U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS HUMIVENT PARA CONTROLO DA HUMIDADE ASCENSIONAL NUMA IGREJA NO NORTE DE PORTUGAL

DUARTE JOSÉ DE BASTOS DANTAS FÉLIX RAMOS

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

JUNHO DE 2016

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ 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

🌍 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 - 2015/2016 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016*.

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.

Aos meus Pais.

"In expanding the field of knowledge we but increase the horizon of ignorance"

Henry Miller

AGRADECIMENTOS

Ao concluir a dissertação gostaria de manifestar o meu profundo e sincero agradecimento a todos os que contribuíram para a sua realização, fazendo destaque a algumas pessoas em particular:

À Professora Doutora Ana Sofia Moreira dos Santos Guimarães Teixeira, orientadora, agradeço a disponibilidade e interesse demonstrado, esclarecimentos prestados e paciência ao longo de todo o percurso da dissertação;

À Arquiteta Isabel Sereno gostaria de agradecer a disponibilidade demonstrada e ajuda dispensada;

Ao Professor Doutor Vasco Peixoto de Freitas queria agradecer os esclarecimentos prestados;

Ao Dr. Sérgio Bernardo gostaria de agradecer pela ajuda concedida;

Aos meus pais, irmã e família, o mais sincero agradecimento por me apoiarem incondicionalmente e por estarem sempre ao meu lado;

À minha namorada, agradeço a preocupação e apoio incansável nos momentos mais difíceis;

Aos amigos e colegas que me ajudaram e acompanharam ao longo do meu percurso académico, um obrigado.

RESUMO

A humidade ascensional é uma das principais causas do aparecimento de diversas patologias nas paredes dos edifícios. Proveniente de águas superficiais ou freáticas, a humidade migra por ascensão capilar através dos materiais porosos causando a respetiva degradação.

Recentemente foi desenvolvida, pelo Laboratório de Física das Construções – LFC – da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, uma técnica de tratamento da humidade ascensional designada por "sistema de ventilação da base das paredes - HUMIVENT". Este sistema consiste em ventilar a base das paredes através da instalação de canais periféricos com ventilação natural ou forçada por meio de um sistema mecânico, promovendo condições de secagem/evaporação mais favoráveis.

Pretende-se com este trabalho analisar o funcionamento dos sistemas de ventilação mecânica implementados numa Igreja no Norte de Portugal, que se encontra há vários anos monitorizada, através da avaliação da influência do comprimento dos sistemas, caraterísticas do ar como a sua humidade relativa e temperatura, orientação das entradas de ar, utilização do espaço e condições climáticas do ambiente local, de forma a otimizar a eficácia do sistema implementado. Pretende-se ainda efetuar uma análise económica do funcionamento do sistema assim como a necessidade de reequacionar os critérios de funcionamento.

O sistema implementado é composto por dois subsistemas independentes com admissões de ar distintas. O sistema de ventilação cujo ar é proveniente do interior da Igreja funciona de forma mais eficaz. Retira uma maior quantidade de água de forma mais prolongada e com um menor número de arranques. Apresenta ainda gastos energéticos por kg de água inferiores ao sistema de ventilação cuja admissão de ar se encontra no exterior. A utilização no espaço interior da Igreja não altera de forma significativa a eficácia do sistema.

O comportamento similar dos sistemas ao longo dos anos analisados permite que seja suficiente monitorizar um determinado sistema durante apenas um ano para se obter informação relativa ao comportamento e funcionamento do sistema (desde que não se trate de um ano atípico).

PALAVRAS-CHAVE: Humidade Ascensional, Análise de Dados in Situ; Sistema de Ventilação da Base das Paredes; Humivent; Critérios de Funcionamento.

ABSTRACT

Rising damp is a major cause of several pathologies in building's walls. From surface or ground water, humidity migrates by capillary rise through the porous materials causing degradation.

Recently it was developed by "Laboratório de Física das Construções – LFC" of "Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP", a technique of rising damp treatment known as "ventilation system of the base of the walls - HUMIVENT". This system aim is to ventilate the base of the walls by installing peripheral channels with natural or forced ventilation throught a mechanical system, promoting conditions of drying/evaporation.

The aim of this work was to analyze the mechanical ventilation systems functioning, from a church in northern Portugal, that has been monitored by several years throught the evaluation of the influency of the length of the systems, air features as relative humidity and temperature, guidance of the air inlets, space utilization and climatic conditions of the local environment, in order to optimize the effectiveness of the implanted system. We also intend to carry out an economic analysis of system function and the need to rethink the operating criteria.

The implanted system has two independent subsystems with different air admissions. The ventilation system whose air comes from the Church's inside works more effectively. It withdralls a larger quantity of water in a prolongued way and with fewer starts. Displays less energy expenses per kg of water then the ventilation system in which air intake comes from the outside. The use in the church's interior does not change significantly the system effectiveness.

Similar behavior of the system over the analyzed years allows that a single year monitoring is enought to obtain behaviour and function information from the system (as long as it's not an atypical year).

KEYWORDS: Rising damp, In Situ Data Analysis; Wall Base Ventilation System; HUMIVENT; Function criteria.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS i

RESUMO iii

ABSTRACT v

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. ENQUADRAMENTO 1

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO 2

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 2

2. SISTEMA HIGROREGULÁVEL DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES - HUMIVENT 5

2.1. INTRODUÇÃO 5

2.2. O PROBLEMA 5

2.2.1. A ÁGUA COMO FONTE DE DEGRADAÇÃO 5

2.2.2. HUMIDADE ASCENSIONAL 6

2.2.3. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DA HUMIDADE ASCENSIONAL 8

2.3. CARATERIZAÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES 9

2.3.1. O SISTEMA 9

2.3.2. ELEMENTOS CONSTITUINTES DO SISTEMA 9

2.3.3. CRITÉRIOS DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA 10

2.3.4. CRITÉRIOS DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA 11

2.4. EVOLUÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES AO LONGO DO TEMPO 11

2.4.1. ANO 2000 11

2.4.2. ANO 1999-2004 11

2.4.3. ANO 2005-2007 12

2.4.4. ANO 2008-2011 17

2.5. SISTEMAS SIMILARES 20

2.5.1. TUBOS DE AREJAMENTO 20

2.5.2. TUBOS CERÂMICOS DE VENTILAÇÃO DO RODAPÉ 21

2.5.3. SIFÃO ATMOSFÉRICO BIVIAL PARA A SECAGEM DE MUROS 22

2.5.4. DRENAGEM DE PAREDES ENTERRADAS 22
2.5.5. SISTEMA DE VENTILAÇÃO PARA IMPERMEABILIZAÇÃO ESTRUTURAL 23
2.5.6. SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA FUNDAÇÃO DE UMA ESTRUTURA 24
2.6. OUTRAS APLICAÇÕES DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES 24
2.6.1. SECAGEM DE PAREDES NA SEQUÊNCIA DE CHEIAS/INUNDAÇÕES 25
2.6.2. CONTROLO DA HUMIDADE RELATIVA EM DESVÃOS SANITÁRIOS 25
2.7. SÍNTESE DO CAPÍTULO 26

3. CARATERIZAÇÃO DO SISTEMA IMPLEMENTADO NUMA IGREJA SITUADA NO NORTE DE PORTUGAL 27
3.1. INTRODUÇÃO 27
3.2. HISTÓRIA DA IGREJA 27
3.2.1. O MOSTEIRO 27
3.2.2. A IGREJA 29
3.2.3. RESUMO CRONOLÓGICO 30
3.2.4. PATOLOGIAS OBSERVADAS 31
3.3. O SISTEMA IMPLEMENTADO 32
3.3.1. PAVIMENTOS 32
3.3.2. SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES 33
3.3.2.1. SUBSISTEMA NORTE 35
3.3.2.2. SUBSISTEMA SUL 36
3.3.3. CRITÉRIOS DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA 38
3.4. MONITORIZAÇÃO DO SISTEMA 39
3.4.1. SUBSISTEMA NORTE 39
3.4.2. SUBSISTEMA SUL 41
3.4.3. PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA 43
3.4.4. EDIFÍCIOS ONDE O SISTEMA JÁ SE ENCONTRA INSTALADO 44
3.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO 45

4. MONITORIZAÇÃO DO SISTEMA IMPLEMENTADO NUMA IGREJA NO NORTE DE PORTUGAL 47
4.1. INTRODUÇÃO 47
4.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS 47

4.3. RECONSTITUIÇÃO DOS DADOS EM FALTA 49

4.4. SÍNTESE DOS SUBSISTEMAS IMPLEMENTADOS 51

4.5. QUANTIDADE DE ÁGUA RETIRADA PELOS SUBSISTEMAS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA À ENTRADA 51

4.6. QUANTIDADE DE ÁGUA RETIRADA PELOS SUBSISTEMAS EM FUNÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA À ENTRADA 54

4.7. QUANTIDADE DE ÁGUA RETIRADA E ACUMULADA POR CADA SUBSISTEMA 57

4.8. VARIAÇÃO DA PRESSÃO DE VAPOR AO LONGO DO TEMPO E PERÍODOS DE FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS 59

4.8.1. ANÁLISE ECONÓMICA 61

4.8.2. PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO ECONÓMICA 62

4.9. INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DA IGREJA NO COMPORTAMENTO DO SUBSISTEMA DE VENTILAÇÃO SUL 65

4.10. COMPARAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS DE DIA E DE NOITE 66

4.11. ANALOGIA DO SISTEMA ESTUDADO EM OUTROS PONTOS DO PAÍS 68

4.12. INTERPRETAÇÃO GLOBAL DOS RESULTADOS OBTIDOS 69

4.13. SÍNTESE DO CAPÍTULO 71

5. CONCLUSÕES 73

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS 73

5.1. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 75

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 77

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 – Exemplo de humidade ascensional (Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades) 6
Fig. 2.2 – Origem da humidade ascensional [25] 6
Fig. 2.3 – Equilíbrio entre a água evaporada e água absorvida.....7
Fig. 2.4 – Fatores que influenciam o nível atingido pela frente húmida 7
Fig. 2.5 – Tecnologias de tratamento da humidade ascensional [3] 8
Fig. 2.6 – Ventilação da base das paredes [3] 9
Fig. 2.7 – Sistema HUMIVENT [3] 10
Fig. 2.8 – Alteração/redução do desenvolvimento do sistema.....10
Fig. 2.9 – Funcionamento do sistema HUMIVENT [3] 11
Fig. 2.10 – Modelo experimental [1].....12
Fig. 2.11 – Configuração A.....13
Fig. 2.12 – Configuração B.....13
Fig. 2.13 – Configuração C.....13
Fig. 2.14 – Posicionamento das sondas (3D).....14
Fig. 2.15 – Quantidade de água retirada em cada configuração [2].....16
Fig. 2.16 – Equações matemáticas analíticas e numéricas resultantes [3] 17
Fig. 2.17 – Equações matemáticas resultantes [3].....18
Fig. 2.18 – Folha de cálculo HUMIVENT predim [3].....19
Fig. 2.19 – Tubos de arejamento.....21
Fig. 2.20 – Rodapé ventilado.....21
Fig. 2.21 – Sifão atmosférico.....22
Fig. 2.22 – Drenagem de parede enterrada.....23
Fig. 2.23 – Sistema de ventilação da estrutura 23
Fig. 2.24 – Conduta de betão ventilada 24
Fig. 2.25 – Esquema representativo do sistema de ventilação de paredes na sequência de cheias/inundações.....25
Fig. 2.26 – Ventilação de desvão sanitário 26
Fig. 3.1 – Mosteiro de Vilar de Frades [18] 28
Fig. 3.2 – Obras de restauro [20].....29
Fig. 3.3 – Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades 29
Fig. 3.4 – Planta da Igreja 30
Fig. 3.5 – Paredes exteriores [2].....31

Fig. 3.6 – Paredes interiores [1], [2], [3] 32
Fig. 3.7 – Pavimento interior [1], [3] 32
Fig. 3.8 – Cobertura interior [20] 32
Fig. 3.9 – Corte construtivo do pavimento interior 33
Fig. 3.10 – Reforço exterior [4] 34
Fig. 3.11 – Geometria do sistema de ventilação exterior 34
Fig. 3.12 – Cortes construtivos do canal de ventilação exterior 35
Fig. 3.13 – Geometria do subsistema de ventilação Norte 36
Fig. 3.14 – Geometria do subsistema de ventilação Sul 36
Fig. 3.15 – Corte construtivo do canal de ventilação interior 37
Fig. 3.16 – Dispositivos de controlo 38
Fig. 3.17 – Programador 39
Fig. 3.18 – Variação da humidade relativa à entrada e à saída do subsistema Norte [3] 40
Fig. 3.19 – Variação da temperatura à entrada e à saída do subsistema Norte [3] 40
Fig. 3.20 – Variação da pressão de vapor à entrada e à saída do subsistema Norte [3] 41
Fig. 3.21 – Quantidade de água acumulada retirada [3] 41
Fig. 3.22 – Variação da humidade relativa à entrada e à saída do subsistema Sul [3] 42
Fig. 3.23 – Variação da temperatura à entrada e à saída do subsistema Sul [3] 42
Fig. 3.24 – Variação da pressão de vapor à entrada e à saída do subsistema Sul [3] 43
Fig. 3.25 – Quantidade de água acumulada retirada [3] 43
Fig. 3.26 – Funcionamento sazonal dos subsistemas [3] 44
Fig. 3.27 – Localização dos edifícios onde se encontra instalado o sistema de ventilação da base das paredes 45
Fig. 4.1 – Data-logger 48
Fig. 4.2 – Software MM-grafix7 [2] 48
Fig. 4.3 – Variação da temperatura à entrada do subsistema Norte e Sul e quantidade de água retirada por cada subsistema 53
Fig. 4.4 – Temperatura média mensal registada na estação meteorológica de Barcelos (Estação 04F/01C) 54
Fig. 4.5 – Variação da humidade relativa à entrada do subsistema Norte e Sul e quantidade de água retirada por cada subsistema 55
Fig. 4.6 – Precipitação mensal registada na estação meteorológica de Barcelos (Estação 04F/01C) 57
Fig. 4.7 – Variação da quantidade de água retirada e acumulada de cada subsistema (Norte e Sul) 58
Fig. 4.8 – Variação da pressão de vapor à entrada e saída do subsistema Norte e Sul e período de funcionamento do subsistema 60

Fig. 4.9 – Número de arranques de cada sistema de ventilação 61

Fig. 4.10 – Ventilador [22] 61

Fig. 4.11 – Diferença da pressão de vapor de cada subsistema (Norte e Sul) e respetiva quantidade de água retirada em 2010/2011 63

Fig. 4.12 – Variação da humidade relativa à entrada do subsistema Sul 66

Fig. 4.13 – Variação da quantidade de água retirada e acumulada de cada subsistema (Norte e Sul) em dois períodos distintos do dia 67

Fig. 4.14 – Variação da humidade relativa e temperatura no período selecionado em São Julião do Tojal (a 15 km de Lisboa) e em São Brás de Alportel (a 15 km de Faro) 68

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Teor de humidade relativa de equilíbrio de alguns sais a 20°C [4] 16

Quadro 4.1 – Falta de registo de dados 49

Quadro 4.2 – Dados registados incorretamente 49

Quadro 4.3 – Caraterísticas principais de cada subsistema 51

Quadro 4.4 – Valores médios de temperatura e quantidade de água acumulada retirada por cada subsistema 53

Quadro 4.5 – Valores médios de humidade relativa e quantidade de água acumulada retirada por cada subsistema 56

Quadro 4.6 – Quantidade de água retirada por cada subsistema em cada semestre 58

Quadro 4.7 – Gastos energéticos inerentes ao funcionamento de cada subsistema 62

Quadro 4.8 – Alterações provocadas pela modificação do critério de funcionamento 64

Quadro 4.9 – Média da temperatura e humidade relativa de cada subsistema (Norte e Sul) 67

Quadro 4.10 – Humidade relativa média e temperatura média em cada ano analisado 69

Quadro 4.11 – Síntese dos parâmetros analisados do subsistema Norte 69

Quadro 4.12 – Síntese dos parâmetros analisados do subsistema Sul 70

Quadro 5.1 – Síntese dos principais aspetos adjacentes ao funcionamento dos subsistemas de ventilação 75

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Abr - Abril

ACE – Modelo de ascensão capilar e de evaporação

Ago – Agosto

b – espessura da parede [m]

c_p – calor específico do ar [J/(kg.K)]

DEC - Departamento de Engenharia Civil

Dez - Dezembro

Dm – coeficiente de difusão molecular [m²/s]

DP – diferença de pressão [Pa]

e – potencial de evaporação local [m/s]

e_{pm} – potencial de evaporação de Penman-Monteith [m/s]

e_s – potencial de evaporação [m/s]

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Fev – Fevereiro

ha – altura do terreno adjacente à parede [m]

He – radiação [W/m²]

hmáx – altura atingida pela frente húmida [m]

HR – humidade relativa [%]

HRmáx - humidade relativa máxima [%]

HRméd - humidade relativa média [%]

HRmin - humidade relativa mínima [%]

H_s/hs – Altura do sistema [m]

H_{sn} – radiação solar livre [W/m²]

hv – calor latente de evaporação da água [J/kg]

Jan – Janeiro

Jul – Julho

Jun – Junho

L – comprimento do sistema ou da parede [m]

LFC – Laboratório de Física das Construções

Mai – Maio

Mar – Março

N – Norte

Nov – Novembro

OFF - desligado

ON - ligado

Out – Outubro

P – pressão de vapor [Pa]

PVmáx - pressão de vapor máxima [Pa]

PVméd - pressão de vapor média [Pa]

PVmin – pressão de vapor mínima [Pa]

$p(T_{po})$ – pressão parcial de vapor de água pata T_{po} [kPa]

Po – 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]

s – sorptividade do material [$m/s^{1/2}$]

Set – Setembro

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

T – temperatura [ºC]

Tel - telefone

Tmáx - temperatura máxima [ºC]

Tméd – temperatura média [ºC]

Tmin – temperatura mínima [ºC]

To – temperatura à entrada do sistema [ºC]

Ts – temperatura à saída do sistema [ºC]

u – velocidade de circulação do ar [m/s]

v* - concentração de vapor de água na superfície da parede [kg/m^3]

v_o – concentração de vapor de água à entrada do sistema [kg/m^3]

v_s – concentração de vapor de água [kg/m^3]

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]

Wentrada – humidade absoluta do ar à entrada do sistema [kg/m³]

Wsaída – Humidade absoluta do ar à saída do sistema [kg/m³]

UPIN – Universidade do Porto Inovação

Θ – Temperatura do ar [k]

Δ – Taxa de variação da humidade com a temperatura do ar [kPa/K]

ΔPa – Variação da pressão de vapor [Pa]

Δt – Intervalo de tempo [s]

ρ_a – Massa volúmica do ar [kg/m^3]

ρ_w – Massa volúmica da água [kg/m^3]

γ – Constante [kPa/K]

1
INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A presença de água nos edifícios que contêm sais que são por ela transportados, conduz ao aparecimento de patologias e à degradação dos materiais, sendo a correção nem sempre é fácil e eficaz. Este tipo de ocorrências afeta principalmente edifícios antigos, muitos deles pertencentes ao Património Histórico e Monumental. A heterogeneidade dos materiais, a espessura das paredes e a reduzida ventilação são os principais condicionantes no tratamento da humidade ascensional.

