 kg para o original e 2216 kg para a hipótese D, a que retira maior quantidade de água.

Na figura 4.14 apresenta-se a quantidade de vapor de água retirado do subsistema de ventilação Norte para as diferentes hipóteses bem como os valores de humidade relativa registados à entrada do subsistema de ventilação.

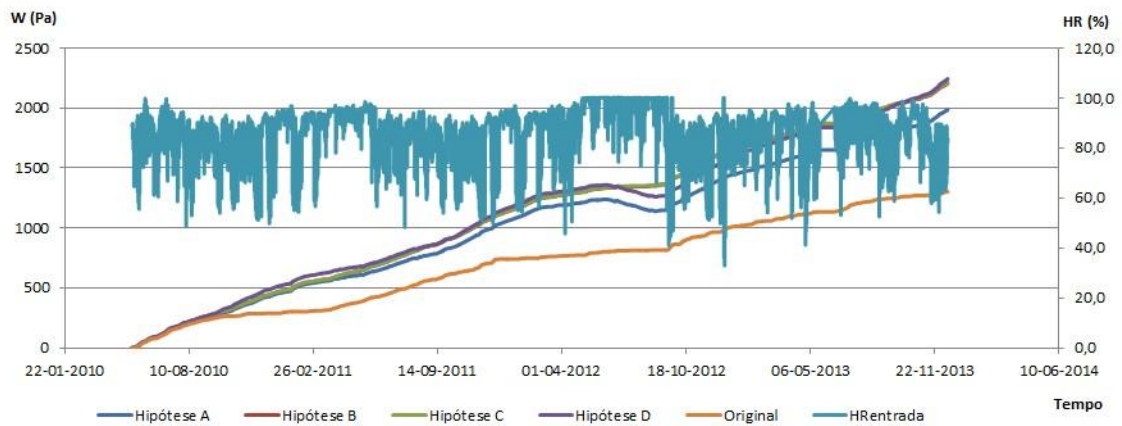


Fig. 4.14 – Variação da humidade relativa à entrada e quantidade de água acumulada no subsistema de ventilação Norte

O subsistema Norte apresenta grandes variações de humidade relativa à entrada do sistema. A explicação para o referido prende-se com o facto de, para o subsistema Sul, a admissão ser feita no interior da Igreja, tendo esta um fator moderador sobre os picos de humidade relativa que se fazem sentir mais no exterior. Nos meses de inverno é quando se registam valores de humidade relativa mais elevados, e, em geral, quando se retira menor quantidade de vapor de água para o tipo de funcionamento original, notando-se este facto para o funcionamento original.

Tal como referida na análise anterior, as quatro hipóteses de otimização capacitam o sistema para retirar água com maior constância ao longo de todo o ano. Assim, nestes casos, o funcionamento do sistema é menos influenciável pelas variações de humidade relativa registados ao longo do ano. Para o subsistema Norte o valor médio de humidade relativa de entrada registado ao longo do tempo em estudo foi de 86%.

No subsistema Norte, na versão de funcionamento higrorregulável do sistema, obtiveram-se valores de quantidade de água retirada da ordem dos 1300 kg para um período de funcionamento de cerca de 51%. Assim, com este funcionamento, durante cerca de metade do período em análise o sistema de ventilação encontra-se desligado. A figura 4.15 mostra a variação da pressão de entrada e saída e consequentemente os instantes em que o ventilador está a funcionar.

Desta forma, torna-se bastante vantajoso a aplicação de um sistema como este que permite quando a diferença de pressão de vapor de água  $\Delta P$  verificada no subsistema Norte é negativa, admitir ar do interior independentemente desta alternativa verificar um  $\Delta P$  positivo ou negativo, ou seja, favorável ou desfavorável para o funcionamento do sistema (ver figura 4.8). Este é o princípio base de funcionamento para a hipótese A.

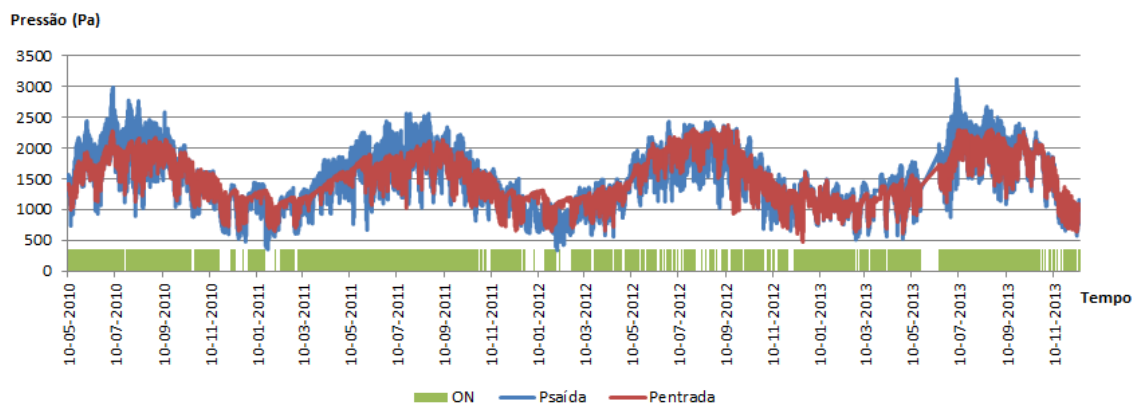


Fig. 4.15 – Períodos de funcionamento para o subsistema Norte

Aplicada esta hipótese no subsistema de ventilação Norte, este mesmo sistema vai estar a contribuir 51% do tempo em estudo, onde 49% do tempo irá ser admitido ar proveniente do interior. Consta-se desta forma uma grande contribuição da ambiência alternativa no funcionamento desta hipótese, traduzida numa melhoria na ordem dos 60% no que toca à quantidade de vapor de água acumulada, que atinge um total de 1973 kg.

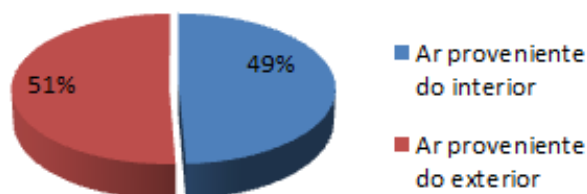


Fig. 4.16 – Distribuição temporal de funcionamento para a hipótese A no subsistema Norte

Na hipótese de funcionamento B, o sistema tem capacidade para trabalhar com o ambiente que apresente a menor das pressões negativas, ao contrário da hipótese A que para diferenças de pressão negativas o subsistema passa a admitir ar do ambiente que não estava inicialmente previsto independentemente do valor das pressões que ocorrem no mesmo para esse instante (ver figura 4.9).

Assim, os valores de quantidade de água retirada pelo subsistema são um pouco mais elevados e a distribuição temporal é a representada na figura 4.16. O aumento da eficácia é de cerca de 80% relativamente ao subsistema original o que se traduz numa quantidade de água retirada pelo subsistema de 2194 kg.

Comparando o gráfico da figura 4.16 e 4.17 pode concluir-se que o subsistema original, no caso de se verificarem diferenças de pressão negativas, é menos gravoso para o desempenho do subsistema que quando admitimos ar da ambiência alternativa. Tanto nesta hipótese B como na anterior considera-se que não há interrupção de funcionamento do sistema de ventilação.