Existem várias soluções de tratamento (corte hídrico, redução da secção absorvente, sistema electro-osmótico, drenos atmosféricos, ocultação de anomalias, etc.) que por vezes não funcionam da forma esperada ou então, por razões estéticas e/ou estruturais, não podem ser aplicadas. Sendo Portugal um país com um elevado Património Histórico e Monumental que necessita de ser tratado e conservado, levou o Laboratório de Física das Construções – LFC – da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP a desenvolver uma técnica pioneira que se intitula de "sistema higroregulável de ventilação da base das paredes - HUMIVENT". Esta técnica consiste na ventilação da base das paredes através da instalação de canais associados a um dispositivo mecânico higroregulável que permite a circulação do ar apenas quando as condições de secagem são favoráveis.

Ao longo dos últimos anos foram realizados inúmeros trabalhos no sentido de validar e estudar está técnica inovadora [1], [2], [3].

Inicialmente foram realizados ensaios onde se monitorizou a temperatura e humidade relativa em duas situações distintas, com e sem o sistema de ventilação implementado, e verificou-se que a colocação do sistema é uma boa opção de tratamento [1].

Na sequência dos trabalhos anteriores, foram realizados mais ensaios laboratoriais bem como uma análise "in situ" que tinha por objetivo avaliar a importância das diferentes geometrias, condições climatéricas exteriores, assim como alteração do caudal de ventilação do sistema [2].

Mais recentemente foi elaborado e validado (experimentalmente e numericamente) um modelo (ACE - modelo de ascensão capilar e de evaporação) que permite dimensionar sistemas de ventilação da base das paredes [3].

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Desde a conceção e validação do "sistema higroregulável de ventilação da base das paredes - HUMIVENT" desenvolvido pelo LFC da FEUP, já foram realizados alguns estudos com o intuito de aprofundar o conhecimento relativo ao funcionamento do sistema.

Este trabalho pretende analisar de uma forma mais aprofundada os dados recolhidos da monitorização realizada num edifício Histórico, no Norte de Portugal, relativos a quatro anos completos.

Para tal pretende-se:

- Apresentar o "sistema higroregulável de ventilação da base das paredes - HUMIVENT" desenvolvido no LFC da FEUP;
- Efetuar um levantamento de sistemas atualmente existentes com o mesmo princípio de funcionamento do sistema estudado, baseado na ventilação;
- Apontar outras possíveis aplicações do sistema de ventilação que impliquem o aumento do potencial de evaporação num determinado espaço;
- Efetuar o enquadramento histórico do edifício, neste caso uma Igreja (Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades), assim como a sua caraterização e evolução ao longo dos anos;
- Apresentar uma síntese dos estudos e resultados obtidos até à presente data com os dados recolhidos na monitorização realizada ao sistema implementado;
- Analisar e comparar os dados resultantes da monitorização dos subsistemas instalados a Norte e Sul que compreendem um período ininterrupto de funcionamento de quatro anos de forma a:
    - Relacionar a quantidade de água retirada pelos subsistemas analisados em função da temperatura e da humidade relativa à entrada assim como relacionar a quantidade de água retirada e acumulada por cada subsistema;
    - Analisar a variação da pressão de vapor ao longo do tempo e respetivos períodos de funcionamento dos subsistemas assim como efetuar uma análise económica;
    - Estudar a influência da utilização da Igreja no comportamento do subsistema de ventilação Sul;
    - Comparar o funcionamento dos subsistemas em períodos do dia distintos - dia e noite e determinar a influência da localização no desempenho dos sistemas.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A presente Dissertação de Mestrado está dividida em quatro capítulos principais, para além do Capítulo 1 onde são apresentados o enquadramento e os objetivos gerais do trabalho.

Na segunda parte (Capítulo 2) de caráter essencialmente teórico, apresenta-se o "sistema de ventilação da base das paredes - HUMIVENT", indicam-se os sistemas atualmente existentes com o mesmo princípio de funcionamento assim como outras possíveis aplicações do sistema de ventilação.

Na terceira parte (Capítulo 3) é apresentada a Igreja objeto do presente estudo, bem como as manifestações patológicas que apresentava. Descreve-se o sistema que se encontra atualmente implementado e indicam-se os estudos até à data realizados.

Na quarta parte (Capítulo 4) inicia-se a análise e comparação dos dados resultantes da monitorização realizada ao sistema na Igreja selecionada, durante um período de quatro anos consecutivos. Procurou-se ainda determinar a influência dos vários parâmetros de que o funcionamento do sistema possa estar dependente.

Por último, na quinta parte (Capítulo 5), apresenta-se uma síntese dos principais resultados e conclusões alcançadas assim como possíveis trabalhos futuros neste âmbito.

2

SISTEMA HIGROREGULÁVEL DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES - HUMIVENT

2.1. INTRODUÇÃO

A presença de água nos edifícios conduz a inúmeras patologias, e a sua correção nem sempre é fácil e eficaz. A heterogeneidade dos materiais, a espessura das paredes, a reduzida ventilação são os principais condicionantes no tratamento da humidade ascensional.

No presente capítulo apresenta-se o "sistema higroregulável de ventilação da base das paredes - HUMIVENT" desenvolvido pelo LFC da FEUP que surgiu da necessidade de tratar manifestações relacionadas com a humidade ascensional, assim como os estudos que foram realizados e que contribuíram para o desenvolvimento e evolução do sistema.

Por outro lado, procura-se efetuar um levantamento exaustivo dos sistemas atualmente existentes com o mesmo princípio de funcionamento do sistema estudado baseado na ventilação.

Finalmente, encerra-se o capítulo com outras possíveis aplicações do sistema de ventilação que impliquem o aumento do potencial de evaporação num determinado local, nomeadamente na secagem de paredes na sequência de cheias/inundações e no controlo da humidade relativa em desvãos sanitários.

2.2. O PROBLEMA

2.2.1. A ÁGUA COMO FONTE DE DEGRADAÇÃO

A elevada permeabilidade e porosidade da maioria dos materiais utilizados na construção permitem que a água se movimente no seu interior transportando com ela inúmeros agentes agressores.

A higroscopicidade (função da porometria e porosidade), a capilaridade (função da porometria e porosidade) e a condensação (função da pressão de vapor e pressão de saturação) são os principais mecanismos que condicionam a transferência de humidade em materiais porosos [1].

A água pode ter várias origens, entre as quais: humidade de construção (resulta do processo de construção bem como da composição de muitos materiais que contem água na sua constituição), humidade de condensação (resulta essencialmente do vapor de água contido no ar, que contacto com uma superfície a uma temperatura inferior arrefece e condensa), humidade devida a causas fortuitas (resulta de defeitos de funcionamento ou construção), humidade de precipitação (resulta do efeito da ação do vento, fazendo

com que a água da chuva passe a ter uma componente horizontal), higroscopicidade dos materiais (resulta da capacidade que os materiais têm de fixar e restituir moléculas de água ao ambiente envolvente) e humidade ascensional (resulta da absorção de água por parte dos materiais que se encontram em contacto direto com esta, Figura 2.1) [2].



Fig. 2.1 – Exemplo de humidade ascensional (Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades)

2.2.2. HUMIDADE ASCENSIONAL

A humidade ascensional tem origem nas águas superficiais e/ou freáticas (Figura 2.2). Quando a humidade é oriunda de águas freáticas, a manifestação mantem-se relativamente constante ao longo do ano caso se trate de uma fonte que se encontre permanentemente ativa e atinge um nível mais elevado nas paredes interiores onde as condições de evaporação são geralmente mais desfavoráveis. Quando a humidade é proveniente de águas superficiais, a manifestação varia ao longo do ano, em função das condições climatéricas locais (precipitação, humidade relativa, temperatura e exposição solar) e atinge um nível mais elevado nas paredes exteriores [2].

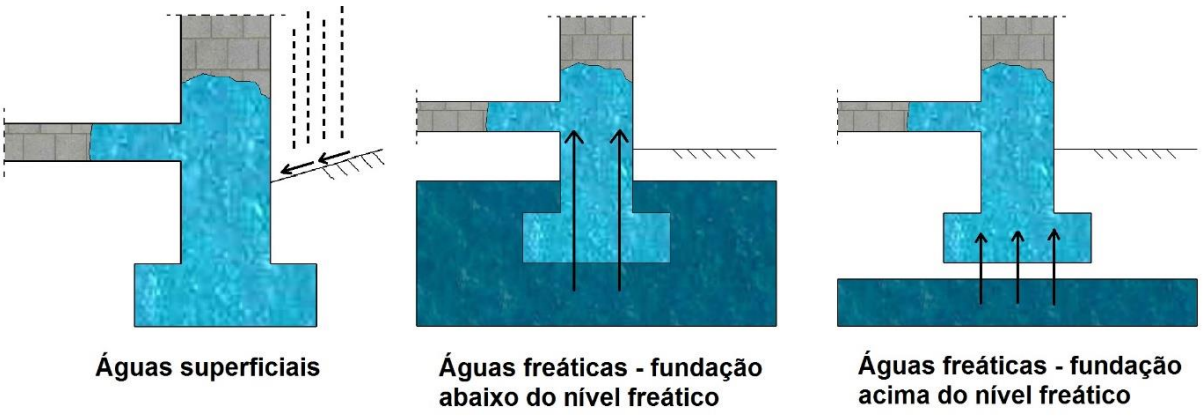


Fig. 2.2 – Origem da humidade ascensional, baseado em [25]

O nível máximo atingido pela frente húmida corresponde ao ponto em que existe equilíbrio entre a água evaporada e a água que é absorvida por capilaridade (Figura 2.3) [1].

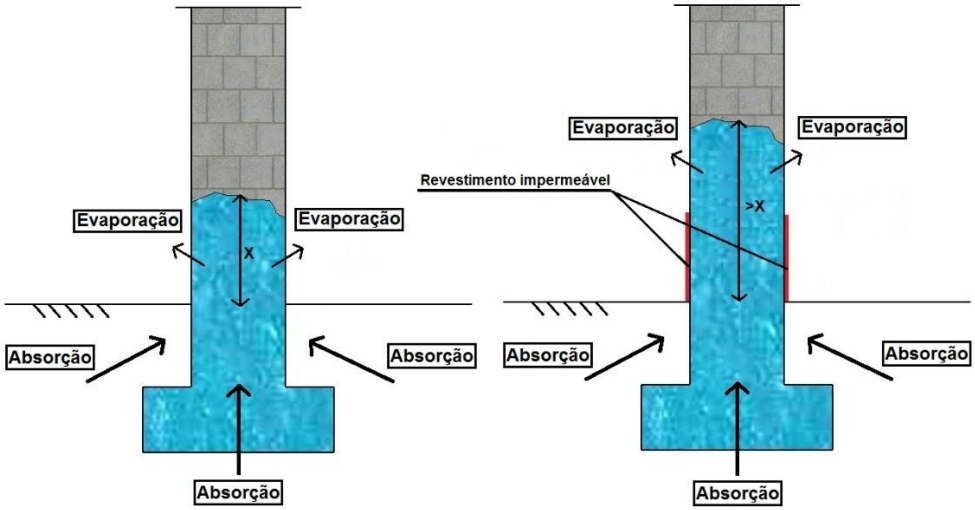


Fig. 2.3 – Equilíbrio entre a água evaporada e água absorvida, baseado em [25]

O nível atingido pela frente húmida depende essencialmente das condições climáticas da ambiência (para valores de humidade relativa baixos e temperatura elevadas, a evaporação será máxima), da presença de sais (aceleram o processo de degradação dos materiais, contribuindo para o aumento da porosidade), da insolação (o aumento da temperatura da face exterior da parede em função do respetivo coeficiente de absorção faz com que acelere o processo de secagem [w/m²]), da porometria dos materiais (a passagem de água no seu interior é tanto menor quanto maior for o diâmetro dos poros), da natureza dos materiais de revestimento (o nível atingido pela frente húmida é tanto maior quanto menor a for a permeabilidade ao vapor do revestimento), e da espessura da parede (quanto maior for a espessura da parede, maior o nível atingido pela frente húmida) [2]. Figura 2.4.

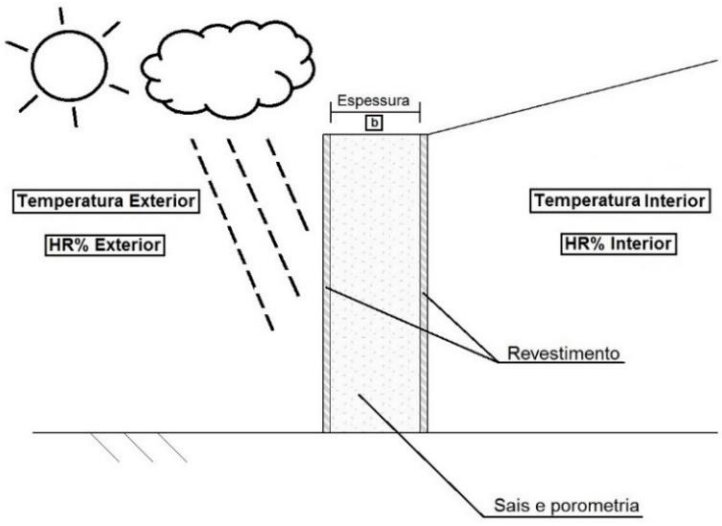


Fig. 2.4 – Fatores que influenciam o nível atingido pela frente húmida

2.2.3. TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DA HUMIDADE ASCENSIONAL

Em função da necessidade de resolver problemas associados a humidades ascensionais, foram desenvolvidas, ao longo do tempo, várias técnicas de tratamento. Na atualidade as mais utilizadas são as seguintes (Figura 2.5) [2]:

- Corte hídrico (impedir a ascensão capilar através da introdução de barreiras físicas (1) ou químicas (difusão (2) ou injeção (3)) na base da parede);
- Redução da secção absorvente (4) (aumento da secção de evaporação e diminuição da ascensão capilar através da abertura de espaços de ar na alvenaria);
- Sistema electro-osmótico (5) (redução da humidade ascensional através da criação de um potencial elétrico contrário ao potencial capilar);
- Drenos atmosféricos (6) (facilitar a evaporação através da introdução de tubos inclinados na base da parede);
- Ocultação de anomalias (revestir a parede com materiais de porometria e porosidade controladas (7), ou colocação de uma nova parede sobre a parede afetada, separada por um espaço de ar (8));
- Ventilação da base das paredes (9) (sistema que permite aumentar o potencial de evaporação na base das paredes, reduzindo a ascensão capilar).

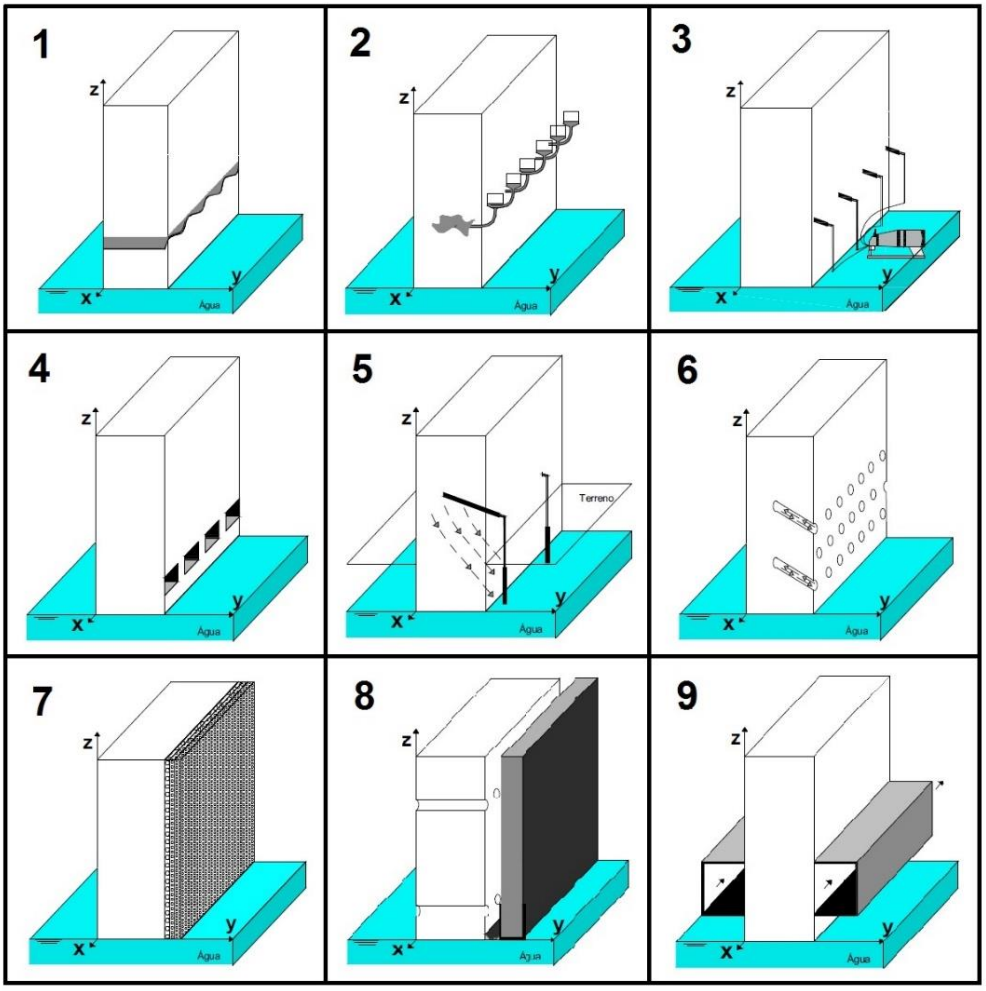


Fig. 2.5 – Tecnologias de tratamento da humidade ascensional [3]

2.3. CARATERIZAÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES

2.3.1. O SISTEMA

O LFC da FEUP tem vindo a desenvolver ao longo dos últimos anos investigação experimental e numérica no sentido de validar uma tecnologia baseada na ventilação higroregulável da base das paredes para tratar a humidade ascensional, patenteando o sistema através da Universidade do Porto – UPIN, intitulado "Sistema Hidro-regulável de Ventilação da Base das Paredes para Tratamento da Humidade Ascensional - HUMIVENT", tendo sida solicitada uma extensão internacional [3], [10].

O sistema HUMIVENT (Figura 2.6 e 2.7) tem como principal objetivo proporcionar condições de secagem e evaporação mais favoráveis na base das paredes. Através da instalação de tubos perfurados ou canais periféricos, associados a um ventilador higroregulável é possível aumentar o potencial de evaporação (função da temperatura, humidade relativa e velocidade do ar próximo da superfície) e por sua vez reduzir o nível atingido pela frente húmida.

O ventilador higroregulável permite que o ar circule apenas quando a pressão de vapor à entrada é menor que à saída, condição essencial para que exista transferência de humidade da parede para o ar que circula no interior da conduta de ventilação [3].

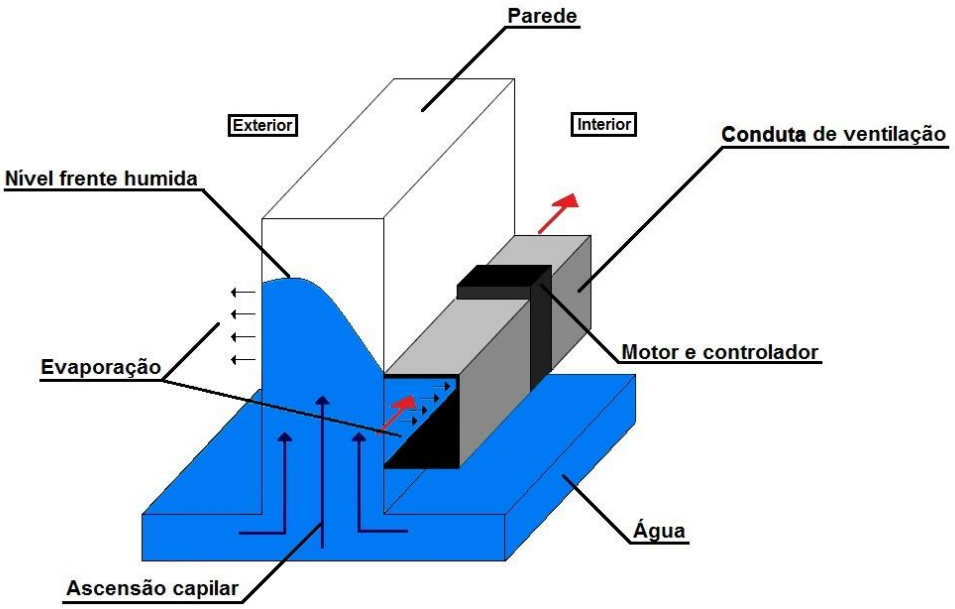


Fig. 2.6 – Ventilação da base das paredes, baseado em [3]

2.3.2. ELEMENTOS CONSTITUINTES DO SISTEMA

O sistema de ventilação HUMIVENT é constituído pelos seguintes elementos:

- Módulo de controlo (data-logger com programador);
- Duas sondas de temperatura e humidade relativa (admissão e exaustão);
- Bateria.

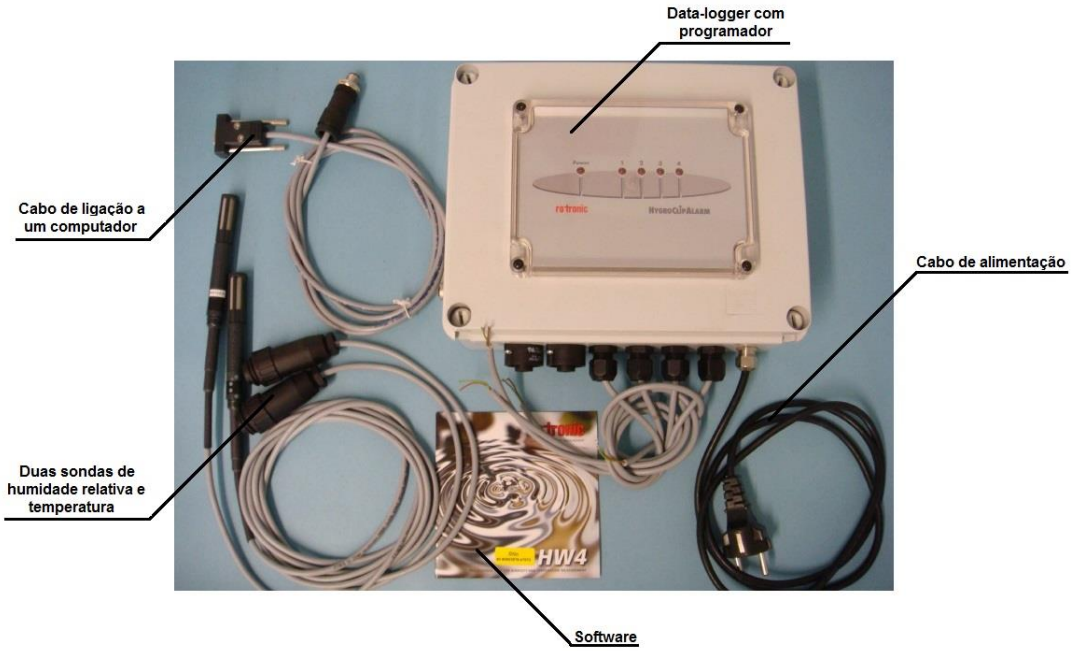


Fig. 2.7 – Sistema HUMIVENT [3]

2.3.3. CRITÉRIOS DE IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA

O sistema só deve ser aplicado quando a cota da fundação é igual ou superior à cota do nível freático. O comprimento deve ser ajustado, sobre pena de perder eficácia. Caso seja possível, é preferível colocar vários sistemas com um comprimento reduzido, do que apenas um de grande desenvolvimento (Figura 2.8). O comprimento é um parâmetro possível de dimensionamento [2].

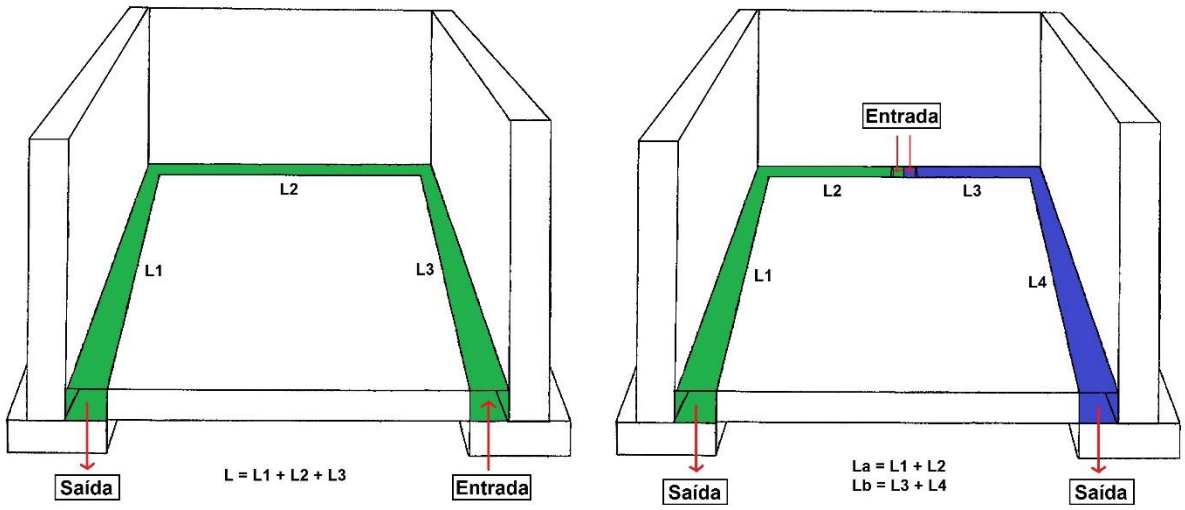


Fig. 2.8 – Alteração/redução do desenvolvimento do sistema

2.3.4. CRITÉRIOS DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

Com o objetivo de reduzir a ocorrência de condensações no interior do sistema (detetadas por observação visual durante os ensaios de validação realizados assim como pelo cálculo diferença de pressão de vapor negativa entre a saída e entrada do sistema) assim como a cristalização e/ou dissolução de sais responsáveis pela deterioração quer dos elementos de construção, quer do próprio sistema, o sistema higroregulável dispõe de um módulo de controlo que aciona ou desliga o ventilador tendo em conta dois critérios de funcionamento (Figura 2.9), a diferença de pressão de vapor (entre a saída e a entrada) e a humidade relativa mínima (à entrada).

O módulo de controlo, através das informações obtidas pelas sondas (temperatura e humidade relativa), calcula a pressão de vapor de água à saída e à entrada do sistema, avaliando se existe um diferencial de pressão positivo ou negativo, garantindo que o sistema só entra em funcionamento quando estiver a retirar água (diferencial positivo). Este verifica ainda o valor da humidade relativa mínima à entrada, acionando ou desligando o ventilador quando tal é necessário, minimizando o risco de cristalização/dissolução de sais. Este critério ainda não foi suficientemente estudado, dada a dificuldade em definir os sais presentes, concentração e mistura [3].

<table>
<tr><th colspan="2">Informação lida</th><th>Informação calculada</th><th>Critério de funcionamento</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Entrada</td><td>HR [%]</td><td rowspan="2">Po [Pa]</td><td rowspan="4">Ps > Po
e
HR > x
(x -> Valor pré-determinado, em função dos sais existentes)</td></tr>
<tr><td>T [ºC]</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Saída</td><td>HR [%]</td><td rowspan="2">Ps [Pa]</td></tr>
<tr><td>T [ºC]</td></tr>
</table>

Fig. 2.9 – Funcionamento do sistema HUMIVENT [3]

2.4. EVOLUÇÃO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES AO LONGO DO TEMPO

2.4.1. ANO 2000

Na sequência da necessidade de resolver problemas relacionados com a humidade ascensional em paredes de elevada espessura de Monumentos do Património Histórico Nacional, tendo por base a informação empírica, surgiu a ideia de ventilar a base das paredes de forma natural (sob a ação do efeito térmico e do efeito da ação do vento) de forma a facilitar a secagem das mesmas. Esta primeira versão do sistema foi aplicada no início da década, pelo Professor Doutor Vasco Peixoto de Freitas, em alguns edifícios.

2.4.2. ANO 1999-2004

Tendo demonstrado resultados práticos muito favoráveis no tratamento de humidades ascensionais em edifícios com paredes de elevada espessura, o conceito foi alvo de grande interesse e vários estudos foram realizados. Rapidamente o sistema evoluiu e a ventilação passou a ser a cargo de um dispositivo mecânico inicialmente acionado quando a humidade relativa à entrada fosse inferior à registada à saída do sistema. A validação experimental e numérica do sistema foi levada a cabo na dissertação de doutoramento apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra pela Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres [1] onde se estudou o comportamento de uma parede na qual foi colocada uma caixa de ventilação de cada lado (Figura 2.10). O sistema ficou permanentemente em

funcionamento durante todo o ensaio experimental, de forma a garantir que as condições (humidade relativa e temperatura) no interior do canal de ventilação fossem idênticas às do laboratório [1].

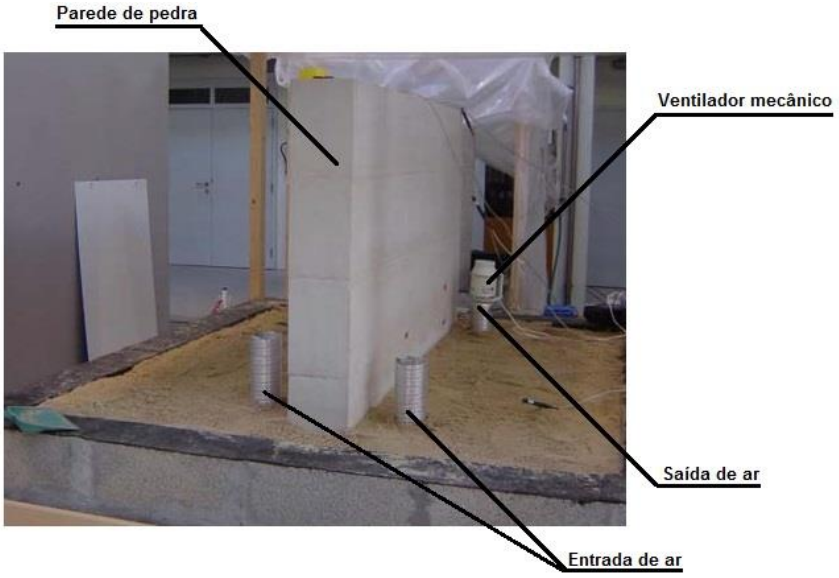


Fig. 2.10 – Modelo experimental [1]

Esta primeira análise experimental realizada permitiu concluir que o sistema funciona eficazmente na redução da altura atingida pela frente húmida [1].

Os resultados obtidos pela análise numérica levada a cabo no âmbito do mesmo trabalho, através do software WUFI-2D [26] (desenvolvido no "Fraunhofer Institut für Bauphysik" em Holzkirchen, Alemanha, permite simular a transferência bidimensional de humidade e calor em elementos e materiais de construção), permitiram chegar a conclusões muito análogas às obtidas experimentalmente. No entanto foi verificado um ligeiro atraso no avanço da frente húmida em relação aos ensaios experimentais, indicando que provavelmente o problema estaria nas interfaces entre camadas segundo Professor Doutor Vasco Peixoto de Freitas [24], [1].

2.4.3. ANO 2005-2007

Na sequência da realização de mais estudos e ensaios laboratoriais, desta vez no âmbito da dissertação de mestrado apresentada à FEUP pela Professora Doutora Ana Sofia dos Santos Guimarães Teixeira [2], foi possível caraterizar o sistema no que diz respeito à sua geometria, caudal de ventilação e influência das condições climáticas exteriores.

Foram ensaiados em laboratório vários sistemas, fazendo variar a impermeabilização do sistema em cada uma delas: sem impermeabilização do sistema apenas na parte vertical superior (configuração A, Figura 2.11), impermeabilização no paramento horizontal e vertical superior (configuração B, Figura 2.12) e impermeabilização total do sistema (configuração C, Figura 2.13), exceto na face em contacto com a parede [2].

-

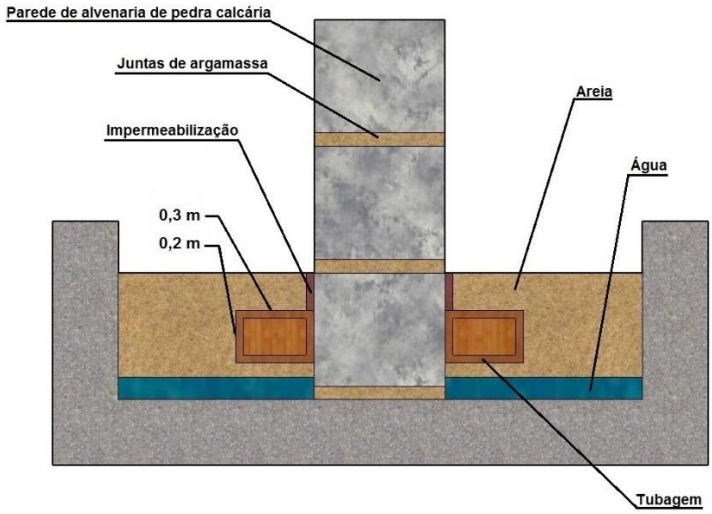


Fig. 2.11 – Configuração A

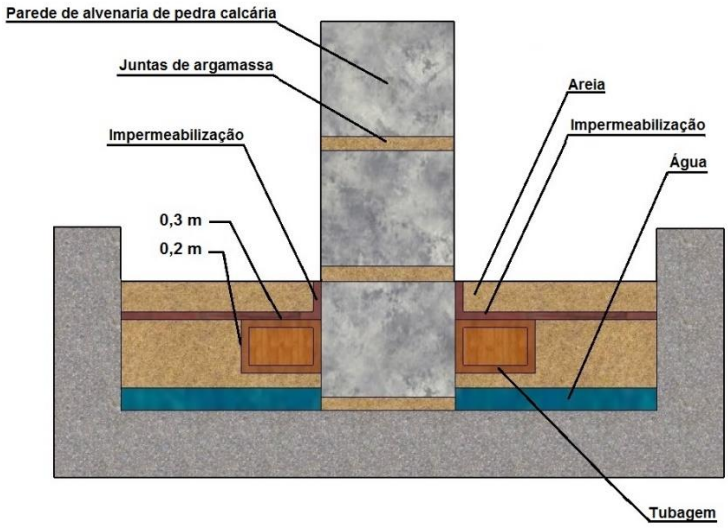


Fig. 2.12 – Configuração B

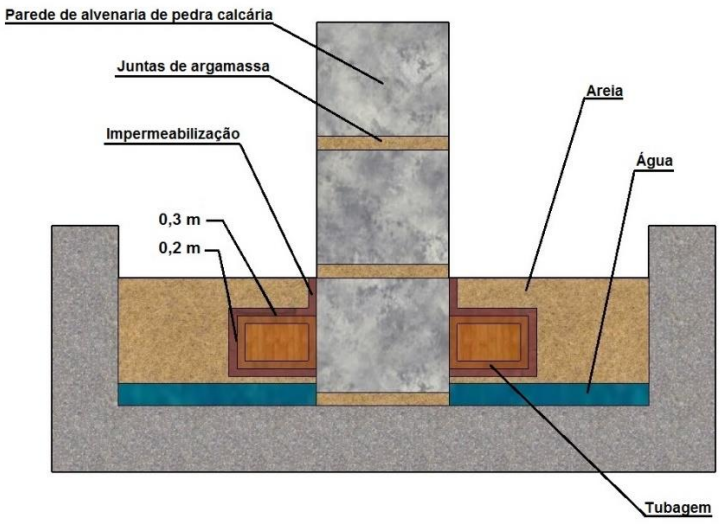


Fig. 2.13 – Configuração C

Foram colocadas duas sondas de humidade relativa e de temperatura à entrada, à saída e a meio do compartimento do sistema de ventilação, que por sua vez se encontravam ligadas a um *data-logger* ligado a um programador (aparelho que permite o registo da informação dos vários sensores em simultâneo assim como enviar os mesmos posteriormente para um computador), que registava os dados de trinta em trinta minutos (Figura 2.14) [2].

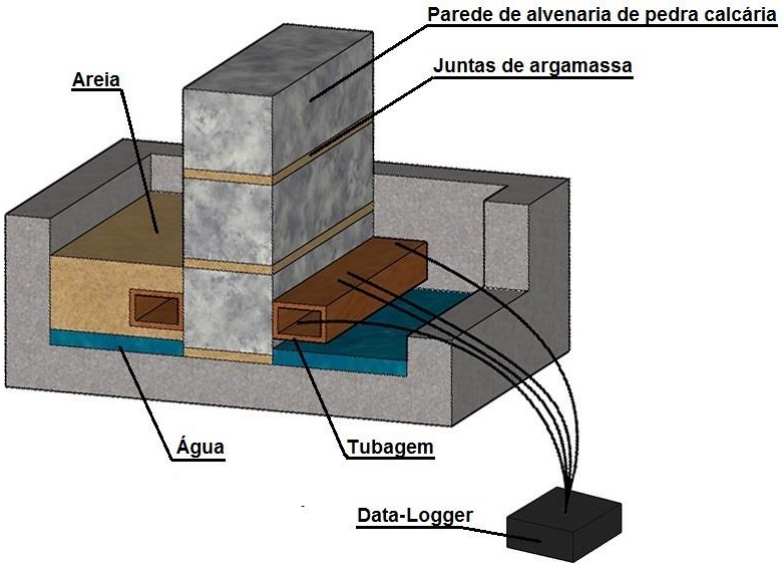


Fig. 2.14 – Posicionamento das sondas (3D)

Através dos valores de humidade relativa e temperatura obtidos foi possível determinar a pressão de vapor à entrada e saída do sistema, bem como a quantidade de água retirada com auxílio das expressões 2.1 e 2.3 respetivamente. Com recurso a um anemómetro de alta precisão e a um reóstato, a velocidade do ar no interior do sistema foi medida e alterada ao longo de cada ensaio [2].

$$P = \frac{611.e^{\left[\frac{17{,}08*\theta}{234.18+\theta}\right]}.HR}{100} \tag{2.1}$$

em que:

P – Pressão de vapor [Pa];

θ – Temperatura do ar [°C];

HR – Humidade Relativa [%].

$$w = 0.002167.\frac{P}{\theta} \tag{2.2}$$

em que:

w – Humidade absoluta do ar [kg/m³];

P - Pressão de vapor [Pa];

θ – Temperatura do ar [K].

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

em que:

W - Quantidade de água retirada pelo sistema [kg];

Wsaída – Humidade absoluta do ar à saída do sistema [kg/m³];

Wentrada – Humidade absoluta do ar à entrada do sistema [kg/m³];

Q – Caudal de ventilação [m³/s];

Δt – Intervalo de tempo [s].

Para valores elevados de humidade relativa exterior, a configuração A apresentou condensações no interior do sistema, enquanto que para valores de humidade relativa baixos, o sistema funcionou eficazmente. Quanto menor for a pressão de vapor à entrada do sistema, maior a capacidade que o sistema tem para retirar água. No que diz respeito à velocidade de circulação do ar no interior do sistema, o incremento na eficiência do sistema em função do aumento de velocidade não é muito relevante permitindo a utilização de ventiladores económicos e silenciosos.