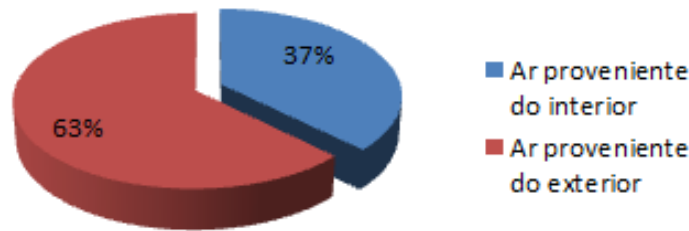


Fig. 4.17 – Distribuição temporal de funcionamento para a hipótese B no subsistema Norte

A hipótese de funcionamento C permitiu, para o período em estudo, retirar cerca de 2201 kg de vapor de água, o que corresponde a um aumento de 80,17% relativamente ao sistema de funcionamento original. Estes valores revelaram-se muito próximos dos obtidos anteriormente na hipótese B, o que devido às regras de funcionamento das duas hipóteses, permite concluir que a menor das pressões negativas verificadas nas duas ambiências são bastante próximas de zero e ocorrem com muito pouca frequência ao longo do período em estudo.

Apresentam-se dois gráficos (figura 4.18 e 4.19) que representam os períodos de tempo em que o sistema de ventilação está ativo e a percentagem global de funcionamento, repetidamente.

A figura 4.18 apresenta algumas limitações devido ao facto de não serem perceptíveis alguns períodos de ventilação OFF, por não ser possível colocar no espaço disponível um gráfico mais pormenorizado. Ainda assim, comparativamente com o gráfico da figura 4.15, é perceptível que este experimenta bastante menos interrupções no funcionamento.

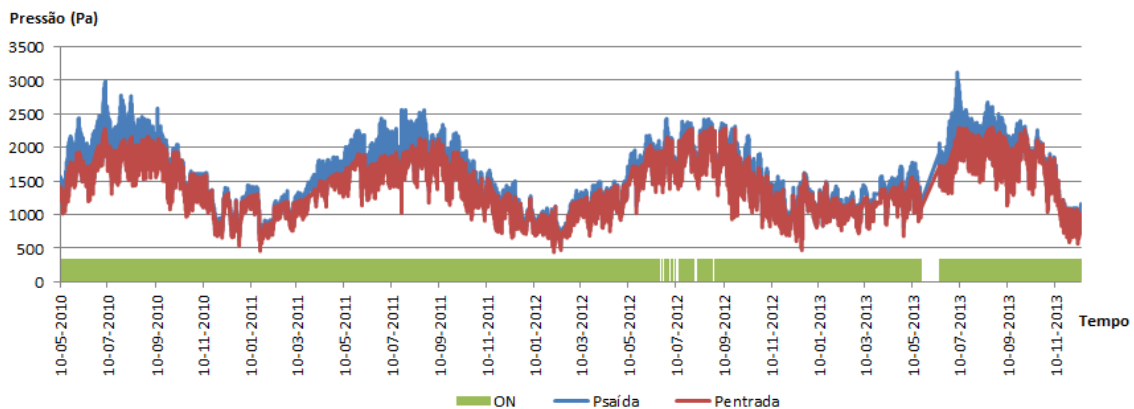


Fig. 4.18 – Períodos de funcionamento do subsistema de ventilação para a hipótese C

Tendo em conta que o funcionamento desta hipótese é do tipo ON/OFF, procurou-se avaliar o desempenho deste sistema com base nos períodos de tempo em funcionamento, sabendo que dentro do período de tempo “ON” parte admitirá ar do ambiente inicialmente previsto, parte do ambiente alternativo, tal como acontece nas hipóteses A, B e como veremos na hipótese D.

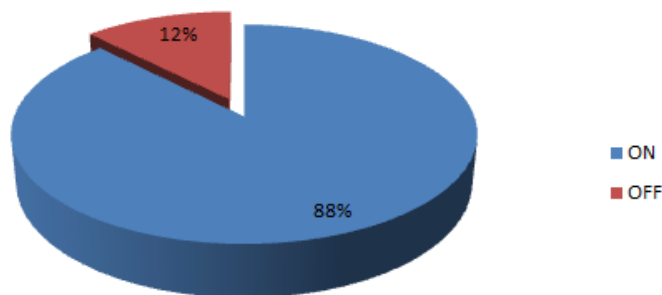


Fig. 4.19 – Percentagem de funcionamento do subsistema de ventilação Norte para a hipótese de C

Com base nos registos obtidos e aplicando esta hipótese o subsistema de ventilação está ativo 88% do tempo em análise. Este funcionamento traz, neste caso, melhorias bastante residuais quando comparado com, por exemplo o subsistema B, o que torna fundamental a realização de um estudo económico com base nos gastos de energia e manutenção do sistema de ventilação para o caso do funcionamento permanente (hipótese B) e um funcionamento com interrupções (hipótese C). Factos como o número de vezes ligado/desligado, custo da energia são variáveis a ter em conta para conclusões ainda mais fiáveis.

A hipótese D é a última hipótese a ser analisada para o subsistema Norte, sendo também a que apresentou melhores resultados. O seu funcionamento encontra-se esquematizado na figura 4.11, tendo por base o funcionamento da hipótese B com a diferença que no caso de se estar perante um instante onde se registam diferenças de pressão de vapor de água  $\Delta P$  positivas nos dois ambientes, o sistema irá trabalhar com o mais vantajoso, ou seja, com o que tiver maior valor de  $\Delta P$ .

Esta articulação do sistema traz melhorias quanto à eficácia de funcionamento, onde a melhoria relativamente ao sistema original é de 81,4%, o que significa que se retiram cerca de 2216 kg de vapor de água do subsistema Norte.

A figura 4.20 ilustra a distribuição percentual da admissão de ar para o subsistema de ventilação Norte. Destaque para a percentagem favorável à admissão de ar proveniente do interior, ao contrário daquilo que se constatou nas outras hipóteses de funcionamento para o subsistema de ventilação Norte. Assim podemos concluir que para o subsistema de ventilação Norte, aplicando as condições de funcionamento desta hipótese (figura 4.11), a admissão de ar proveniente do interior é o que apresenta valores de pressão  $\Delta P$  mais elevados e por isso mais favoráveis à retirada de água do canal. Na possibilidade de trabalhar com o valor de pressão mais alto e consequentemente, favorável, a admissão de ar alternativa (interior) está em funcionamento 68% do tempo em análise.

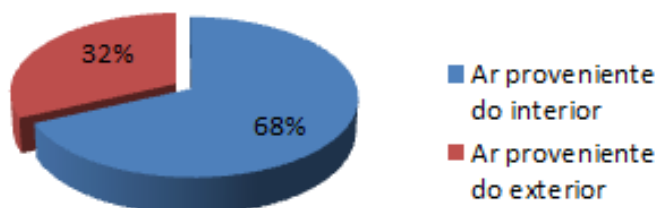


Fig. 4.20 – Percentagem de funcionamento do subsistema Norte para a hipótese D

A figura 4.21 representa um gráfico que mostra a quantidade de vapor de água retirada do subsistema Norte para as diferentes hipóteses com a respectiva contribuição do subsistema otimizado Sul.