Uma vez que a configuração B se encontrava impermeabilizada em todo o paramento superior, esta apresentou melhores resultados face à configuração A. O fluxo transportado aumenta para condições de temperatura elevada aliadas a uma humidade relativa baixa, o que demonstra a importância que as condições ambientais exteriores tem no fluxo transportado.

Relativamente à configuração C, foi a configuração que apresentou melhores resultados, apesar de apresentar baixos fluxos. O sistema retirou água permanentemente, evitando a ocorrência de condensações no interior e contribuindo para a durabilidade do sistema.

Na configuração A e B existe contacto direto do sistema (conduta de ventilação) com o terreno, podendo existir absorção de água a partir deste, situação esta indesejável que poderá reduzir a eficácia do sistema.

Nos casos em que a pressão de vapor à entrada é superior à pressão de vapor a saída, ocorrem condensações no interior do sistema. Ao longo do desenvolvimento do sistema o ar que por ele circula vai condensando fazendo com que este perca eficácia [2].

Na figura que se segue na página seguinte (Figura 2.15) apresenta-se a quantidade acumulada de água retirada pelo sistema em casa configuração.

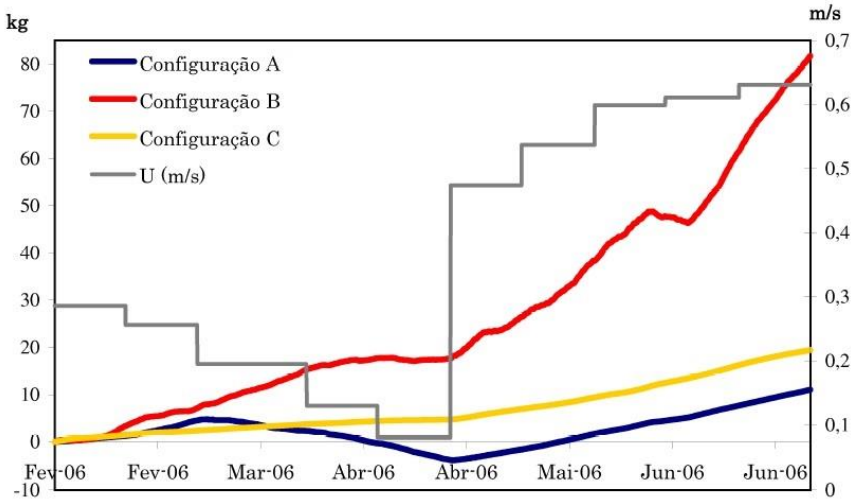


Fig. 2.15 – Quantidade acumulada de água retirada em cada configuração [2]

Um sistema higroregulável onde se garanta a impermeabilização total do sistema permite que apenas retire água da parede, contribuindo para a eficácia do mesmo. Como já foi referido, no sentido de reduzir a ocorrência de dissolução e cristalização de sais, o sistema permite ainda limitar o valor da humidade relativa [2].

É apresentado no Quadro 2.1 o teor de humidade relativa de equilíbrio de alguns sais a 20°C. O teor de humidade relativa de equilíbrio corresponde ao ponto de viragem do estado do sal, isto é, um valor acima do valor de equilíbrio, o sal encontra-se dissolvido, um valor abaixo, o sal encontra-se cristalizado. Tendo em conta que de zona para zona o tipo de sais presentes varia consideravelmente, um correto dimensionamento do critério que limita o valor de humidade relativa deveria ter em conta essa variação [4].

Quadro 2.1 – Teor de humidade relativa de equilíbrio de alguns sais a 20°C [4]

Sulfato de Sódio	100%	Cloreto de sódio	75%
Sulfato de potássio	98%	Nitrato de sódio	75%
Nitrato de potássio	94%	Nitrato de amónio	66%
Sulfato de sódio	92%	Nitrato de cálcio	56%
Sulfato de magnésio	90%	Nitrato de manganésio	53%
Cloreto de potássio	85%	Cloreto de magnésio	44%
Sulfato de amónio	81%	Cloreto de cálcio	33%
Cloreto de amónio	80%		

2.4.4. ANO 2008-2011

Na sequência dos estudos elaborados anteriormente pela Professora Doutora Ana Sofia dos Santos Guimarães Teixeira [3], surgiu a necessidade de desenvolver um modelo de dimensionamento do sistema que seja capaz de prever, quantificar e otimizar o seu desempenho.

Para tal foi elaborado um modelo de evaporação e transporte de água com o objetivo de estimar o potencial de evaporação de um sistema de ventilação da base das paredes com base no comportamento do ar no interior do sistema, do qual resultou um conjunto de equações matemáticas obtidas por resolução analítica ou numérica que caraterizam os fenómenos envolvidos (Figura 2.16). Em função do ambiente local e das caraterísticas geométricas do sistema (comprimento e altura do canal), estas equações permitem estimar o potencial de evaporação do sistema e_s [m/s], assim como a concentração de vapor de água à saída do sistema de ventilação v_s [kg/m³] [3].

Analiticamente	Numericamente
$u\frac{\partial v}{\partial x}=D_m\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$ (2)	$u\frac{\partial v}{\partial x}=D_m\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+D_m\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ (1)
$n=\int_0^L Nh_s dx=(v^*-v_0)h_s L\sqrt{\frac{4D_m}{\pi L/u}}$ (6)	$n=\sum_i h_s(x_{i+1}-x_i)\frac{-D_m\left(\left.\frac{\partial v}{\partial y}\right\|_{i,1}+\left.\frac{\partial v}{\partial y}\right\|_{i+1,1}\right)}{2}$ (16)
$n=Q(v_s-v_0)$ (21)	
$v_s=v_0+\frac{D_m}{Q}h_s(v^*-v_0)\left(\frac{4}{\pi}\frac{uL}{D_m}\right)^{1/2}$ (24)	$v_s=v_0+\frac{D_m}{Q}h_s(v^*-v_0)\left[\frac{2}{\pi}\left(\frac{uL}{D_m}\right)^{1/4}+\frac{4}{\pi}\left(\frac{uL}{D_m}\right)\right]^{1/2}$ (22)
$e_s=\frac{(v^*-v_0)}{\rho_w}\sqrt{\frac{4D_m}{\pi L/u}}=\frac{D_m(v^*-v_0)}{\rho_w.L}\sqrt{\frac{4}{\pi}\frac{uL}{D_m}}$ (26)	$e_s=\frac{D_m(v^*-v_0)}{\rho_w.L}\left[\frac{2}{\pi}\left(\frac{uL}{D_m}\right)^{1/4}+\frac{4}{\pi}\left(\frac{uL}{D_m}\right)\right]^{1/2}$ (27)

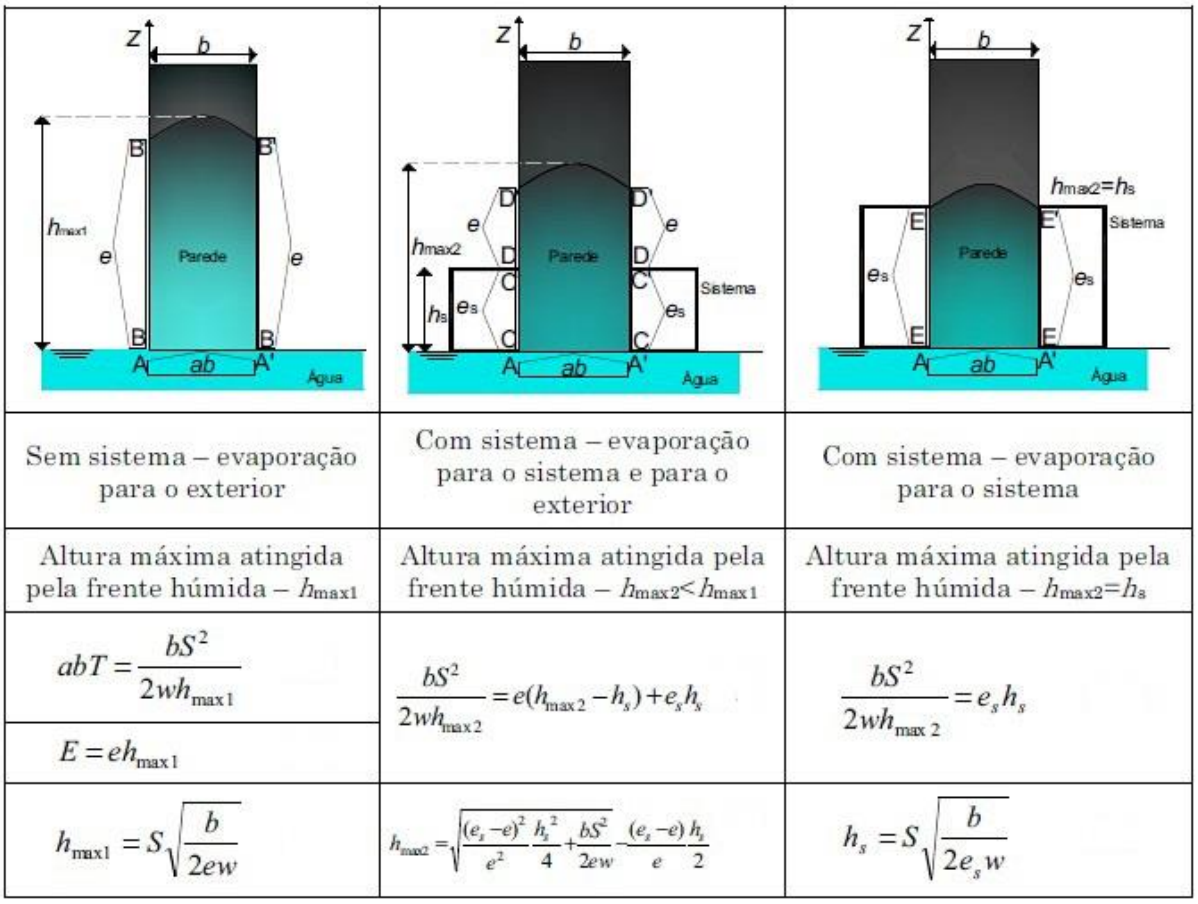
Fig. 2.16 – Equações matemáticas analíticas e numéricas resultantes [3]

Apesar das simplificações efetuadas na elaboração do modelo, com base nos resultados obtidos em estudos realizados anteriormente foi possível validar a sua utilização.

Uma análise de sensibilidade dos parâmetros de cálculo permitiu concluir que a taxa de evaporação cresce diretamente com a altura do sistema h_s [m] e com a raiz quadrada da velocidade u [m/s] do ar no interior da conduta, decresce com o aumento do comprimento L [m] e cresce com coeficiente de difusão molecular D_m [m²/s].

Quanto maior for a altura do sistema h_s [m] e a velocidade u [m/s] e menor o comprimento L [m], maior a eficácia do sistema.

De forma a avaliar as alterações produzidas pelo sistema de ventilação na redução da altura atingida pela frente húmida é adaptado um modelo já existente (modelo "*Sharp Front*), em que se considera agora as alterações provocadas pelo funcionamento do sistema. Daqui resultou um modelo designado de modelo ACE (modelo de ascensão capilar e de evaporação) (Figura 2.17) [3].



Sem sistema – evaporação para o exterior	Com sistema – evaporação para o sistema e para o exterior	Com sistema – evaporação para o sistema
Altura máxima atingida pela frente húmida – h_{max1}	Altura máxima atingida pela frente húmida – $h_{max2} < h_{max1}$	Altura máxima atingida pela frente húmida – $h_{max2} = h_s$
$abT = \frac{bS^2}{2wh_{max1}}$ $E = eh_{max1}$	$\frac{bS^2}{2wh_{max2}} = e(h_{max2} - h_s) + e_s h_s$	$\frac{bS^2}{2wh_{max2}} = e_s h_s$
$h_{max1} = S\sqrt{\frac{b}{2ew}}$	$h_{max2} = \sqrt{\frac{(e_s - e)^2}{e^2}\frac{h_s^2}{4} + \frac{bS^2}{2ew}} - \frac{(e_s - e)}{e}\frac{h_s}{2}$	$h_s = S\sqrt{\frac{b}{2e_s w}}$

Fig. 2.17 – Equações matemáticas resultantes [3]

Limitações do modelo ACE [3]:

- O modelo apenas considera paredes constituídas por um único material;
- O modelo apenas considera a absorção de água na base da parede;
- O modelo considera um claro limite definido para a altura máxima atingida pela frente húmida.

A validação do modelo ACE foi efetuada com recurso a simulações numéricas (WUFI 2D, desenvolvido no "Fraunhofer Institut für Bauphysik" em Holzkirchen, Alemanha), assim como de ensaios experimentais realizados em estudos anteriores.

Com o recurso ao programa WUFI 2D foram estudadas três configurações (sem o sistema de ventilação instalado, sem o sistema de ventilação instalado e com areia nos dois lados da parede e com o sistema de ventilação instalado e com areia nos dois lados da parede), tendo-se verificado uma proximidade entre os valores calculados através do modelo ACE e os obtidos com o programa WUFI 2D.

De forma a possibilitar efetuar estudos de sensibilidade, assim como pré-dimensionar um sistema de ventilação da base das paredes com base no modelo ACE, foram desenvolvidas um conjunto de folhas de cálculo programadas em Excel, que em conjunto constituem o programa HUMIVENT predim (Figura 2.18). O programa permite relacionar a altura máxima atingida pela frente húmida na presença de um sistema de ventilação com a velocidade de circulação do ar no seu interior e com o comprimento do sistema. Para tal é necessário ter conhecimento da espessura da parede *b* [m], sorptividade do material

s [m/s$^{1/2}$], teor de humidade volúmico *w* [m3/m^3], coeficiente de difusão molecular D_m [m^2/s], concentração de vapor de água na superfície da parede *v** [kg/m^3], concentração de vapor de água à entrada do sistema *vo* [kg/m^3], altura do terreno adjacente à parede *ha* [m], e potencial de evaporação local *e* [m/s] [3].

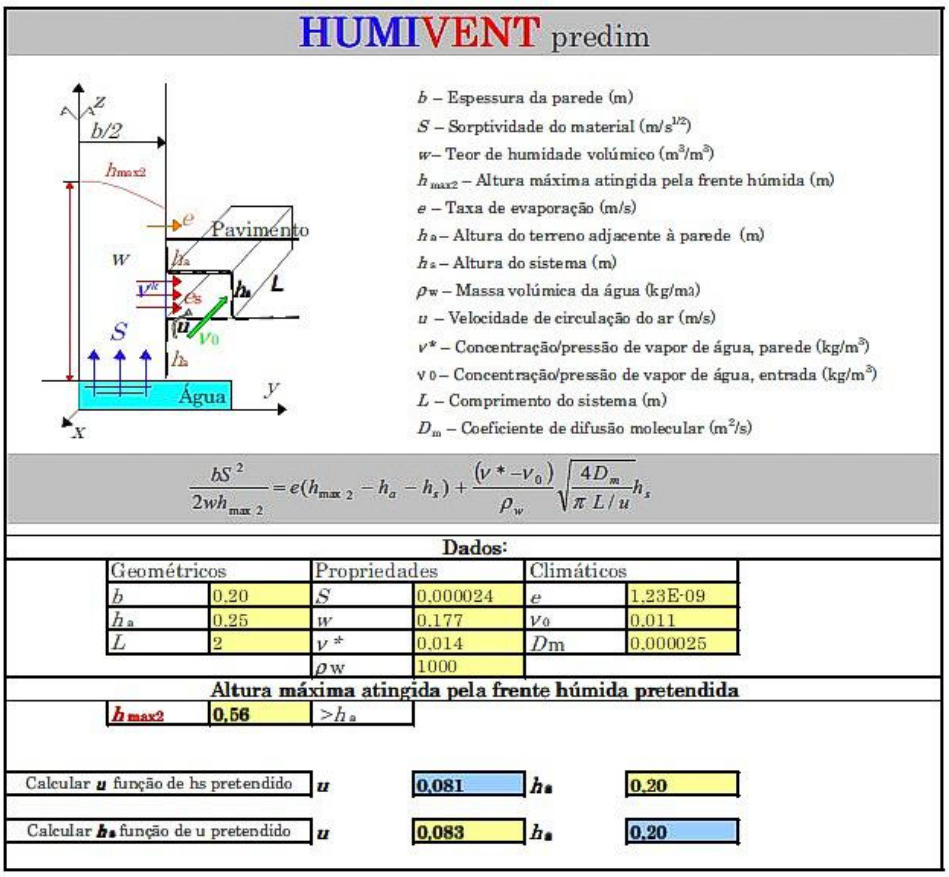


Fig. 2.18 – Folha de cálculo HUMIVENT predim [3]

Para avaliar o potencial de evaporação do ar exterior, foram analisadas duas fórmulas existentes na bibliografia, fórmula de Penman-Monteith [28] (Expressão 2.4) e fórmula de Oudin, L. [27] (Expressão 2.5). Ambas apresentam resultados semelhantes, no entanto a fórmula de Oudin, L. é a mais indicada uma vez que considera a evaporação em elementos verticais.

O dimensionamento deverá ser efetuado para um valor do potencial de evaporação que seja superado pelo menos 2/3 do ano [4].

$$epm = \frac{1}{hv\rho w}\frac{\Delta(Hsn)+\frac{\rho acp(psat(Ta)-p(Tpo))}{ra}}{\Delta+\gamma(1+\frac{rs}{ra})} \quad (2.4)$$

em que:

e_{pm} – Potêncial de evaporação de Penman-Monteith [m/s];

h_v – Calor latente de evaporação da água [$h_v \cong 2{,}45.10^6$ J/kg];

ρ_w – Massa volúmica da água [kg/m^3];

Δ – Taxa de variação da humidade com a temperatura do ar [kPa/K];

H_{sn} – Radiação solar livre [W/m^2];

ρ_a – Massa volúmica do ar [kg/m^3];

c_p – Calor específico do ar [$c_p \cong 1013$ J/(kg.K)];

$p_{sat}(T_a)$ – Pressão de saturação para T_a [kPa];

$p(T_{po})$ – Pressão parcial de vapor de água para T_{po} [kPa];

r_a – Resistência aerodinâmica [m/s];

γ – Constante [$\gamma \cong 0{,}0066$ kPa/K];

r_s – Resistência superficial [$r_s \cong 70$s/m].

$$e_0 = \begin{cases} \frac{He}{hv\rho w}\frac{Ta+5}{100} & se\ Ta+5>0 \\ 0 & restantes \end{cases} \quad (2.5)$$

em que:

h_v – Calor latente de evaporação da água [$h_v \cong 2{,}45.10^6$ J/kg];

ρ_w – Massa volúmica da água [kg/m^3];

H_e – Radiação [W/m^2].

2.5. SISTEMAS SIMILARES

Ao longo dos anos a preocupação no tratamento de problemas relacionados com a humidade ascensional tem vindo a aumentar, tal preocupação levou a que fossem desenvolvidos inúmeros sistemas de tratamento, muitos deles com eficácia e aplicabilidade reduzida. De seguida apresentam-se de forma sucinta os sistemas existentes que têm como princípio de funcionamento a ventilação da base das paredes afetadas pela humidade ascensional.

2.5.1. TUBOS DE AREJAMENTO

Os tubos de arejamento, também denominados por drenos atmosféricos, foram desenvolvidos por Knapen com o intuito de diminuir o potencial capilar, facilitando a evaporação/ventilação da base da parede. O princípio de funcionamento baseia-se no simples facto de o ar húmido ser mais pesado que o ar seco, deslocando-se para o exterior provocando a recirculação entre ar seco e húmido no seu interior (Figura 2.19). Os tubos tem 3cm de diâmetro interior e variam entre 10 a 50cm de comprimento. São dispostos em quincôncio e inclinados 25° com a horizontal. Apesar de se tratar de um sistema de fácil execução e económico, a sua aplicação é muito reduzida. A eficácia reduzida (especialmente em paredes espessas) e as alterações arquitetónicas desagradáveis introduzidas pelo sistema são os principais condicionantes à sua utilização [3], [10].

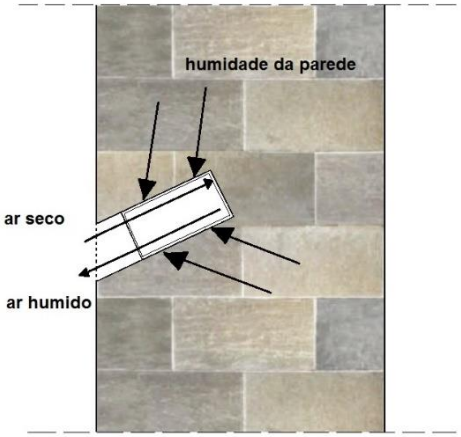


Fig. 2.19 – Tubos de arejamento

2.5.2. TUBOS CERÂMICOS DE VENTILAÇÃO DO RODAPÉ

O sistema consiste na introdução de tubos cerâmicos anexados a um rodapé na base das paredes afetadas pela humidade ascensional, transportando a humidade para o exterior (Figura 2.20) [10].

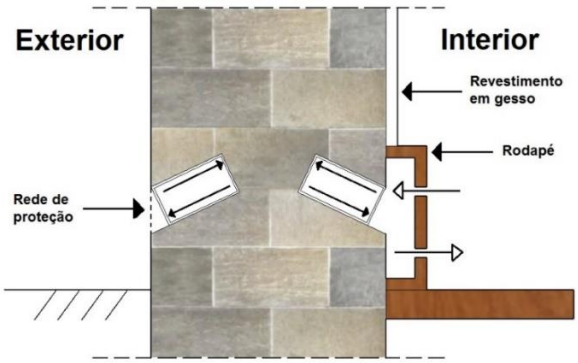


Fig. 2.20 – Rodapé ventilado

O sistema combina os tubos de arejamento com um rodapé ventilado, permitindo a circulação do ar no seu interior e por sua vez acelerar o processo de evaporação.

O rodapé de plástico é feito à medida permitindo uma grande versatilidade de aplicações. Possui dois orifícios protegidos por grelhas, de forma a impedir entrada ou saída de insetos. A ventilação no interior dá-se por processos naturais, nomeadamente pelo efeito térmico.

Os orifícios dos tubos são envolvidos por uma argamassa que garante um melhor contacto entre o tubo e a parede.

Para evitar o aparecimento de patologias associadas à humidade ascensional no revestimento interior, este começa apenas a partir da parte superior do rodapé, reduzindo a possível passagem de humidade dos tubos para o revestimento.

A semelhança dos tubos de arejamento de Knapen, esta técnica também apresenta uma alteração estética das paredes, embora de forma mais reduzida. Outro inconveniente subjacente à sua utilização prende-

se com o facto da humidade retirada da parede pelo sistema ser transportada para o interior do compartimento aumentando o teor de humidade relativa e facilitando o aparecimento de novas patologias [10].

2.5.3. SIFÃO ATMOSFÉRICO DE DUAS VIAS PARA A SECAGEM DE MUROS

O sistema é composto por duas peças cerâmicas unidas por colagem entre si dando origem a um sifão atmosférico. Um tubo superior de paredes lisas conduz o ar proveniente do exterior até ao tubo inferior que por sua vez absorve a humidade da parede e a transporta para o exterior, facilitando e acelerando o processo secagem, quer pelo impulso de gases ascensionais, quer por ação osmótica e capilar (Figura 2.21) [10].

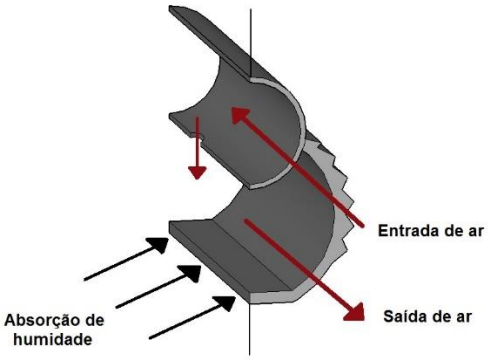


Fig. 2.21 – Sifão atmosférico

O grande inconveniente da aplicação deste método prende-se com o facto de este apenas poder ser aplicado em paredes até cinquenta centímetros de espessura, o que limita muito o seu emprego quando se pretende tratar edifícios antigos, na sua grande maioria com paredes de elevada espessura.

Este método depara-se ainda com problemas de circulação de ar. A diferença de densidade do ar no interior do sistema pode não ser suficiente para provocar uma circulação contínua e eficiente [10].

2.5.4. DRENAGEM DE PAREDES ENTERRADAS

O sistema tem como principal objetivo efetuar a drenagem das paredes enterradas, fundadas sobre sapatas, circundantes de um edifício com pavimento térreo de betão. É composto por duas peças, uma conduta vertical encostada à base da parede que permite efetuar a drenagem da parede e uma segunda conduta horizontal independente da conduta vertical com aberturas ao longo do seu desenvolvimento, permitindo a drenagem do solo (Figura 2.22). Para evitar condensações no pavimento é colocada uma camada de isolamento térmico na parte superior da conduta horizontal.

Trata-se de uma solução limitada que apenas pode ser aplicada num determinado tipo de solução construtiva (paredes enterradas fundadas em sapatas com pavimento térreo de betão). A circulação de ar húmido faz-se para o interior do compartimento aumentando a humidade relativa interior e facilitando o aparecimento de novas patologias [13].

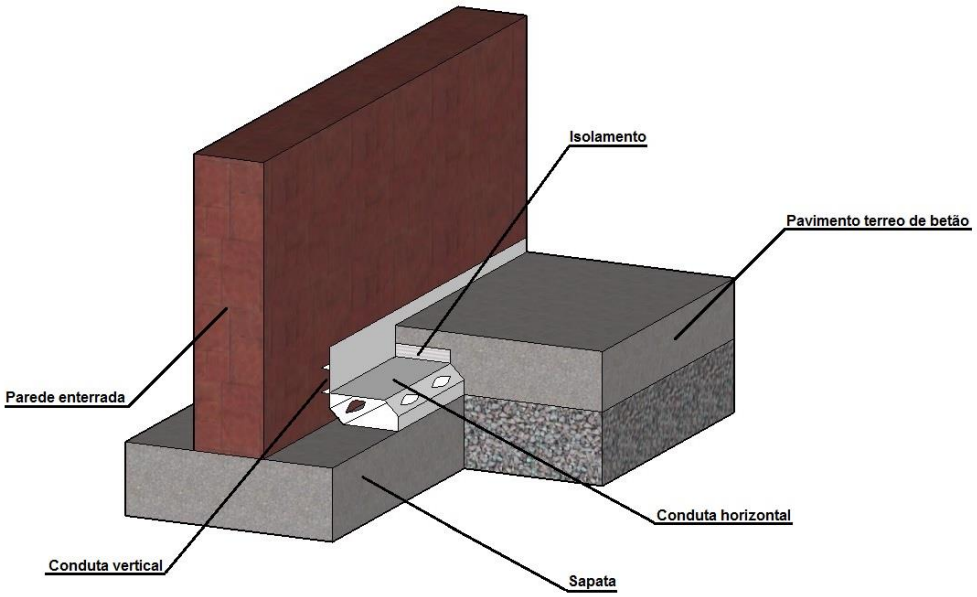


Fig. 2.22 – Drenagem de parede enterrada

2.5.5. SISTEMA DE VENTILAÇÃO PARA IMPERMEABILIZAÇÃO ESTRUTURAL

O sistema consiste na instalação de uma conduta no lado interior da parede que através de meios mecânicos faz circular ar no seu interior aumentando o potencial de evaporação da base da parede. O ar admitido é proveniente do interior do compartimento e extraído para o exterior. Para aumentar a eficiência do sistema, pode ser adicionado um desumidificador o mais próximo possível do local de admissão de ar assim como um sensor que determina a humidade relativa à entrada do sistema acionando ou desligado o mesmo sempre que for conveniente (Figura 2.23) [14].

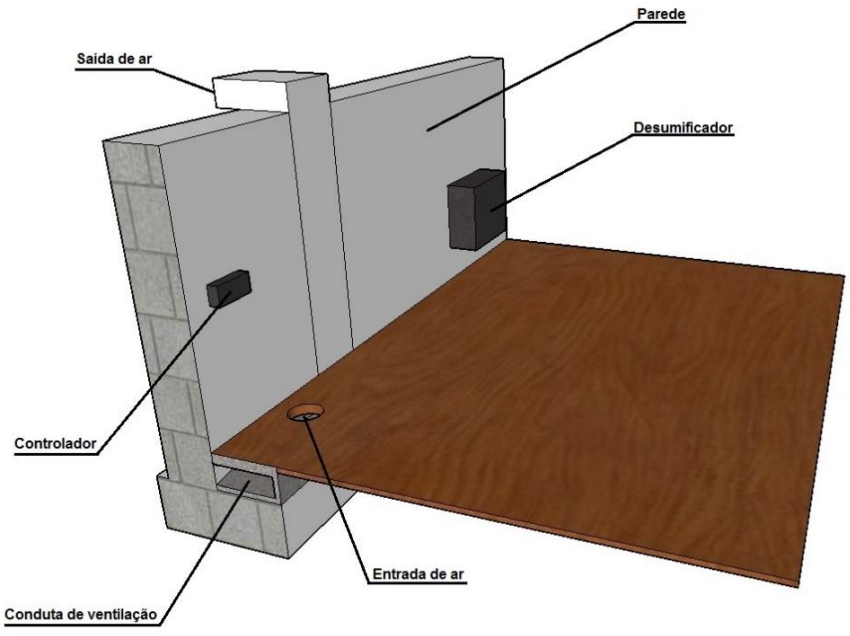


Fig. 2.23 – Sistema de ventilação da estrutura

A grande diferença para o sistema HUMIVENT (sistema de ventilação da base das paredes) prende-se com o facto de o este ser um sistema higroregulável, entrando em funcionamento apenas quando as condições de secagem são favoráveis.

Trata-se de um sistema eficaz no tratamento de humidades ascensionais sem elevados custos de instalação, manutenção e utilização [14].

2.5.6. SISTEMA DE VENTILAÇÃO DE FUNDAÇÕES

O sistema permite reduzir a área da secção absorvente e aumentar o potencial de evaporação na base da parede e por sua vez reduzir o nível atingido pela humidade ascensional. Tal é possível através da instalação de uma conduta de betão (em forma de arco) ventilada, entre o lado exterior da parede e solo envolvente (Figura 2.24). A troca entre o ar exterior e interior do sistema dá-se através de pelo menos uma abertura para o exterior [15].

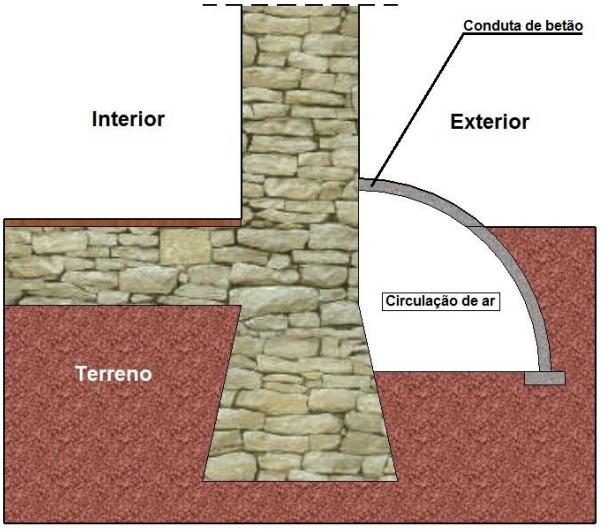


Fig. 2.24 – Conduta de betão ventilada

O facto de o sistema ser colocado no lado exterior, reduz os custos de instalação.

É uma solução interessante que permite atenuar os efeitos da humidade ascensional tanto em edifícios recentes como em edifícios antigos (monumentos históricos com paredes de elevada espessura) [15].

2.6. OUTRAS APLICAÇÕES DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES

Comprovada a eficácia do sistema de ventilação da base das paredes no tratamento da humidade ascensional surgiu a ideia de adaptar o sistema a outras situações que implicassem o controlo da humidade. A secagem de paredes na sequência de cheias/inundações e o controlo de humidade relativa em desvão sanitário foram duas novas aplicações do sistema.

2.6.1. SECAGEM DE PAREDES NA SEQUÊNCIA DE CHEIAS/INUNDAÇÕES

O sistema de ventilação da base das paredes foi desenvolvido com o principal objetivo de tratar problemas relacionados com humidade ascensional, no entanto tendo em conta os princípios de funcionamento do sistema chegou-se à conclusão [29] que a sua aplicação pode ser alargada a outros domínios, nomeadamente no auxílio à secagem de paredes, na sequência de cheias e inundações (Figura 2.25).

Os primeiros estudos realizados neste sentido foram levados a cabo pela Professora Doutora Maria Isabel Morais Torres e pelo Engenheiro Óscar López López em 2015. A solução inicialmente utilizada para tratar humidades ascensionais poderá ser adaptada para auxiliar o processo de secagem de uma parede na sequência de uma inundação/cheia [29], [9].

Estudos realizados posteriormente no âmbito da dissertação apresentada por Maria Martins [9] à FEUP permitiram comprovar a sua eficácia na diminuição da altura atingida pela frente húmida na sequência de uma inundação, independentemente da espessura da parede. Foi possível também chegar à conclusão que existe um "limite" para aumentar o Rph (número de renovações horárias) a partir do qual se deixa de notar um efeito significativo, sendo esse valor aproximadamente 60 Rrh.

O mesmo se aplica à geometria do sistema, só tem interesse aumentar as suas dimensões até 0.4m x 0.4m [9].

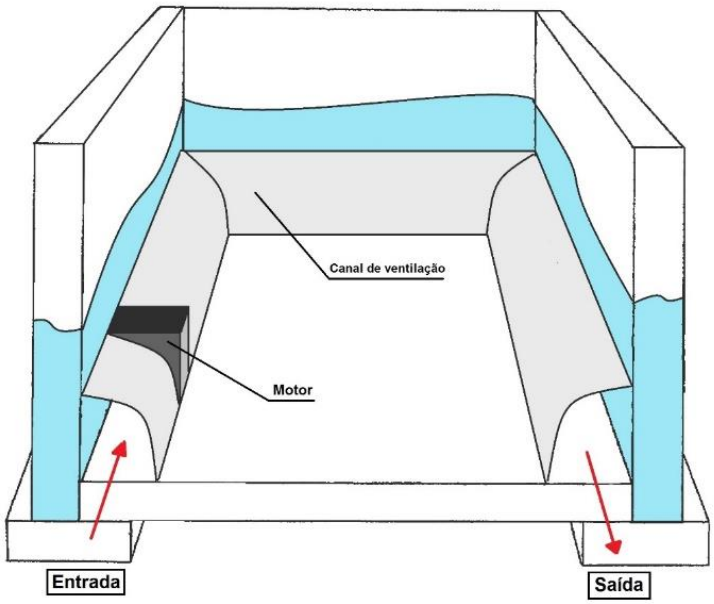


Fig. 2.25 – Esquema representativo do sistema de ventilação de paredes na sequência de cheias/inundações

2.6.2. CONTROLO DA HUMIDADE RELATIVA EM DESVÃOS SANITÁRIOS

A ventilação é um fator de elevada importância no que toca ao controlo da humidade relativa em desvãos sanitários, evitando o desenvolvimento de inúmeras patologias.

A humidade relativa em excesso proveniente do terreno, em conjunto com a temperatura, o pH e a "nutrição" são os principais fatores favoráveis ao desenvolvimento de fungos e bolores nos elementos de madeira.

A aplicação do sistema HUMIVENT é uma solução interessante no combate à patologia em questão. O sistema permitir retirar humidade do desvão sanitário através da circulação de ar no seu interior (Figura

2.26). Um sistema higroregulável evita o desperdício de energia bem como favorece a eficácia do sistema, apenas admitindo a entrada de ar favorável à secagem do desvão [16], [30].

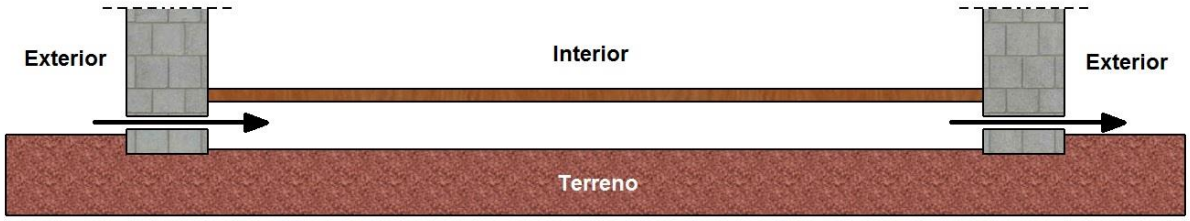


Fig. 2.26 – Ventilação de desvão sanitário

2.7. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Das diferentes formas de manifestações que a água pode apresentar nas edificações, foi apresentada com maior detalhe a humidade ascensional e as suas consequências.

Foi apresentado uma síntese dos vários métodos de tratamento da humidade ascensional correntemente utilizados.

No tratamento de paredes de elevada espessura foi apresentado o sistema que se revelou ser bastante eficaz designado por "sistema higroregulável de ventilação da base das paredes - HUMIVENT" desenvolvido pelo LFC da FEUP, bem como a sua evolução ao longo do tempo.

Foram apresentados sistemas cujo princípio de funcionamento se assemelha ao sistema HUMIVENT, assim como outras aplicações do sistema de ventilação que implicam o controlo da humidade.

3

CARATERIZAÇÃO DO SISTEMA IMPLEMENTADO NUMA IGREJA SITUADA NO NORTE DE PORTUGAL

3.1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo pretende-se efetuar o enquadramento histórico da Igreja objeto do presente estudo designada por Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades, assim como a sua caraterização e evolução ao longo dos anos.

Mostram-se as manifestações relacionadas com a presença de humidade que esta Igreja exibia até ao início das obras de restauro e recuperação levadas a cabo pelo Instituto Português do Património Arquitetónico e posteriormente da Direção Regional de Cultura do Norte. Descreve-se o sistema implementado, desde os princípios de funcionamento, componentes, critérios de funcionamento, até à geometria e implantação do mesmo.

Procurou-se apresentar uma síntese dos estudos e resultados obtidos até à presente data com os dados recolhidos nas monitorizações realizadas ao sistema implementado, bem como uma proposta de otimização subjacente aos resultados alcançados.

Encerra-se o capítulo com uma breve referência aos edifícios onde o sistema já se encontra instalado e a sua importância no tratamento de edifícios do património histórico.

3.2. HISTÓRIA DA IGREJA

3.2.1. O MOSTEIRO

A Igreja objeto do presente estudo faz parte de um Mosteiro beneditino (Figura 3.1) situado no sopé do monte Airó, junto à marquem esquerda do rio Cávado em Areias de Vilar (concelho de Barcelos, distrito de Braga), foi fundada pelo bispo S. Martinho de Dume em 566, intitulado de Mosteiro de Vilar de Frades/Mosteiro de São Salvador. Na sequência das invasões muçulmanas que levaram, à ruina todo o mosteiro, este foi reconstruído no séc. X ao estilo românico [18].