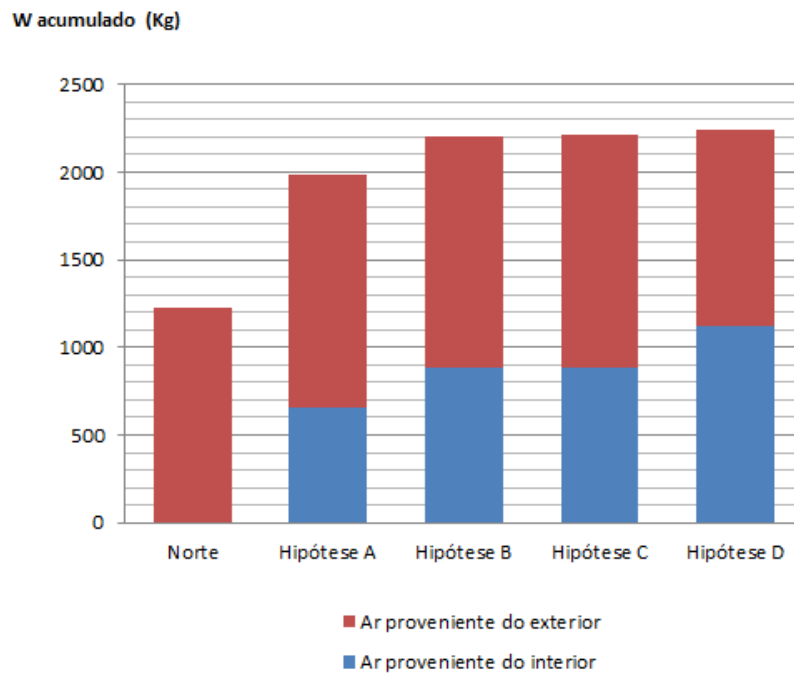


Fig. 4.21 – Quantidade de água acumulada no subsistema Norte

Para o subsistema de ventilação Norte as hipóteses de otimização permitem obter elevados ganhos na quantidade de vapor de água acumulada. Do subsistema Norte instalado retiram-se cerca de 1220 kg de vapor de água, e para a hipótese de otimização D conseguem retirar-se cerca de 2200 kg, portanto, estamos perante um sistema de ventilação bastante mais eficaz. Mesmo para as restantes hipóteses de otimização menos eficazes, os ganhos são muito significativos, sobretudo nos casos B e C.

Em todos os casos, o subsistema de ventilação otimizado Sul que admite ar do interior tem uma grande influência nas melhorias verificadas, com especial preponderância na hipótese D onde é responsável por cerca de 50% da quantidade de vapor de água retirado, como podemos comprovar no gráfico da figura 4.21.

Na figura 4.22 apresenta-se o número horas com condensações verificadas no subsistema de ventilação Norte para as diferentes hipóteses de otimização testadas.

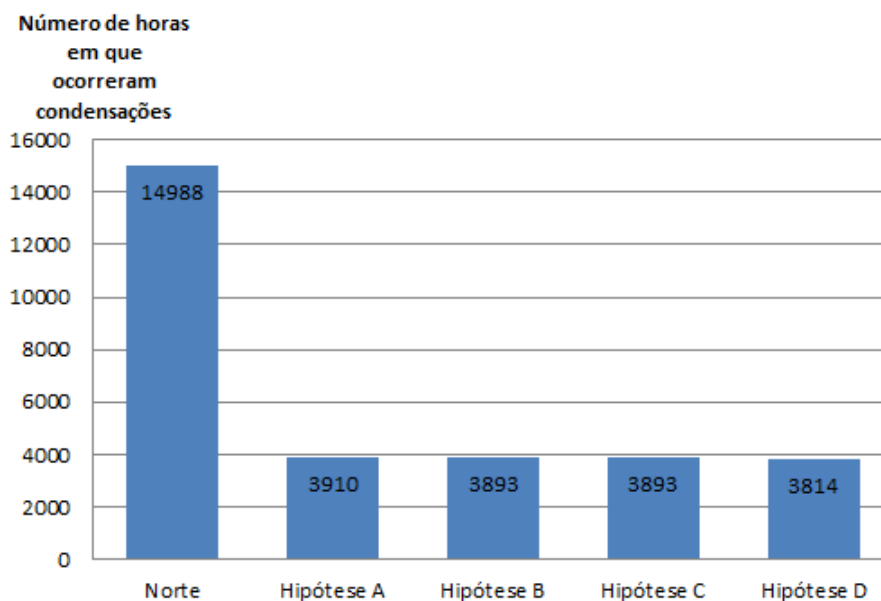


Fig. 4.22 – Número de horas em que ocorreram condensações para as diferentes hipóteses de funcionamento do subsistema de ventilação Norte

Da análise da figura 4.22 retira-se a conclusão que qualquer uma das hipóteses de ventilação testadas permitem reduzir o número de horas em que ocorrem condensações para praticamente  $\frac{1}{4}$  das verificadas no subsistema Norte. Este facto não trará a obrigatoriedade da quantidade de água acumulada para as diferentes hipóteses optimizadas ser 4 vezes maior comparativamente com a original, mas, ao comparar a figura 4.22 com a 4.21 verificamos que, normalmente, quando temos menos condensações temos maior quantidade de vapor de água retirada. Este facto pode-se verificar recorrendo à hipótese D e à original, onde temos o valor mais elevado de quantidade de água acumulada e o menor número de condensações, e a menor quantidade de água acumulada e o maior número de condensações respectivamente.

Assim, a menor ocorrência de condensações pode não significar obrigatoriamente maior quantidade de água acumulada, significa sim que teremos mais tempo de funcionamento do sistema, o que nos permite, portanto, tem maior potencial para melhorar a eficácia do subsistema de ventilação. A quantidade de vapor de água acumulada depende, tal como podemos ver recorrendo à expressão matemática 4.1, da diferença de pressão à entrada e à saída do subsistema de ventilação, assim se pode explicar mais quantidade de vapor de água acumulado, pois poderemos ter mais paragens no sistema, mas diferenças de pressão maiores.

#### 4.7.2. SUBSISTEMA SUL

Tal como para o subsistema Norte, partindo dos registos obtidos através das sondas para registo de temperatura e humidade relativa, determinou-se, com recurso à expressão 4.1, a quantidade de vapor de água acumulado no subsistema de ventilação para as quatro hipóteses de funcionamento anteriormente apresentadas.

Na figura 4.23 apresentam-se os valores da quantidade de vapor de água acumulados no subsistema Sul para o funcionamento original e para as 4 alternativas apresentadas, bem como a variação da temperatura registada à entrada do canal.

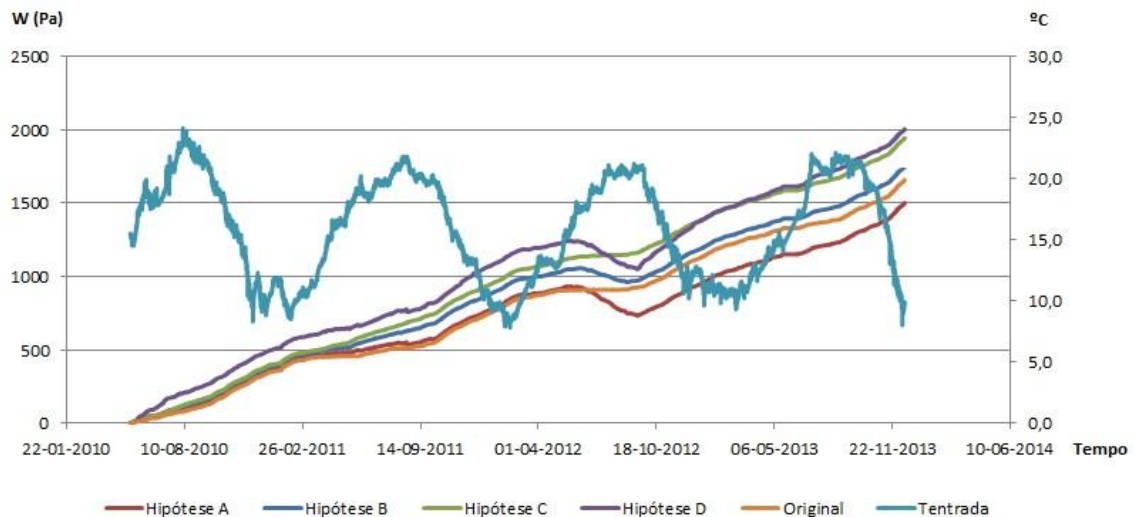


Fig. 4.23 – Variação da temperatura à entrada e quantidade de água acumulada no subsistema Sul

Para o sistema de funcionamento implementado no caso em estudo, designado “Original” na figura verifica-se que quando temos períodos de tempo mais quentes a quantidade de vapor de água acumulada verifica uma quebra, ou seja, o declive da curva diminui nestes períodos de tempo. Já nos períodos de Inverno, onde se registam temperaturas na entrada do canal mais baixas, o sistema mostra-se mais eficaz.