Fig. 3.1 – Mosteiro de Vilar de Frades [18]

No séc. XIV o Mosteiro encontrava-se inutilizado e foi entregue a uma nova congregação de Cónegos Seculares de São Salvador de Vilar de Frades, dando origem a uma nova congregação poucos anos mais tarde, os Cónegos Seculares de São João Evangelista (também conhecida por Ordem dos Lóios) por intermédio da Rainha D. Isabel. A partir do séc. XVI o Mosteiro sofreu várias ampliações e remodelações. Foram construídos dormitórios, refeitório, cozinha, biblioteca, uma segunda torre e um claustro. A remodelação da fachada principal dá-se no séc. XVIII, bem como a conclusão dos interiores da Igreja [18], [21].

No início do século XIX com a extinção das ordens religiosas o Mosteiro de Vilar de Frades passa para o estado sendo posteriormente vendido em hasta pública, com exceção da Igreja e do claustro. Já no final do séc. XIX um incêndio devastou o Mosteiro e em meados do séc. XX deram-se início às obras de restauro e conservação, a cargo dos Serviços de Conservação, Instituto Português do Património Arquitetónico e da Direção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais. As intervenções realizadas mais recentemente (Figura 3.2) (anos 90), no valor de 3,4 milhões de euros sob tutela do Instituto Português do Património Arquitetónico e posteriormente da Direção Regional de Cultura do Norte possibilitaram a realização de restauros, limpezas, drenagens, reconstrução da cobertura, estabilização da estrutura, isolamento de paramentos e cantarias, reabilitação de caixilharias e fachadas, sondagens arqueológicas e acabamento das salas destinadas à prática da catequese [10], [17], [21].

Por falta de verbas, os trabalhos relativos ao tratamento da humidade ascensional na parte do Mosteiro encontram-se incompletos, pelo menos até ser realizada uma nova candidatura a fundos comunitários europeus. Após o restauro, em 2006, o Mosteiro abriu portas ao público e passou a estar integrado nos roteiros turísticos da zona Norte. Podem ser observados elementos referentes a diversas épocas, nomeadamente elementos ao estilo românico, manuelino, barroco e neoclássico. Segundo a Direção Regional de Cultura do Norte, 1500 pessoas visitaram o mosteiro em 2014 [10], [21].

Atualmente o mosteiro é propriedade do estado e classificado como Monumento Nacional desde 1910. Executa unicamente funções religiosas (Igreja), assistenciais (lar) e turísticas [19].

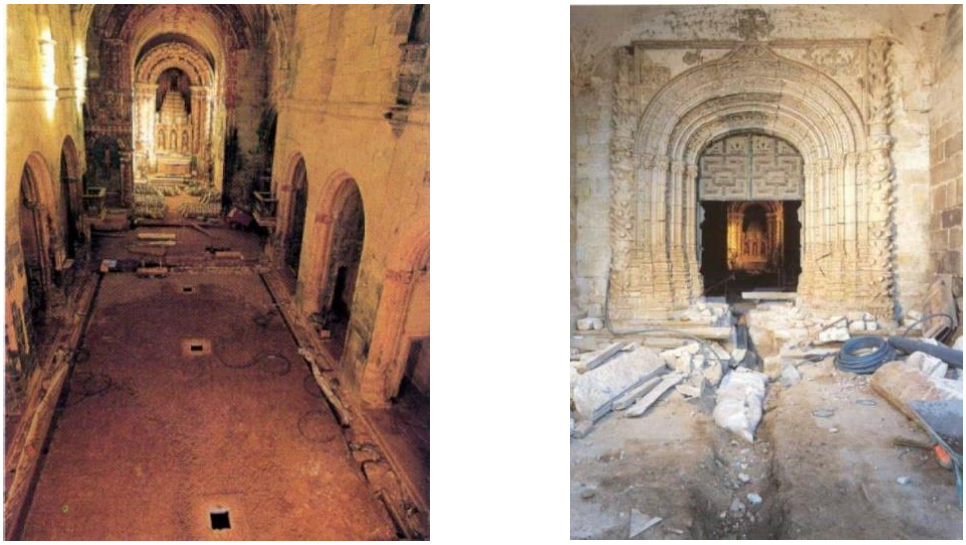


Fig. 3.2 – Obras de restauro [20]

3.2.2. A IGREJA

A Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades (Figura 3.3) concluída em 1694, com projeto da autoria de um grande Arquiteto europeu daquele tempo, João Castilho (nacionalidade espanhola), detém uma planta em forma de cruz latina (Figura 3.4) com transepto reduzido assemelhada às Igrejas criptocolaterais. O corpo de nave única encontra-se separado lateralmente por cinco capelas quadrangulares intercomunicantes, revestidas por painéis de azulejo e demarcadas do corpo central por um gradeamento de madeira [12], [21].



Fig. 3.3 – Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades

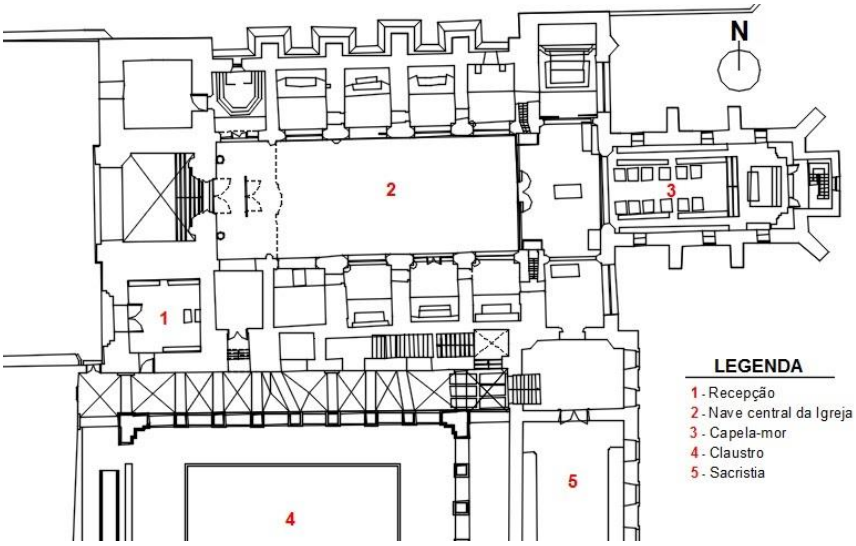


Fig. 3.4 – Planta da Igreja [6]

A capela-mor (situada a nascente) apresenta uma planta retangular relativamente profunda e uma volumetria monumental. Em contrapartida o transepto apresenta uma volumetria mais humilde, simplificando a comunicação com o corpo central da Igreja [12].

O corpo central é coberto por uma abóbada complexa assim como as coberturas das capelas laterais. As paredes exteriores da capela-mor e do alçado Norte da Igreja encontram-se reforçadas com contrafortes (seis em redor da capela-mor e quatro no alçado Norte) e parcialmente enterradas. A diferença entre a cota do terreno exterior e o pavimento interior em lajeado de granito é de aproximadamente um metro [12], [4].

A Sul a Igreja encontra-se confinada pelo claustro e o pelo Mosteiro [12].

A pedra utilizada na construção da capela-mor é proveniente do monte da Penida (Areias de vilar) e é um tipo de granito invulgar semelhante ao calcário na trabalhabilidade e ao mármore no aspeto [17].

3.2.3. Resumo Cronológico

De seguida apresenta-se um resumo cronológico dos principais acontecimentos que marcaram a história da Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades.

556 – Fundação do Mosteiro de Vilar de Frades/Mosteiro de São Salvador pelo bispo S. Martinho de Dume;

714 – Invasões muçulmanas que levaram à ruina todo o mosteiro;

1070 – Reconstrução do Mosteiro ao estilo românico;

1425 – Fundação da congregação de Cónegos Seculares de São Salvador de Vilar de Frades;

1461 – Alteração do nome da congregação para Cónegos Seculares de São João Evangelista por intermédio da Rainha D. Isabel;

1540 – Remodelações e ampliação do Mosteiro;

Século XVIII – Conclusão dos interiores da Igreja;

1834 – Extinção das ordens religiosas e venda em hasta pública (com exceção da Igreja e do claustro);

Meado do Século XIX – Incêndio devasta o Mosteiro;

Meado do Século XX – Obras de restauro após o incêndio a cargo dos Serviços de Conservação, Instituto Português do Património Arquitetónico e da Direção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais;

1994 – Obras de restauro a cargo do Instituto Português do Património Arquitetónico e da Direção Regional de Cultura do Norte;

2006 – Abertura ao público.

3.2.4. PATOLOGIAS OBSERVADAS

O conjunto de manifestações que a Igreja apresentava estavam na sua grande maioria relacionados com a presença de água (humidade ascensional, condensações e infiltrações). Na análise efetuada "in situ" verificou-se que as condições de evaporação não eram favoráveis à secagem devido à fraca ventilação interior e humidade relativa elevada [3], [6].

De seguida enunciam-se as principais manifestações observadas [3], [10]:

- Eram visíveis musgos e manchas em toda a altura dos contrafortes e na base das paredes exteriores (Figura 3.5);
- A face interior das paredes da capela-mor apresentava musgos até proximamente um metro de altura (Figura 3.6);
- Eram observadas manchas esverdeadas nos pilares de granito que circundam o corpo central da Igreja (Figura 3.6);
- Eram visíveis manchas de humidade nas paredes interiores pintadas e rebocadas das capelas laterais (Figura 3.7);
- O lajeado dos pavimentos das capelas laterais e da capela-mor encontrava-se totalmente saturado de humidade (Figura 3.7);
- Todos os tetos continham vestígios de humidade, maioritariamente localizada nos cantos das abobadas (Figura 3.8);



Fig. 3.5 – Paredes exteriores [2]



Fig. 3.6 – Paredes interiores [1], [2], [3]



Fig. 3.7 – Pavimento interior [1], [3]

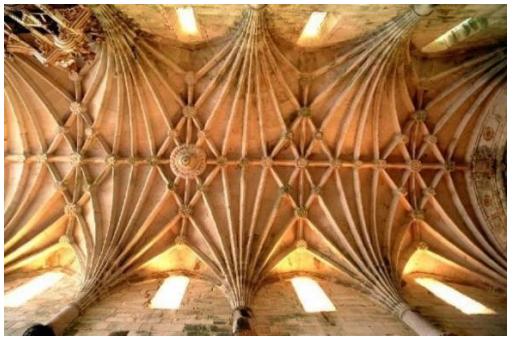


Fig. 3.8 – Cobertura interior [20]

O facto de alguns revestimentos interiores (nomeadamente nas capelas laterais) serem pouco permeáveis (azulejos) acabam por condicionar parcialmente a altura atingida pela frente húmida (humidade ascensional) nas paredes. O ponto de equilíbrio entre a água evaporada e a água absorvida por capilaridade aumenta significativamente [10].

3.3. O SISTEMA IMPLEMENTADO

Os trabalhos de intervenção na Igreja no sentido de tratar as manifestações observadas tiveram início em Dezembro de 2003 e duraram dez meses. Foram intervencionados, os pavimentos, as paredes e os tetos (limpezas) [2].

3.3.1. PAVIMENTOS

A solução aplicada passou por drenar e impermeabilizar os pavimentos das capelas laterais, da capela-mor e do transepto.

Para tal executou-se o seguinte procedimento (Figura 3.9) [1]:

- Recolher o lajeado;
- Execução da caixa de areia;
- Colocação de telas de PVC (impermeabilização);
- Colocação de uma nova camada de areia;
- Recolocação do lajeado conforme a disposição original.

Simultaneamente foi realizada uma rede de drenagem complementar com ligação à rede de drenagem existente, que atravessa as capelas laterais [1].

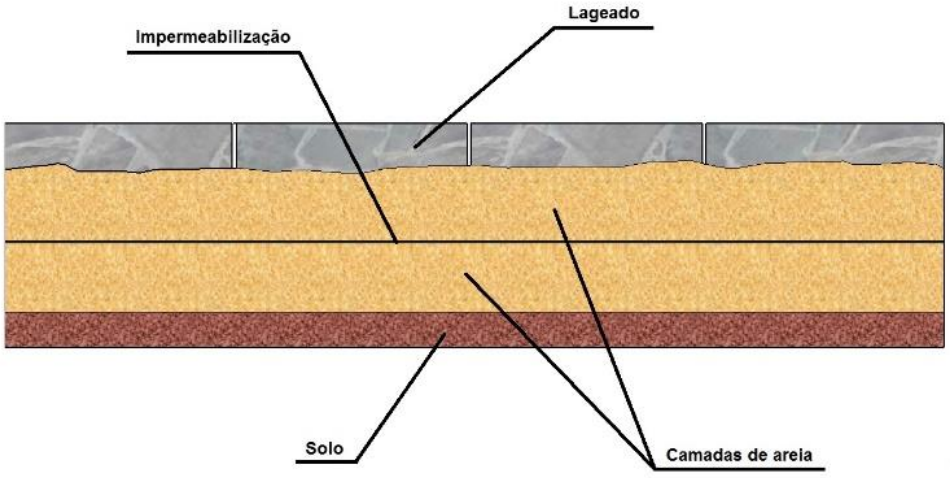


Fig. 3.9 – Corte construtivo do pavimento interior

3.3.2. SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA BASE DAS PAREDES

No sentido de minimizar os problemas associados à existência de humidade ascensional, optou-se por criar um sistema de ventilação que permita aumentar as condições de evaporação da base das paredes.

A execução de um corte hídrico através da injeção de produtos químicos seria uma solução de grande interesse caso não se tratasse de paredes de elevada espessura e grande heterogeneidade.

Por se tratar de um edifício pertencente ao Património Histórico e Monumental a ocultação de anomalias, a colocação de drenos atmosféricos, a execução de um sistema electro-osmótico e a redução da secção absorvente seriam soluções pouco eficazes e até mesmo "impossíveis" de aplicar uma vez que provocam alterações estéticas no elemento a ser tratado.

A solução implementada está dividida em dois sistemas de ventilação. Um sistema pelo interior mecânico e higroregulável, que contorna pelo interior todas as paredes exteriores e interiores (em ambas as faces) e um sistema pelo exterior natural que contorna pelo exterior todas as paredes exteriores com exceção na zona dos quatro contrafortes do alçado Norte, que por terem sido reforçados devido a problemas de segurança estrutural encontram-se impermeabilizados com uma cortina de betão armado (Figura 3.10) [1].



Fig. 3.10 – Reforço exterior [4]

O canal do sistema de ventilação exterior (Figura 3.11) é executado em elementos pré-fabricados de betão, abertos ao exterior pontualmente através um dispositivo de ventilação e ligados entre si através de tubos de PVC. A ventilação do canal é executada apenas pela ação do vento o que implicou uma disposição estratégica das aberturas no sentido de maximizar a circulação de ar. Na parte inferior os canais possuem uma caleira para escoamento das águas pluviais. A profundidade do canal não deve colocar em risco a segurança estrutural da estrutura [1], [2]. (Figura 3.12)

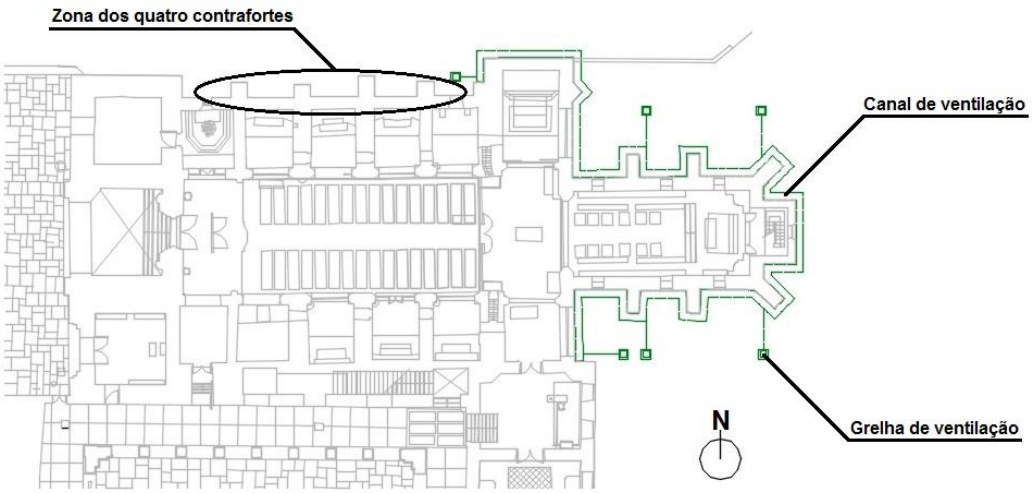


Fig. 3.11 – Geometria do sistema de ventilação exterior [6]

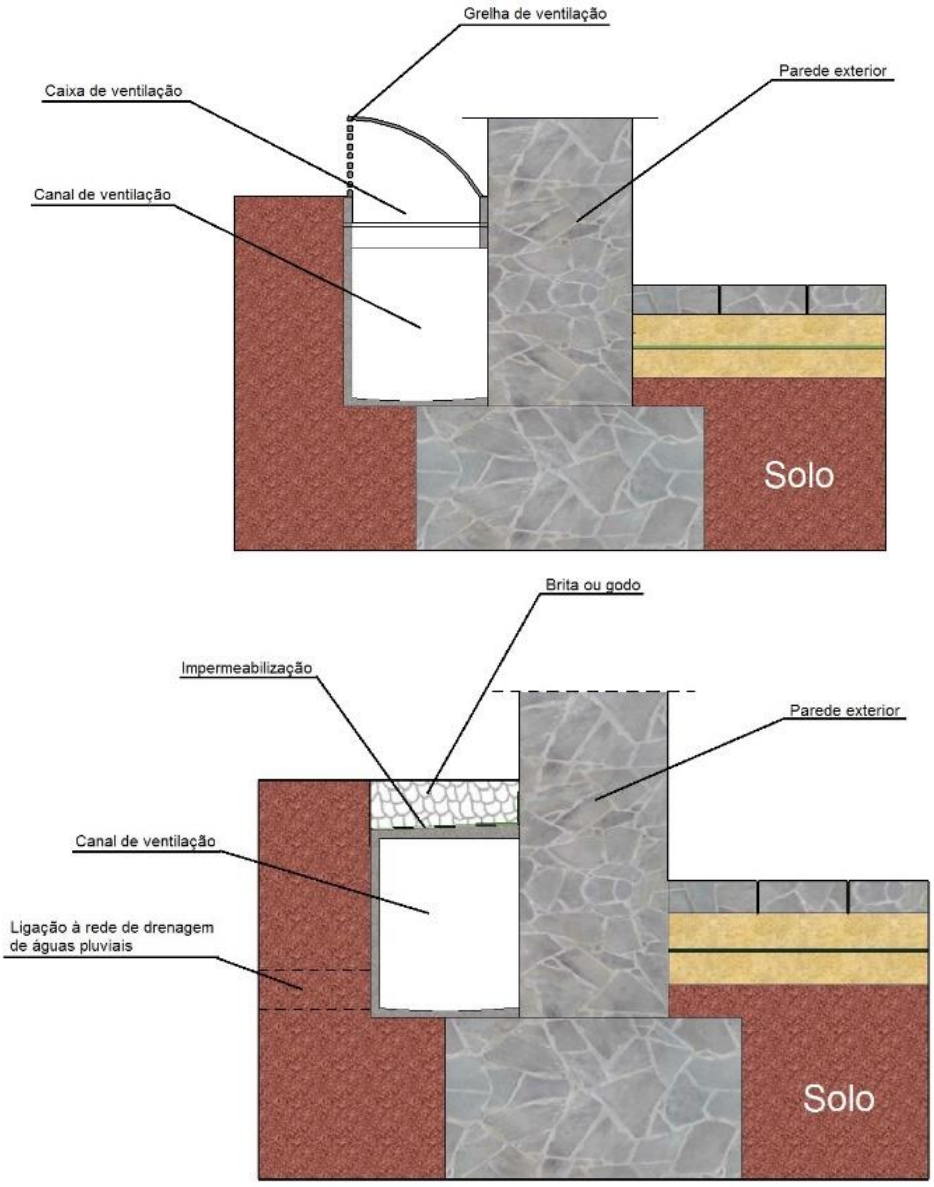


Fig. 3.12 – Cortes construtivos do canal de ventilação exterior

O sistema interior encontra-se subdividido em dois sistemas com funcionamento independente. Um subsistema Norte e um subsistema Sul com um desenvolvimento de sensivelmente 130 e 70 metros respetivamente [1].