Este comportamento pode ser explicado pelo facto de durante o período de verão a temperatura no interior do canal de ventilação ser inferior à temperatura verificada no interior da Igreja, podendo, assim, existir condensações no interior do canal. Como se pode constatar na figura 4.23 este comportamento é cíclico, e repete-se nos meses mais quentes do período em estudo.

Quanto às hipóteses de funcionamento, constata-se que têm um comportamento muito próximo do registado para o modo de funcionamento implementado, sendo que a hipótese C tem mesmo um comportamento análogo, apenas diferenciado pela maior quantidade de vapor de água que permite acumular a partir do subsistema de ventilação Sul.

Nas hipóteses de funcionamento A, B e D têm um comportamento parecido entre elas, com destaque para o período de verão do ano de 2012 onde estas hipóteses de funcionamento originam reflexos na conduta de ventilação, facto comprovado pelas suas retas provarem declive negativo neste período de tempo. Esta evidência é explicada com a verificação de diferenças de pressão entre a saída e a entrada negativas no canal de ventilação a juntar ao circunstância das regras de funcionamento destas hipóteses não contemplarem paragens do funcionamento do ventilador aquando da ocorrência de  $\Delta P$  negativos.

Quanto à temperatura, registaram-se valores praticamente iguais entre Norte e Sul, o que leva a crer que a diferença da quantidade de água retirada nos dois subsistemas não tem grande relação com a temperatura, mas sim com as pressões verificadas, uma vez que o caudal e o intervalo de tempo é o mesmo para os subsistemas Norte e Sul.

Na figura 4.24 apresentam-se os mesmos dados da figura 4.23 com a diferença de, ao invés da temperatura de entrada, se registar a humidade relativa à entrada do sistema.

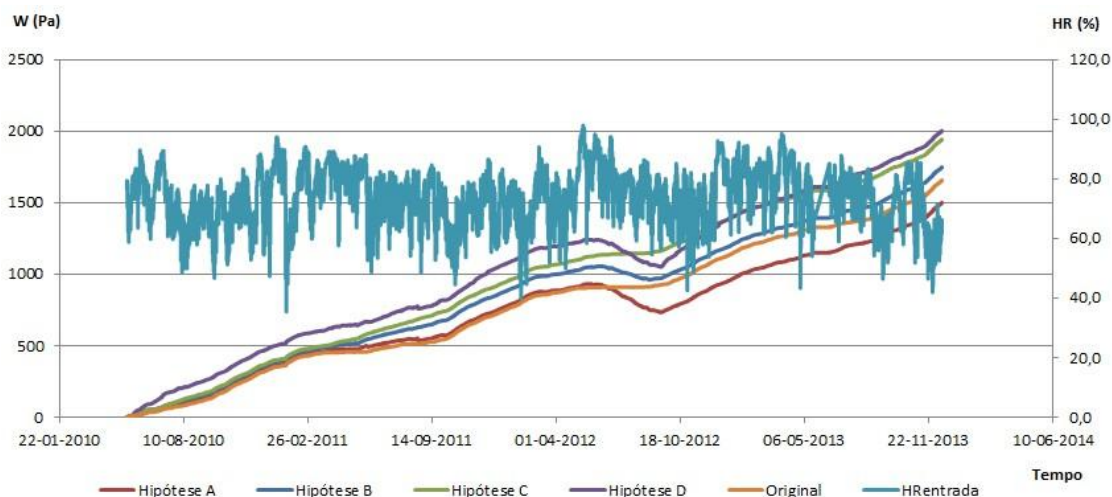


Fig. 4.24 – Variação da humidade relativa à entrada e quantidade de água acumulada no subsistema de ventilação Sul

A variação da humidade relativa verificada à entrada do subsistema de ventilação Sul é menos variável comparativamente com o subsistema de ventilação Norte. Quando comparados os dois subsistemas de ventilação, podemos constatar que o subsistema de ventilação Sul representa valores de humidade relativa de cerca de 74%, ou seja inferiores em 16% em relação ao subsistema Norte. Esta diferença poderá ajudar a explicar a discrepância verificada nos valores da quantidade de água retirada entre os dois subsistemas.

Para o subsistema Sul, no que toca ao tipo de funcionamento higrorregulável do sistema, são retirados cerca de 1600 kg de vapor de água, um valor bem mais alto do que o registado para o subsistema Norte. Para esta eficácia de funcionamento ajudam os cerca de 77% de tempo de funcionamento do ventilador instalado na conduta. Recorrendo aos critérios de funcionamento para este sistema, concluímos que cerca de  $\frac{3}{4}$  do tempo analisado registam-se diferenças de pressão entre a saída e a entrada positivas, permitindo ao sistema estar em funcionamento nestes períodos.

Na figura 4.25 estão representados a verde os períodos em que o ventilador está em funcionamento que correspondem aos períodos em que a pressão de saída é superior à pressão de entrada.

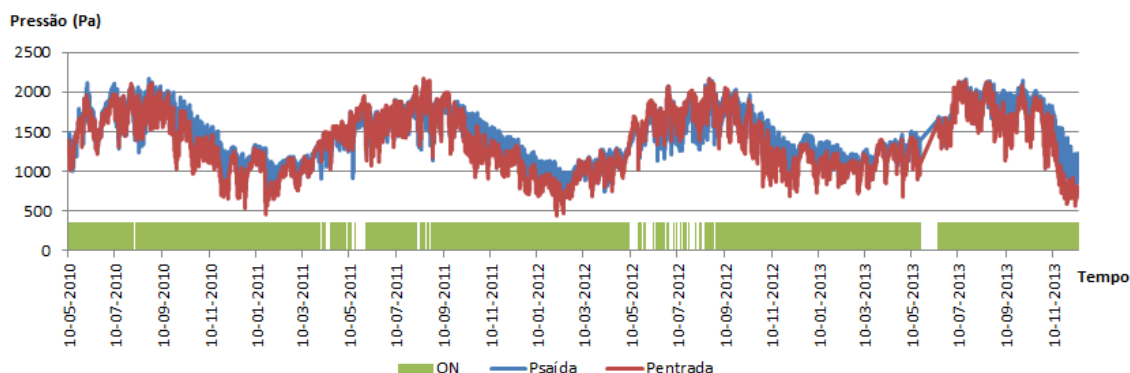


Fig. 4.25 – Períodos de funcionamento para o subsistema original

Quando comparado com o subsistema Norte, o subsistema de ventilação Sul está em funcionamento cerca de mais 25% do tempo em estudo. Isto permitirá a este subsistema acumular maior quantidade de vapor de água.

Tal como já anteriormente referido e tendo em conta as limitações de funcionamento do sistema implementado, estudaram-se também para o subsistema Sul 4 novas hipóteses de funcionamento.

Aplicando as condições de funcionamento retratadas na figura 4.8 chegamos a uma distribuição do tempo de funcionamento apresentado na figura 4.26.

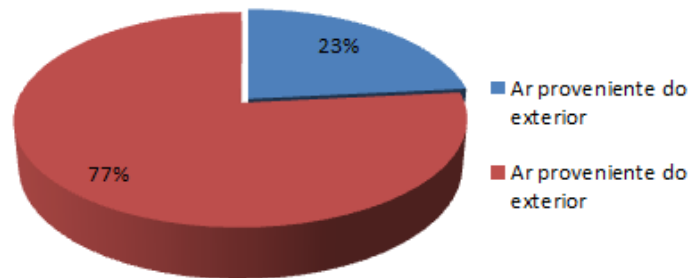


Fig. 4.26 – Distribuição temporal de funcionamento para a hipótese A no subsistema Sul

A hipótese de funcionamento A para o subsistema Sul é o único cuja quantidade de vapor de água retirado é inferior à obtida para o sistema de ventilação existente designado por “original”. Este sistema permite acumular cerca de 1600 kg de vapor de água, que após a aplicação dos critérios de funcionamento desenvolvidos para a hipótese A passam a ser cerca de 1500 kg.

Para o subsistema Sul, esta é uma alternativa de funcionamento que não poderá de todo ser equacionada pois trata-se de um retrocesso no objectivo de optimização do subsistema de ventilação Sul. Os diferentes valores de quantidade de água acumulada e a sua evolução relativamente ao funcionamento higrorregulável “original” podem ser consultados num quadro síntese 5.1.

A explicação para este fenómeno deriva do facto de, na hipótese de funcionamento A, caso a diferença de pressão de vapor de água entre a saída e a entrada do canal de ventilação seja negativa, o subsistema de ventilação Sul passa automaticamente a admitir ar através do exterior. Caso esta ambiência registre valores de diferença de pressão mais negativos que os apresentados pelo subsistema Sul, teremos refluxos mais graves comparativamente com os apresentados se tivesse exclusivamente em funcionamento o subsistema Sul, que influenciarão a quantidade de vapor de água acumulada neste subsistema.

A alternativa de funcionamento B, é baseada em critérios em tudo semelhantes aos da hipótese A com a diferença de caso as diferenças de pressão entre a saída e a entrada do canal de ventilação sejam negativas, o subsistema Sul só admite ar do exterior caso o valor de diferença de pressão negativa seja “menos negativo” que o valor apresentado pelo subsistema de ventilação Sul (interior). Para esta hipótese nunca seria possível ter, como acontece na hipótese A, valores de quantidade de vapor de água acumulados inferiores aos registados no sistema “original”.

Desta forma, obtem-se melhorias no desempenho do subsistema de ventilação Sul na ordem dos 6%, o que se traduz em cerca de 1750 kg de vapor de água acumulados para o período em estudo.

A distribuição temporal da admissão de ar para esta alternativa é a apresentada na figura 4.27.

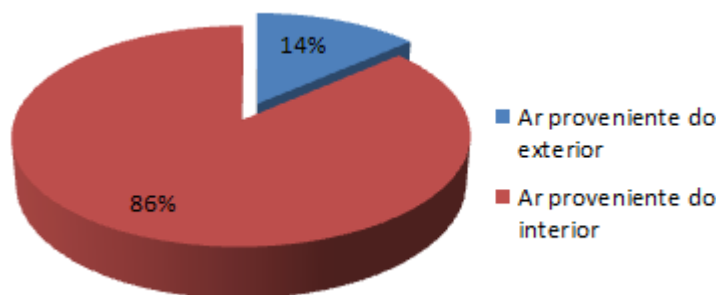


Fig. 4.27 – Distribuição temporal de funcionamento para a hipótese B no subsistema Sul

A hipótese de funcionamento C tem como principal característica a possibilidade de parar o funcionamento do ventilador. Tal como no subsistema original temos portanto, neste caso, um tipo de funcionamento do tipo “ON/OFF” representado nas figuras 4.28 e 4.29.

Podemos concluir que, de acordo com os critérios de funcionamento desenvolvidos para a hipótese C (ver figura 4.10), cerca de 86% do tempo em análise temos o ventilador a funcionar. Neste caso podemos concluir que só em 14% do tempo se verificaram diferenças de pressão, entre a saída e a entrada do canal de ventilação, negativas para as duas ambiências.

A aplicação desta hipótese funcionamento permite chegar a cerca de 1950 kg de vapor de água acumulado no subsistema de ventilação Sul, um aumento de 17% comparativamente com os critérios aplicados no sistema higrorregulável original.

O gráfico apresentado na figura 4.28 mostra os registos da pressão de saída e de entrada que se podem traduzir nos períodos de funcionamento que aparecem a verde na mesma figura. A mancha a verde é bastante superior quando comparada com, por exemplo, a da hipótese original, o que quer dizer que ao longo do tempo em análise o ventilador, para a hipótese C, está mais tempo em funcionamento.

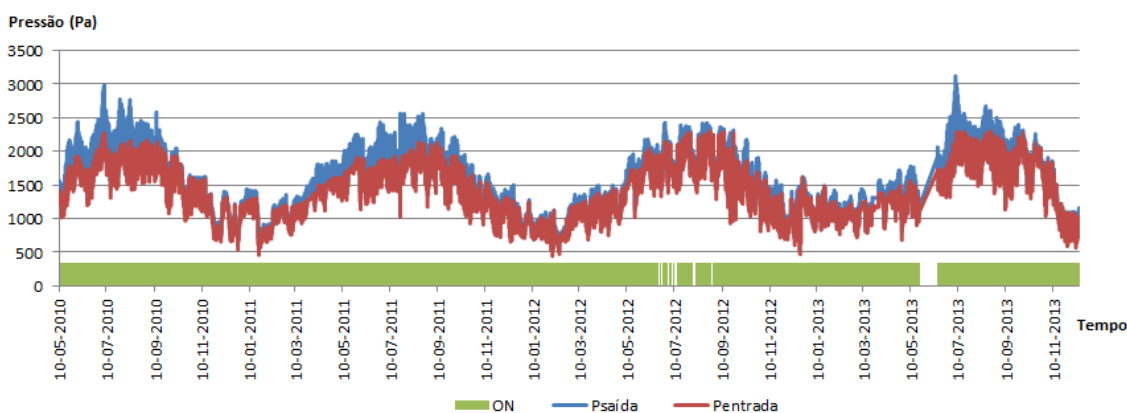


Fig. 4.28 – Períodos de funcionamento do subsistema de ventilação para a hipótese de funcionamento C

A percentagem de funcionamento do subsistema Norte para a hipótese C encontra-se representada no gráfico da figura 4.29.

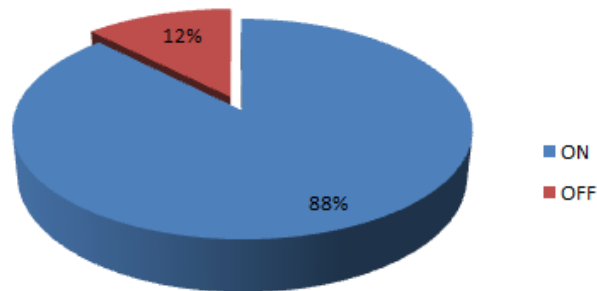


Fig. 4.29 – Percentagem de funcionamento do subsistema Sul para a hipótese de funcionamento C

A hipótese de funcionamento D é, tal como já acontecia para o subsistema de ventilação Norte, a que permite acumular maior quantidade de vapor de água a partir do subsistema de ventilação Sul. O princípio de funcionamento é semelhante ao que temos na hipótese A com a diferença a residir no caso das duas ambiências registarem valores de diferença de pressão de entrada e saída  $\Delta P$  positivos. Neste caso, a hipótese D permite ao sistema ter a capacidade de admitir ar do ambiente que for mais favorável, ou seja, do meio que registar para o mesmo instante uma diferença de pressão maior.

Este critério de funcionamento permite, para o subsistema de ventilação Sul, acumular cerca de 2000 kg de vapor de água, o que se traduz num aumento de 21%, com a distribuição de funcionamento representada na figura 4.30.