3.3.2.1. SUBSISTEMA NORTE

A admissão de ar é proveniente do exterior através de uma ligação à caixa da rede de ventilação exterior, próximo à fachada nascente do transepto. A exaustão efetua-se para o exterior da Igreja na fachada poente [1], [3]. (Figura 3.13)

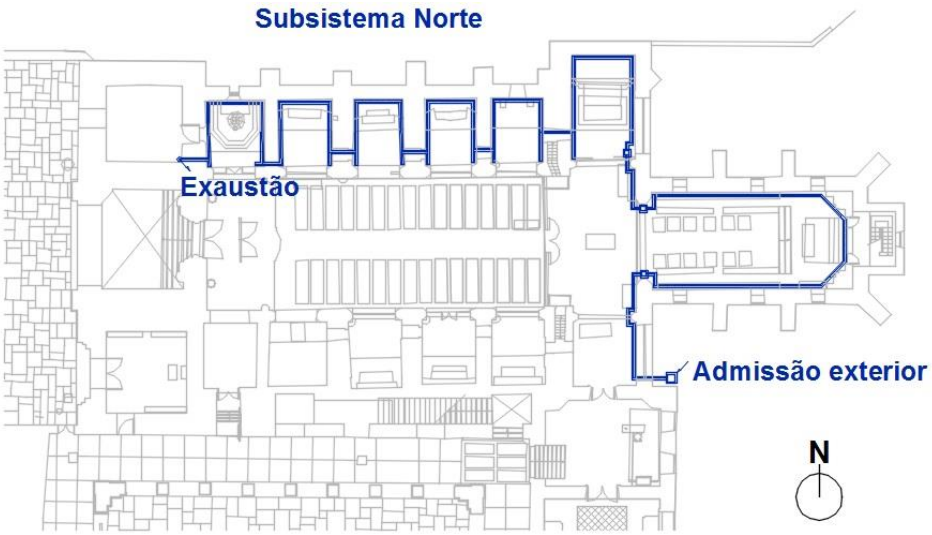


Fig. 3.13 – Geometria do subsistema de ventilação Norte [6]

3.3.2.1. SUBSISTEMA SUL

A admissão de ar é proveniente do interior da Igreja, inicialmente através de rasgos nos degraus de pedra, no entanto por problemas de mau funcionamento a admissão foi alterada para dois orifícios localizados em duas capelas laterais. A exaustão é realizada para o claustro (Figura 3.14) [1], [3].

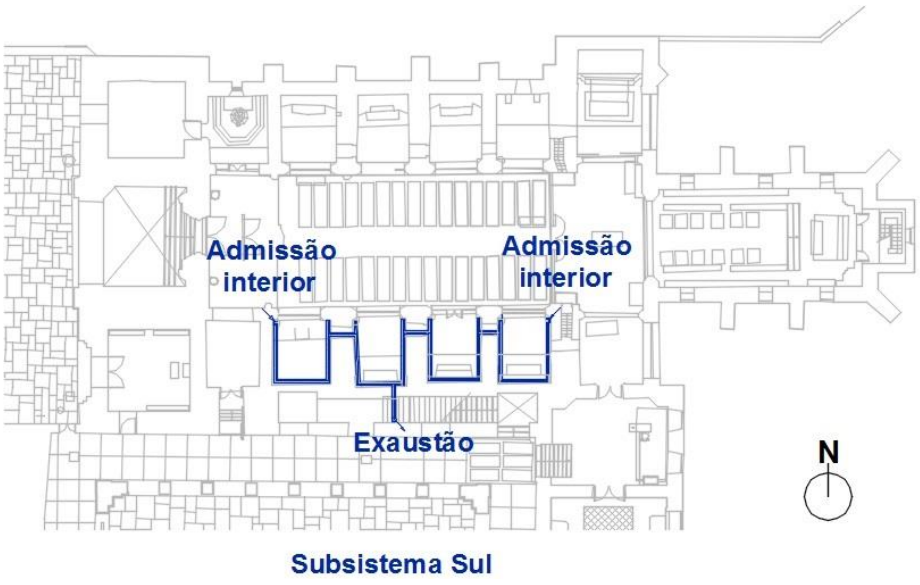


Fig. 3.14 – Geometria do subsistema de ventilação Sul [6]

À semelhança do sistema de ventilação exterior, ambas as condutas dos subsistemas interiores foram executadas abaixo do lajeado de granito de forma a não serem percetíveis. São constituídas por elementos tubulares prefabricados de betão com 200 mm de diâmetro, que se encontram perfuradas ao longo do seu desenvolvimento. Encontram-se rodeadas por godo envolvido num geotêxtil e assentes sobre

uma camada de areia. A impermeabilização foi apenas realizada entre o lajeado e o geotêxtil, uma vez se pensava ser a solução mais interessante (Figura 3.15) [4].

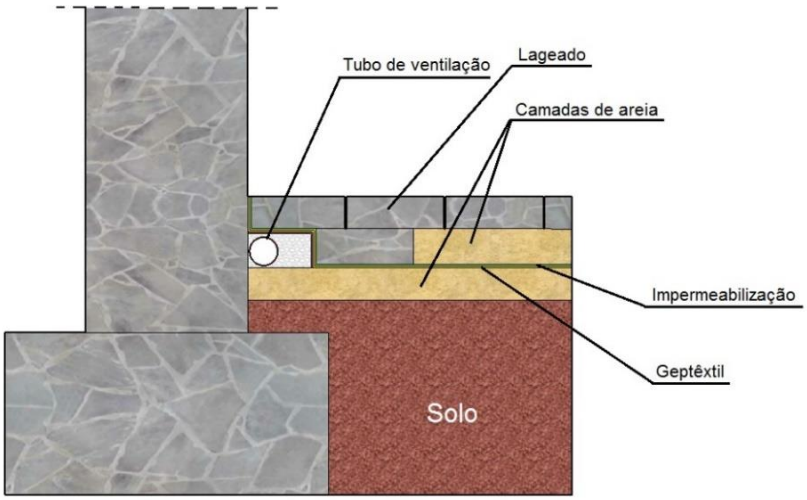


Fig. 3.15 – Corte construtivo do canal de ventilação interior

Cada subsistema inclui os seguintes componentes: [1]

- Duas sondas de temperatura e humidade relativa;
- Dois transmissores de temperatura e humidade relativa;
- Um módulo de comando;
- Um módulo de aquisição de dados (*data-logger*);
- Programador (adicionado posteriormente, 2009).

Para cada subsistema, uma das sondas encontra-se junto à grelha exterior da Igreja e a outra no interior da tubagem de ventilação. Ambas se encontram ligadas a um transmissor de temperatura e humidade relativa. Por sua vez os transmissores encontram-se ligados ao módulo de comando, que em função dos dados fornecidos pelas sondas, liga ou desliga o dispositivo de extração em função de critérios previamente estabelecidos (pressão de vapor e teor de humidade relativa). O sistema de aquisição de dados armazena os valores registados (de 15 em 15 minutos) pelas duas sondas para que seja possível avaliar a eficácia do sistema implementado. Os dispositivos de controlo e aquisição de dados encontram-se fixados num painel junto ao dispositivo de extração do respetivo subsistema de ventilação (Figura 3.16) [1].



Fig. 3.16 – Dispositivos de controlo

3.3.3. CRITÉRIOS DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

Inicialmente o critério de funcionamento do sistema higroregulável baseava-se apenas na humidade relativa. O sistema entrava em funcionamento quando a humidade relativa à entrada fosse, pelo menos, 5% inferior à humidade relativa registada no interior da conduta [1].

Pensava-se ser o critério mais relevante ao correto funcionamento do sistema.

A realização de estudos mais recentes pela Professora Doutora Ana Sofia dos Santos Guimarães Teixeira [3], no desenvolvimento da sua Dissertação de Mestrado (2005-2007), veio revelar que a adoção deste critério conduzia à ocorrência de condensações no interior do sistema bem como à possibilidade de ocorrência de dissoluções e/ou cristalização de sais, reduzindo a eficácia e a longevidade do mesmo, pese embora a sua definição inicial tenha sido apenas baseada no conhecimento empírico.

Atualmente o sistema apoia-se em dois critérios de funcionamento que se encontram em vigor desde o início de 2009. Um critério baseado na diferença de pressões de vapor à entrada e à saída do sistema. Sempre que a diferença de pressão à entrada e à saída é positiva, o sistema entra em funcionamento. Este critério permite minorar as possibilidades de ocorrência de condensações no interior do sistema [2].

Por outro lado adicionou-se um novo critério baseado na humidade relativa mínima à entrada do sistema, permitido que o sistema funcione apenas para valores superiores a 35% de humidade relativa. Este último critério pretende reduzir a ocorrência de dissolução e/ou cristalização de sais no interior do sistema. A definição do valor da humidade relativa foi baseada em conhecimentos empíricos que ainda deverão atempadamente ser estudados e melhor definidos.

A alteração dos critérios de funcionamento obrigou à instalação de um programador (Figura 3.17) que, calcula a pressão de vapor à entrada e à saída do sistema através dos dados recolhidos pelas sondas.

O programador permite efetuar a calibração das sondas e encontra-se protegido para evitar possíveis perdas de informação [3].

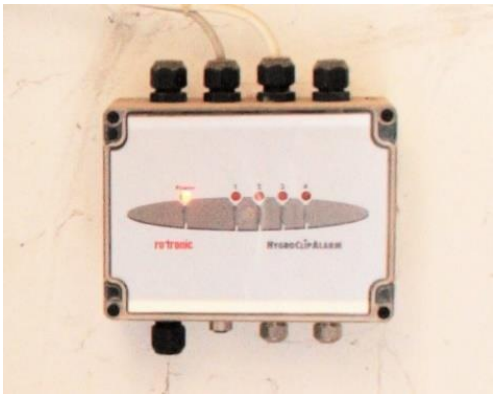


Fig. 3.17 – Programador

Através do programa MMGRAFIX7 (da Micromec Multisens) é possível fazer a transferência dos dados registados para um computador, assim como a sua visualização (gráficos e/ou tabelas) e manipulação (valor máximo e mínimo, média e desvio padrão). Caso seja preferível, é possível exportar os dados sob a forma de tabelas e efetuar o tratamento através de qualquer outro programa de cálculo disponível no mercado [3].

3.4. MONITORIZAÇÃO DO SISTEMA

Uma primeira monotorização realizada apenas no subsistema Sul (uma avaria no data-logger do subsistema Norte impedi-o o acessos aos restantes registos) permitiu analisar e comprovar a eficácia do sistema no tratamento de humidades ascensionais em edifícios de paredes de grande espessura. O funcionamento higroregulável é fundamental para aumentar a eficácia do sistema. Uma análise mais aprofundada dos registos efetuados permitiu verificar que o critério inicialmente adotado não era o mais adequado. Um critério baseado na diferença entre valores de pressão de vapor à entrada e à saída do subsistema permite reduzir os períodos em que ocorrem condensações no interior do mesmo [2].

Após a introdução dos novos critérios (2009), que regulam o funcionamento do sistema de ventilação da base das paredes, foram realizados estudos no sentido de avaliar a adequabilidade e eficácia dos mesmos.

Os registos analisados dizem respeito a um ano completo de medições (Maio de 2010 a Maio de 2011) a Norte e a Sul. Os dados relativos à humidade relativa e temperatura foram registados em intervalos de 15 minutos nos *data-loggers* instalados [3].

3.4.1. SUBSISTEMA NORTE

Após a análise dos dados recolhidos foi possível chegar às seguintes conclusão relativas ao subsistema de ventilação Norte (Figura 3.18, Figura 3.19, Figura 3.20 e Figura 3.21) [3]:

- A humidade relativa à entrada do subsistema apresentou valores médios na ordem dos 85%;
- A humidade relativa de aproximadamente 95% no inverno levou a que ocorressem condensações no interior do subsistema;
- A humidade relativa mínima registada à entrada do subsistema não atingiu os 50%, contribuindo para a redução do risco de dissolução e/ou cristalização de sais;

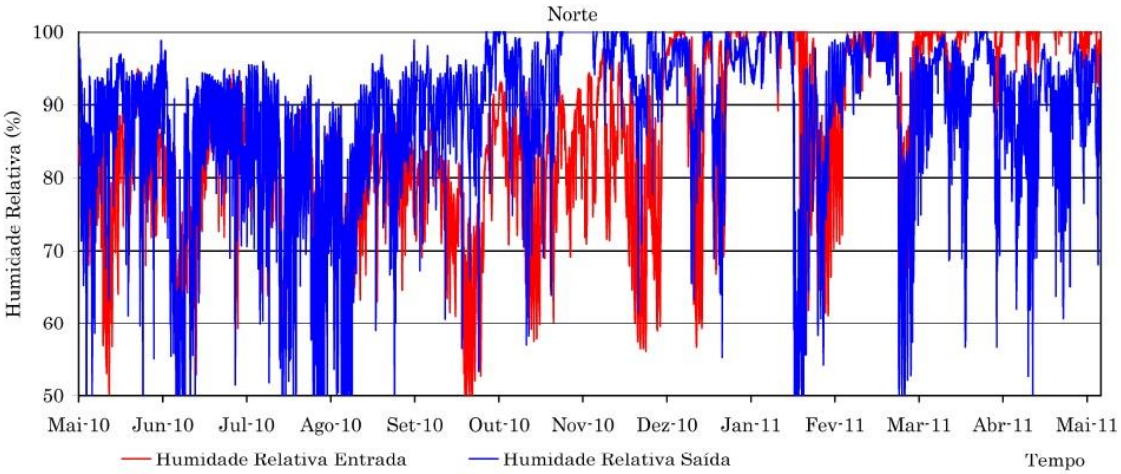


Fig. 3.18 – Variação da humidade relativa à entrada e à saída do subsistema Norte [3]

- A inércia térmica do edifício provoca um leve desfasamento entre a temperatura registada à entrada do subsistema e a registada à saída;

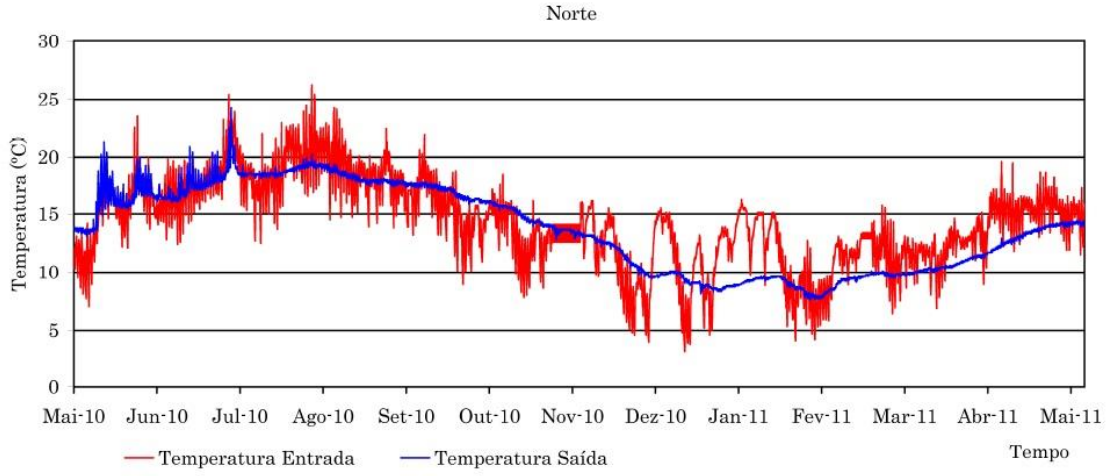


Fig. 3.19 – Variação da temperatura à entrada e à saída do subsistema Norte [3]

- O subsistema de ventilação esteve em funcionamento 52% do tempo;

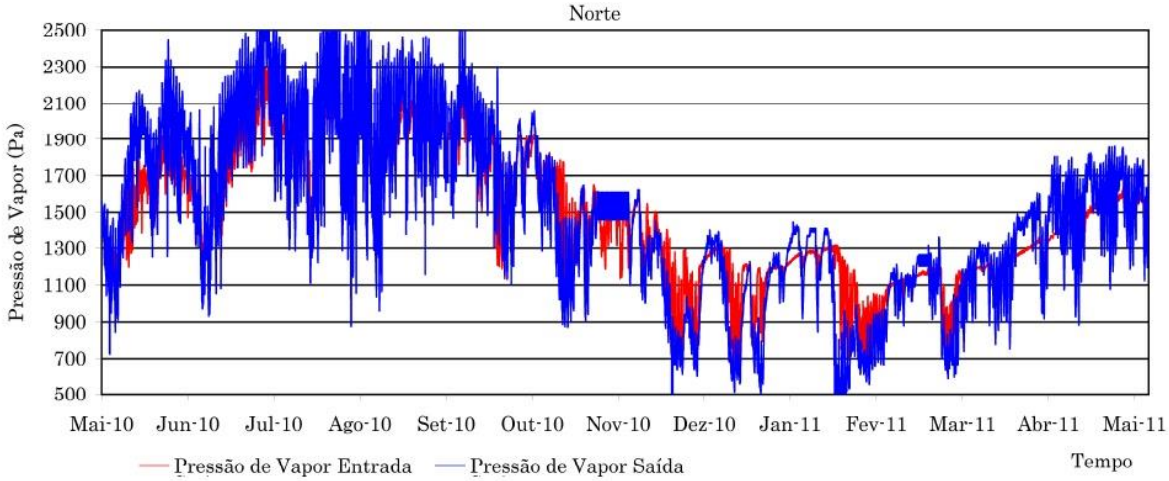


Fig. 3.20 – Variação da pressão de vapor à entrada e à saída do subsistema Norte [3]

- O subsistema retirou uma maior quantidade de água nos meses de verão;
- Durante o período de análise, o sistema retirou 386 kg de água (calculada com o recurso à Expressão 2.2);

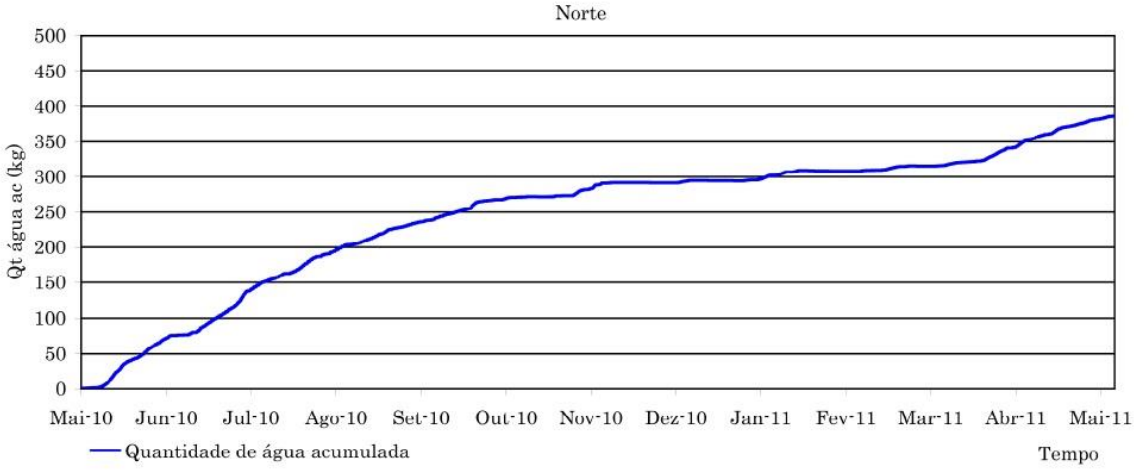


Fig. 3.21 – Quantidade de água acumulada retirada [3]