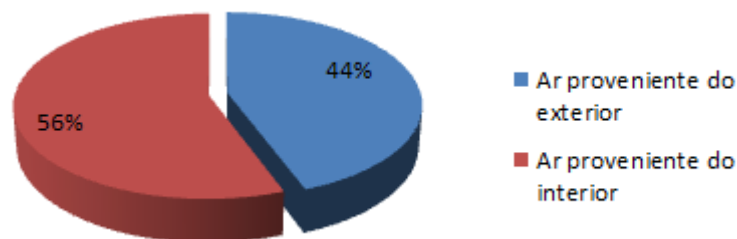


Fig. 4.30 – Percentagem de funcionamento do subsistema Sul para a hipótese D

A figura 4.31 representa um gráfico que indica a quantidade de vapor de água retirada do subsistema Sul para as diferentes hipóteses com as diferentes contribuições do ar proveniente do exterior.

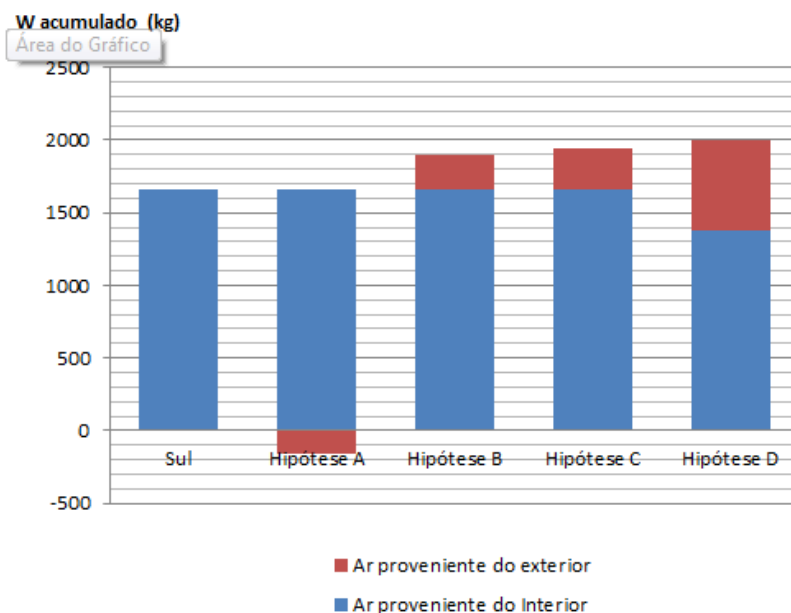


Fig. 4.31 – Quantidade de água acumulada no subsistema Sul

Através da análise do gráfico da figura 4.31 podemos concluir que, com exceção da hipótese A, todas as soluções permitem melhorar o desempenho do subsistema de ventilação Sul, uma vez que temos nas hipóteses B,C e D valores de quantidade de vapor de água acumulados superiores aos registados para Sul.

Comparativamente com os valores apresentados para o subsistema Norte, pode-se dizer que para o subsistema Sul as melhorias são bastante menos evidentes, facto comprovado pelos valores do gráfico da figura 4.31. Embora tenhamos melhorias igualmente significativas, com exceção da hipótese de funcionamento A, onde se verifica uma redução na quantidade de vapor de água acumulado, fenómeno já explicado anteriormente.

A contribuição do ar proveniente do exterior para a quantidade de água acumulada no subsistema de ventilação Sul, é crescente com o aumento da eficiência da hipótese em estudo. Quando comparados com os valores de contribuição do ar interior na quantidade de água acumulada no subsistema Norte, estes valores contribuem bastante menos, o que pode ser explicado pelo facto de o subsistema Sul já estar na sua versão original 77% do tempo em estudo em funcionamento ao contrário do subsistema Norte que está cerca de 50%. Esta diferença permite ao subsistema Sul ter menos “margem” de optimização uma vez que grande parte do tempo já se encontra em funcionamento.

Na figura 4.32 apresenta-se o número de condensações verificadas para as diferentes opções de optimização do subsistema Sul.

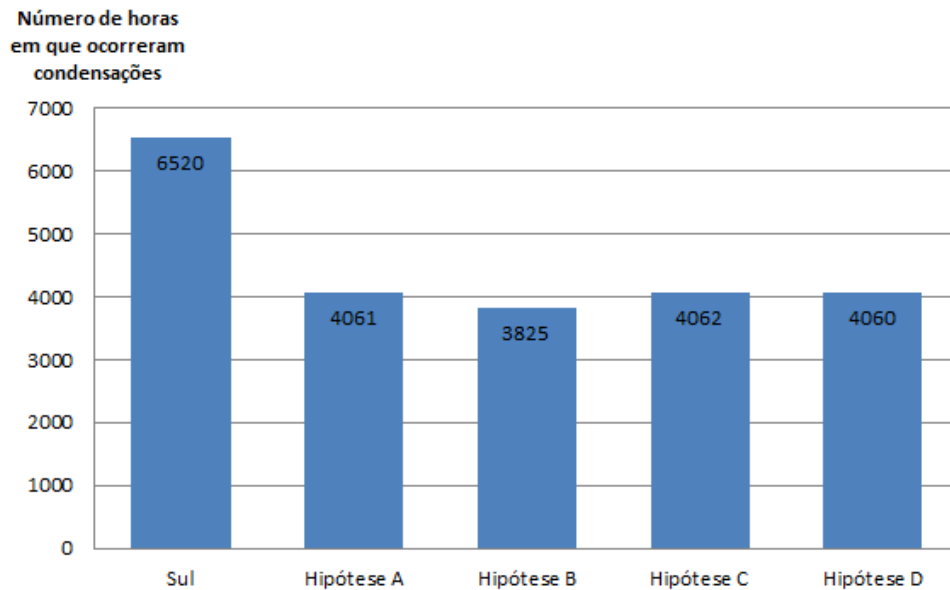


Fig. 4.32 – Número de horas em que ocorreram condensações nas diferentes hipóteses de funcionamento do subsistema de ventilação Sul

Embora seja frequente acontecer, não é peremptório que a hipótese que permita acumular mais vapor de água seja a que tenha menos condensações. Na figura 4.32 podemos constatá-lo, pois a hipótese D revelou-se a mais eficiente mas não é a que verifica menor número de condensações. Estas ocorrem quando para um sistema, para um dado instante, com determinado critério de funcionamento se verificarem diferenças de pressão entre a saída e a entrada do canal de ventilação negativas, portanto poderemos ter um sistema que verifica bastantes condensações mas quando estas não ocorrem pode verificar valores de diferença de pressão bastante elevados permitindo assim acumular grandes quantidades de vapor de água.

Outra constatação curiosa está relacionada com o sistema Sul e a hipótese A, onde o primeiro tem bastantes mais condensações mas permite acumular maior quantidade de vapor de água que o segundo. Recorrendo ao esquema de funcionamento da hipótese A (figura 4.8), podemos concluir que quando se verificam diferenças de pressão negativas no subsistema de ventilação passa-se a admitir do subsistema de ventilação alternativo que neste caso terá na maior parte dos instantes em que ocorre valores de diferença de pressão mais negativos, e portanto mais desfavoráveis que os verificados pelo subsistema Sul.



# 5 CONCLUSÃO

## 5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema higrorregulável de ventilação da base das paredes HUMIVENT tem provado nos últimos anos ser uma técnica bastante útil e de eficácia comprovada no combate à humidade ascensional. Em virtude dos sucessos comprovados, pensa-se ser possível adaptar esta tecnologia para o controlo da humidade relativa em armários, coberturas em desvão, entre outras. A ventilação de paredes após inundações/cheias, bem como a ventilação de desvãos sanitários constituem também possíveis aplicações desta técnica inovadora.

Sobre a aplicação já implementada, ventilação da base das paredes, foram desenvolvidas na presente dissertação novas hipóteses de funcionamento que provaram ser possível obter melhorias significativas na eficácia deste sistema com exceção da hipótese A quando aplicada no subsistema de ventilação Sul. Apresenta-se na figura 5.1 um gráfico que procura resumir os exercícios de otimização desenvolvidos no estudo realizado.

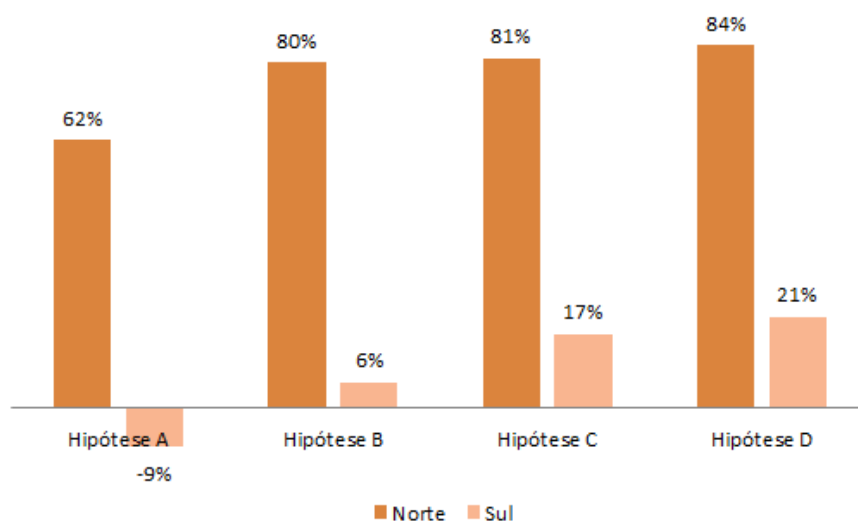


Fig. 5.1 – Evolução da quantidade de vapor de água acumulado nas hipóteses em estudo relativamente ao sistema instalado originalmente

Após análise da figura 5.1 conclui-se que das hipóteses de otimização desenvolvidas o subsistema Norte é quem mais beneficia, ou seja, é onde se obtêm maiores ganhos no que à quantidade de vapor de água acumulado diz respeito. Isto deve-se ao facto de, originalmente, este subsistema se encontrar em funcionamento apenas 51% do tempo em estudo. Possibilitando este subsistema a admissão de ar no interior do edifício era expectável que se obtivessem grandes melhorias.

O subsistema Sul, experimenta ganhos mais reduzidos pois originalmente já tinha um desempenho bastante melhor, portanto a margem para melhorar o seu desempenho não seria tão grande. Ainda assim, apresenta melhorias consideráveis com excepção para a hipótese A onde temos uma diminuição da eficiência do sistema de ventilação.

Tal como já foi explicado na análise da hipótese A no Capítulo 4, para o subsistema Sul, esta ocorrência deve-se aos critérios de funcionamento desta hipótese, onde quando a diferença de pressão entre a saída e a entrada é negativa o subsistema Sul passa a admitir ar do exterior, sendo que, para bastantes períodos do tempo em estudo, a diferença de pressão neste caso é mais baixa que a se verificava no ar admitido no interior. Desta forma, teremos diferenças de pressão ainda mais negativas que prejudicarão o desempenho do subsistema de ventilação.

Das diferentes hipóteses em análise, a D é a que se revela mais eficaz para os dois subsistemas, tal explica-se através da capacidade de, sempre que a diferença de pressão entre a saída e a entrada é positiva (maior parte do tempo do período em estudo), admitir ar da ambiência onde se registre maior  $\Delta P$ .

O quadro 5.1 é um complemento à figura 5.1 uma vez que constitui, igualmente, uma síntese do trabalho de otimização realizado.

Quadro 5.1 – Quantidade de vapor de água acumulada nas diferentes hipóteses testadas e sua evolução comparativamente com a versão original

	Hipótese A		Hipótese B		Hipótese C		Hipótese D		
	Original	%	W (kg)	%	W (kg)	%	W (kg)	%	W (kg)
<b>Sul</b>	1656	-9	1500	6	1748	17	1941	21	2002
<b>Norte</b>	1223	62	1985	80	2204	81	2211	84	2244
<b>Total</b>	2879	21	3485	37	3952	44	4152	48	4246

Dos cerca de 30000 registos horários que serviram de base para o estudo realizados uma parte apresenta valores de diferença de pressão de vapor de água entre a entrada e saída negativos. Estes valores significam que, para a condição original e para a hipótese C, teremos momentos em que o subsistema pára. O gráfico apresentado na figura 5.2 representa o número de paragens que se registaram para os subsistemas Norte e Sul para estas duas situações.

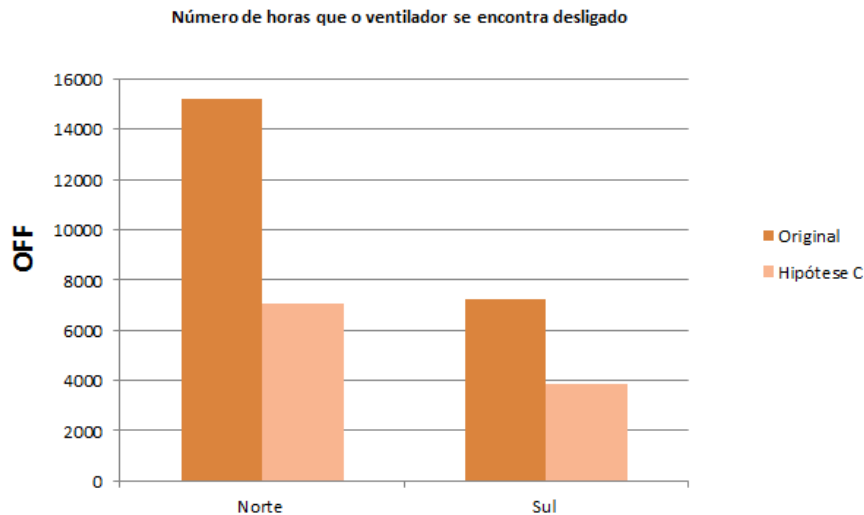


Fig. 5.2 – Número de horas em que o subsistema de ventilação se encontra desligado

A análise do gráfico da figura 5.2 permite concluir que ocorreu uma grande evolução na eficácia dos subsistemas de ventilação, traduzida na redução do número de horas em que os subsistemas tiveram o seu funcionamento interrompido. No caso do subsistema Norte esta evolução é mais notória pois este é o subsistema que tinha mais paragens, como tal aquele onde a margem de otimização seria maior. Ainda assim, no subsistema Sul, a melhoria é também bastante significativa, onde foi possível reduzir o número de paragens para praticamente metade do registo inicial.

## 5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A necessidade de cumprir os prazos restritos nos quais se desenvolve uma dissertação deste tipo obriga a que algumas questões, de análise ou compreensão mais complexas, sejam tratadas de forma menos profunda.

Assim, levantam-se algumas temáticas e/ou trabalhos que poderão ser desenvolvidos num futuro próximo:

- Aplicar e monitorizar o funcionamento do sistema de ventilação da base das paredes para as diferentes possibilidades apresentadas: secagem de paredes em caso de cheias/inundações, ventilação de armários, coberturas em desvão e desvãos sanitários;
- Partindo na mesma do sistema higrorregulável de ventilação da base das paredes, estudar novas hipóteses de funcionamento que pudessem trazer ainda melhores resultados, como por exemplo, uma nova hipótese que fosse uma espécie de junção da hipótese C e da hipótese D desenvolvidas na presente dissertação;
- Procurar desenvolver um trabalho semelhante ao realizado, procurando alterar algumas variáveis que pudessem à partida trazer maior eficácia ao sistema. Por exemplo, crê-se ser interessante trabalhar com uma manilha com maior percentagem de furação, permitindo assim aumentar a eficácia do sistema;
- Partindo do mesmo modelo de funcionamento, achar o ponto ótimo de funcionamento no que confere ao caudal de ventilação/gasto energético para diferentes hipóteses e climas;
- Concluir se é vantajoso a aplicação do sistema de ventilação da base das paredes em conjunto com outras técnicas de tratamento da humidade ascensional;

- Com base na presente dissertação, desenvolver estudos que permitam concluir até que ponto, nas hipóteses de funcionamento “ON/OFF”, teremos vantagens em termos de gastos energéticos em parar e retomar o funcionamento do sistema de ventilação, e com que frequência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Torres, M. I. M. *Humidade Ascensional em Paredes de Construções Históricas*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra – FCTUC, 2004.
- [2] Guimarães, A. S. *Caraterização Experimental do Funcionamento de Sistemas de Ventilação da Base das Paredes para Tratamento da Humidade Ascensional*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2007.
- [3] Guimarães, A. S. *Dimensionamento de Sistemas de Ventilação da Base das Paredes para o Tratamento da Humidade Ascensional*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2011.
- [4] Torres, M. I. M. *Humidade Ascensional em Paredes*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra – FCTUC, 1998.
- [5] Humidade em Paredes de Edifícios: Causas, Manifestações e Soluções de Reparação, Curso de Engenharia Civil, Processos Gerais de Construção II, [http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/1136\\_Humidade\\_Constru%C3%A7%C3%A3o.pdf](http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/1136_Humidade_Constru%C3%A7%C3%A3o.pdf), 33 pgs.
- [6] MASSARI, G. – *Bâtiment humides et insalubres. Pratique de leur assainissement*. Paris, Eyrolles, 1971.
- [7] HENRIQUES, F. M. A. – *Acção da Humidade em Paredes – Formas de Manifestação, Critérios de Quantificação e Análise de Soluções de Reparação*, Tese de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa – UTL, 1993.
- [8] PAIVA, V. – *Humidade nas Edificações*, Tese para Especialista do LNEC, Proc.º 34/1/3210, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 1969.
- [9] <http://www.culturante.pt/pt/patrimonio/convento-de-sao-salvador-de-vilar-de-grades/>.
- [10] Kunzel, H. M., Holm, A., Eitner, V., Schmidt, T. WUFI – 2D Program description.
- [11] Freitas, V. P. *Transferência de humidade em paredes de edifícios – Análise do fenómeno de interface*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 1992.
- [12] TORRES, M. I. M., FREITAS, V. P. de – *Modelling versus experimental study of rising damp in historical buildings* – Proceedings of XXX IAHS-World Congress on Housing 2002, pp. 1999-2006, Coimbra, September 9-13, 2002.
- [13] Ramos, D.J. *Funcionamento de Sistemas HUMIVENT para controlo de humidade*

*ascensional numa Igreja no Norte de Portugal*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2016

- [14] BENAVENTEA, D., GARCIA DEL CURAB, M. A., ORDONEZ S. – *Salt influence on evaporation from porous building rocks*, Construction and Building Materials, Volume 17, pp. 113–122, 2003.
- [15] BORRELLI, E. – *Salts, Conservation of architectural heritage, historic structures and materials*, ICCROM, UNESCO, WHC, Volume 3, ISBN: 92- 9070-157-7, 1999.
- [16] FREITAS, V. P. de, TORRES, M.I.M., GUIMARÃES, A. S. – *Humidade Ascensional*, FEUP edições; ISBN. 978-972-752-101-2; 1.ª edição, FEUP, Porto, 106 pgs., 2008.
- [17] GUIMARÃES, A. S., FREITAS, V. P. de, – *Sistema higro-regulável de ventilação da base das paredes para Tratamento da humidade ascensional em edifícios antigos*, PATORREB2009, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, Porto, Março 2009.
- [18] FREITAS, V. P. de, GUIMARÃES, A. S., Project Metanir – Patrimoine Culturel et Risques Naturels: Les méthodologies D'évaluation et Réduction des Risques Volcaniques, Biologiques et Hygrothermiques, Humidité Ascensionnelle, pp 92-101 and 119-124, 2007.
- [19] FREITAS, V. P. de, GUIMARÃES, A. S. – *Characterization of a hygro- regulated Wall Base Ventilation System for Treatment of Rising Damp in Historical Buildings*. Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, pp 911-919, Copenhagen, Denmark, 16 a 18 de Junho de 2008.
- [20] Silva, R. J. S. M. *Humidade Ascensional – Dimensionamento de Sistemas de Ventilação da Base das Paredes*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2012.
- [21] <http://www.google.com/patents/US7143558>.
- [22] <http://www.google.com/patents/US20050204653>.
- [23] Delgado, J. M. P. Q., Guimarães, A. S., Freitas, V. P. Controlo da Humidade Relativa num Desvão Sanitário: Simulação Numérica. PATORREB, 2012, Santiago de Compostela, R8-27.
- [24] Delgado, J., Freitas, V. P., Guimarães, A. S., Ferreira, C. *Controlled relative humidity in crawl spaces: a new treatment methodology*. Structural Survey, 2013, 139-156, Emerald.

- [25] [http://www.guiadomarceneiro.com/img\\_gdm/fotos54/wj\\_0f72fe8015.jpg](http://www.guiadomarceneiro.com/img_gdm/fotos54/wj_0f72fe8015.jpg)
- [26] [http://www.umbelino.pt/client/2014-01-19%20Artigo%20Full\(1\).pdf](http://www.umbelino.pt/client/2014-01-19%20Artigo%20Full(1).pdf)
- [27] Martins, M.R. *Ventilação da base das paredes para secagem de edifícios na sequência de inundações/cheias*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2015
- [28] <http://pedroluissilva.wordpress.com/2015/01/28/visita-guiada-ao-convento-de-vilar-de-frades/>
- [29] [https://pt.wikipedia.org/wiki/Igreja\\_de\\_Vilar\\_de\\_Frades#cite\\_note-Vinhas-2](https://pt.wikipedia.org/wiki/Igreja_de_Vilar_de_Frades#cite_note-Vinhas-2).
- [30] [http://www.monumentos.pt/Site/APP\\_PagesUser/SIPA.aspx?id=1053](http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=1053).
- [31] Freitas, V. P., Torres, M. I. M. Ascensão, A., Gonçalves, P., *Tratamento da humidade ascensional na Igreja de Vilar de Frades*. Revista Património – estudos, N°3 – 2002, pg. 54-62, IPPAR – Departamento de Estudos.
- [32] Vinhas, J. A. *A Igreja e o Convento de Vilar de Frades*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Letras da Universidade do Porto – FLUP, 1998
- [33] [http://www.wikiwand.com/pt/Igreja\\_de\\_Vilar\\_de\\_Frades](http://www.wikiwand.com/pt/Igreja_de_Vilar_de_Frades)
- [34] FREITAS, V. P. de, – Parecer sobre o Comportamento Face à Humidade da Igreja de Vilar de Frades, Areias de Vilar, Barcelos – Braga, IPPAR – Instituto Português do Património Arquitectónico, Relatório HT – 181/02, Prof. Engº Vasco Peixoto de Freitas, Lda, Porto, Abril, 2002.
- [35] <http://www.grupoverdasca.com/pt/produtos/40/manilhas-e-tubos>