3.4.2. Subsistema Sul

Após a análise dos dados recolhidos foi possível chegar às seguintes conclusão relativas ao subsistema de ventilação Sul (Figura 3.22, Figura 3.23, Figura 3.24 e Figura 3.25) [3]:

- A humidade relativa à entrada do subsistema atingiu valores médios na ordem dos 80% apresentando um bom comportamento no inverno, retirando maior quantidade de água que durante os meses de verão;
- A humidade relativa mínima registada à entrada do subsistema não atingiu os 50%, contribuindo para a redução do risco de dissolução e/ou cristalização de sais;

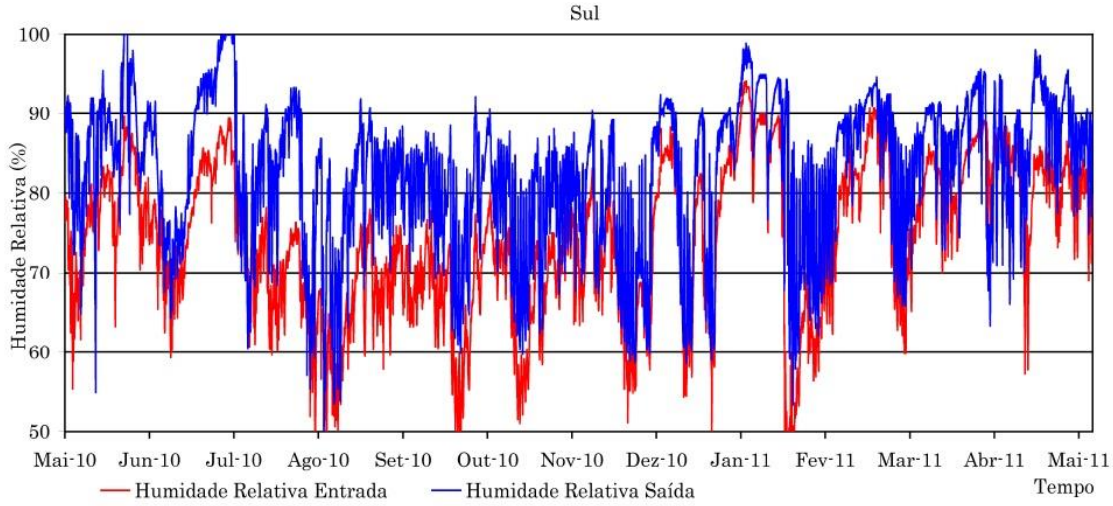


Fig. 3.22 – Variação da humidade relativa à entrada e à saída do subsistema Sul [3]

- A inércia térmica do edifício provoca um leve desfasamento entre a temperatura registada à entrada do subsistema e a registada à saída;

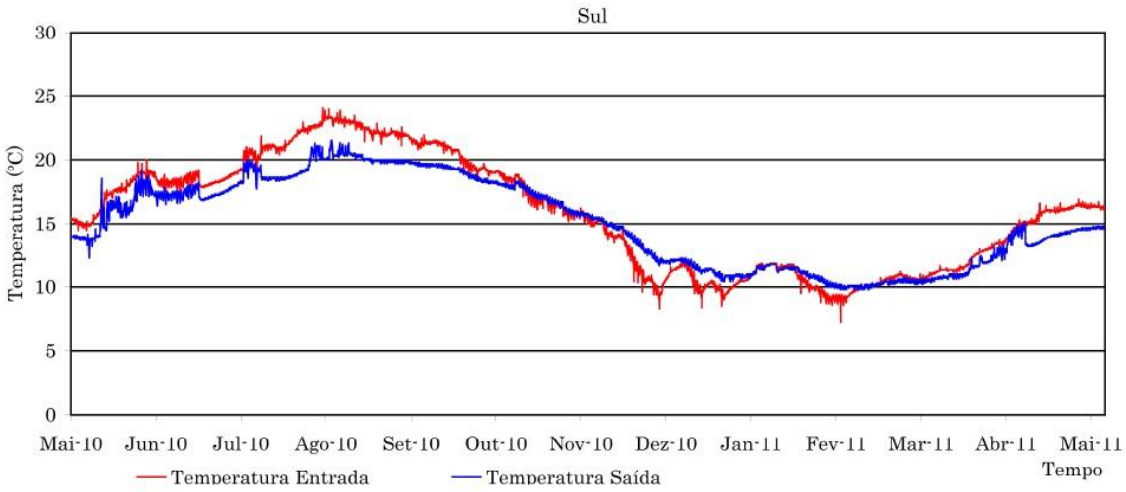


Fig. 3.23 – Variação da temperatura à entrada e à saída do subsistema Sul [3]

- Durantes os meses de verão ocorreram condensações no interior do subsistema;
- O subsistema de ventilação esteve em funcionamento 82% do tempo, maioritariamente nos meses de inverno;

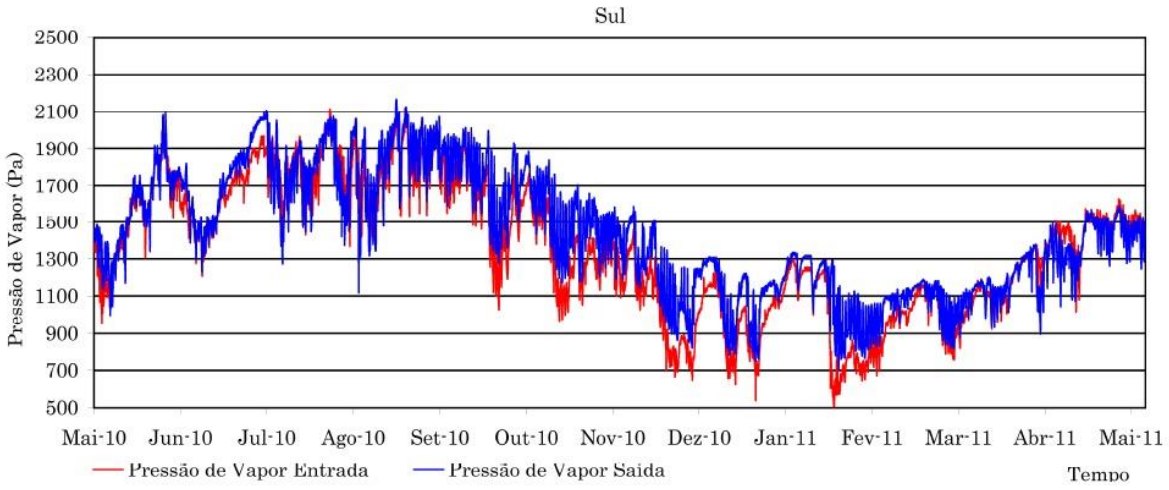


Fig. 3.24 – Variação da pressão de vapor à entrada e à saída do subsistema Sul [3]

- Durante o período de análise, o sistema retirou 448 kg de água (calculada com o recurso à Expressão 2.2);

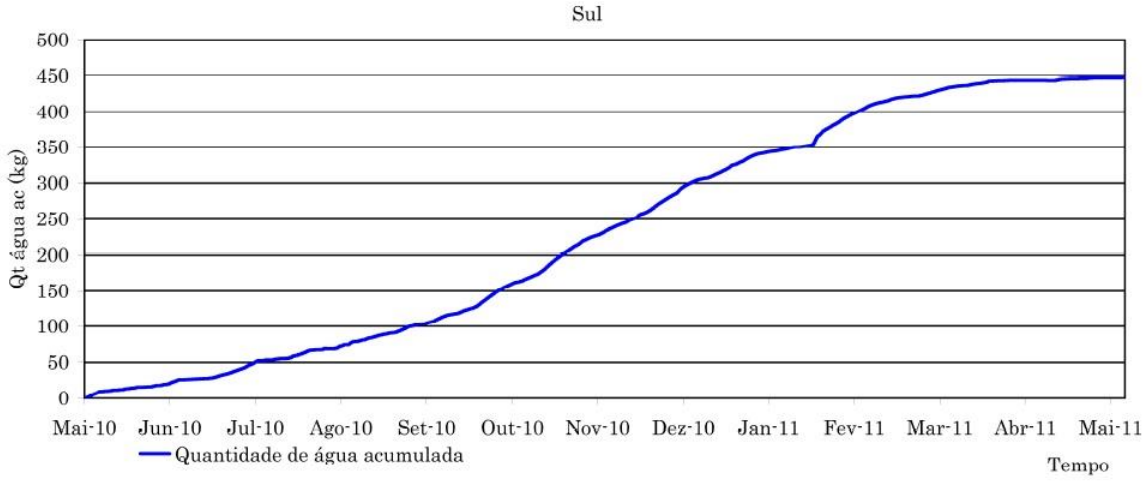


Fig. 3.25 – Quantidade de água acumulada retirada [3]

3.4.3. PROPOSTAS DE OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA

Uma análise global dos dois subsistemas permitiu verificar que o subsistema Norte apresentou interrupções ao longo de todo o ano, enquanto o subsistema Sul interrompeu o seu funcionamento apenas por alguns períodos nos meses de verão. O ar admitido no subsistema Sul é proveniente do interior da Igreja, viabilizando valores da pressão de vapor mais estáveis, justificando em parte o seu funcionamento mais contínuo.

As caraterísticas do ar admitido influenciam substancialmente a eficácia do sistema.

A comparação dos resultados obtidos no subsistema Norte e no subsistema Sul permitiu propor uma otimização global do sistema implementado. A otimização consiste em tornar o funcionamento do sis-

tema sazonal. Durante os meses de verão o ar admitido nos dois subsistemas seria proveniente do exterior e nos meses de inverno o ar seria proveniente do interior da Igreja. A otimização sazonal possibilitaria um funcionamento mais contínuo do sistema assim como uma maior quantidade de água retirada (Figura 3.26) [3].

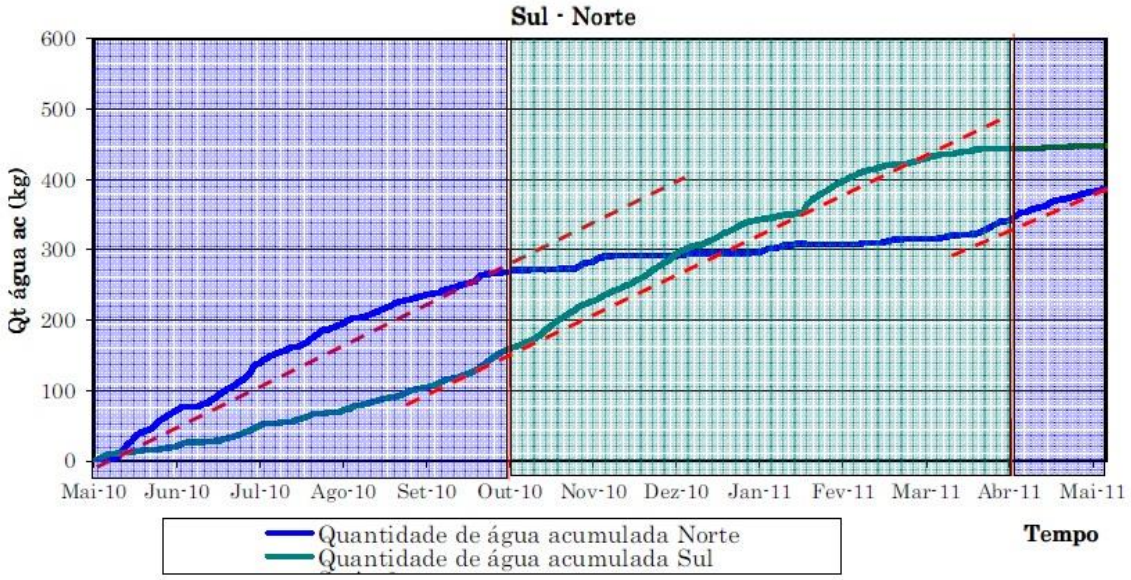


Fig. 3.26 – Funcionamento sazonal dos subsistemas [3]

A adoção de um sistema fechado onde o caudal no interior do subsistema passe a ser nulo, eliminando assim a ventilação natural existente nos períodos em que o sistema se encontra desligado, contribuiria para a redução de condenações pontuais devido a variações repentinas de temperatura e humidade relativa no exterior [3].

3.4.4. EDIFÍCIOS ONDE O SISTEMA JÁ SE ENCONTRA INSTALADO

A Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades objeto do presente estudo, foi o primeiro edifício onde se instalou e monitorizou um sistema higroregulável de ventilação da base das paredes sendo que o sistema já se encontra instalado (parcialmente ou na sua totalidade) em vários edifícios de que são exemplo (Figura 3.27) [4]:

- Mosteiro de São Martinho de Tibães (Braga) - 1;
- Mosteiro de Vilar de Frades (Barcelos) - 2;
- Igreja de Nossa Senhora da Consolação e Santos Passos (Guimarães) - 3;
- Mosteiro de Santa Maria do Pombeiro (Felgueiras) - 4;
- Igreja Privativa da Misericórdia do Porto (Porto) - 5;
- Casa dos Patudos – Museu de Alpiarça (Alpiarça) - 6;
- Baluarte do Cais de Nossa Senhora da Conceição (Setúbal) - 7;



Fig. 3.27 – Localização dos edifícios onde se encontra instalado o sistema de ventilação da base das paredes

O tratamento da humidade ascensional em edifícios do Património Histórico e Monumental não é uma tarefa fácil de concretizar. As paredes heterogéneas de elevada espessura, aliadas ao facto de o aspeto estético das mesmas não poder ser alterado, são as maiores dificuldades encontradas e as mais difíceis de contornar. A eficácia comprovada do sistema de ventilação da base das paredes torna o sistema uma solução muito desejável, fácil de implementar e eficaz no tratamento de edifícios com estas caraterísticas especificas.

3.5. SÍNTESE DO CAPÍTULO

Portugal dispõe de um vasto património com elevado valor histórico e cultural que necessita de ser mantido e reabilitado. Parte apresenta problemas associados à presença de humidade, sendo a humidade ascensional uma das formas de manifestação mais recorrente.

Desde o surgimento da ideia de adotar um sistema de ventilação da base das paredes este já foi implementado em vários edifícios. No presente estudo optou-se por analisar a Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades por se encontrar monitorizada à vários anos.

Foi apresentada a evolução histórica da Igreja e do Mosteiro onde esta se encontra inserida bem como a respetiva caracterização;

Foram enunciadas as manifestações de patologias mais correntes que o edifício apresentava.

Foi descrito o sistema implementado assim como os respetivos critérios de funcionamento e a sua evolução.

Foram apresentadas as principais conclusões dos estudos já realizados, até à data, que ao longo dos últimos anos contribuíram para a evolução do sistema de ventilação da base das paredes.

4

MONITORIZAÇÃO DO SISTEMA HUMIVENT IMPLEMENTADO NUMA IGREJA NO NORTE DE PORTUGAL

4.1. INTRODUÇÃO

O sistema que se encontra instalado na Igreja objeto do presente estudo já se encontra monitorizado há vários anos. No entanto, com base nos estudos que foram sendo desenvolvidos ao longo dos anos, os critérios de funcionamento foram otimizados e alterados, impossibilitando a realização de estudos mais aprofundados, com dados referentes a vários anos de monitorização, nos últimos trabalhos de investigação realizados.

No presente capítulo pretende-se analisar e comparar os dados obtidos na monitorização dos subsistemas (Norte e Sul) instalados, que compreendem a um período ininterrupto de funcionamento de quatro anos, compreendido entre o dia 1 de Julho de 2010 e o dia 30 de Junho de 2014.

Com o presente estudo procura-se determinar a influência do comprimento do sistema, das condições do ar à entrada, da utilização do espaço, das condições climáticas do ambiente local e dos períodos de funcionamento na eficácia do sistema. Pretende-se ainda efetuar uma analise económica do funcionamento do sistema e estudar a possibilidade de reequacionar o critério de funcionamento relativo à pressão de vapor, finalizando esse a apresentação de um conjunto de medidas de melhoria.

4.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS INSTALADO

Com a instalação de *data-loggers* (Figura 4.1) da Micromec Multisens foi possível registar os valores de temperatura e humidade relativa de cada subsistema. Estes dispositivos permitem registar e acumular até 512.000 valores com um intervalo de medição mínimo de um segundo e um máximo de 16 canais a funcionar em simultâneo (cada canal corresponde a um sensor) [2].



Fig. 4.1 – Data-logger

Posteriormente a informação registada no dispositivo pode ser impressa diretamente ou transferida para um computador com o auxílio do software MM-grafix7 (Figura 4.1) da empresa Technics. O seu manuseamento e a programação de cada canal/sonda pode ser efetuado através de um computador ou através do próprio painel de controlo embutido no dispositivo [2].

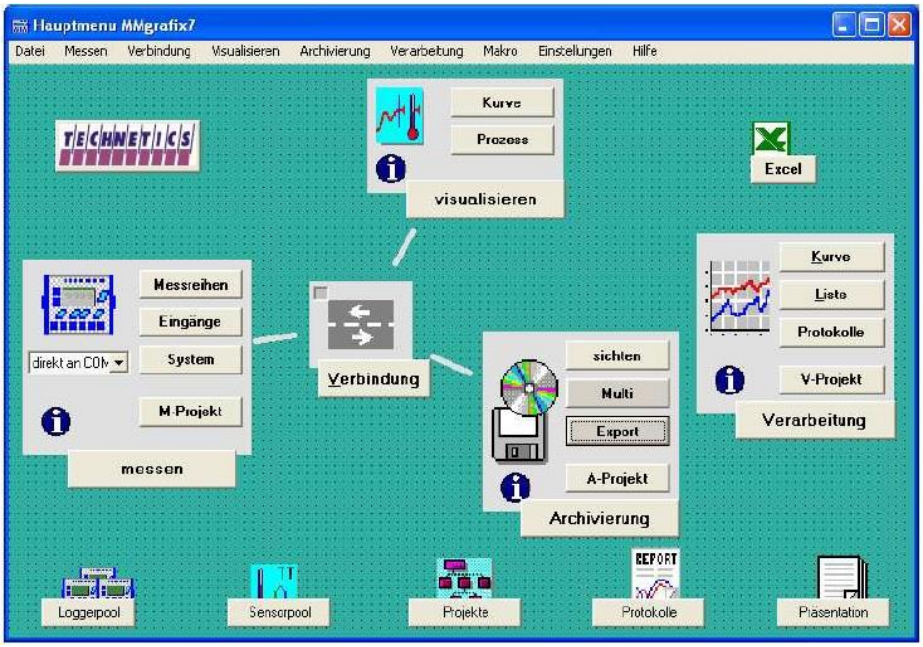


Fig. 4.2 – Software MM-grafix7 [2]

No presente estudo apenas foram utilizados 4 canais (sensor de temperatura e humidade relativa à entrada e à saída do subsistema de ventilação) e os registos foram efetuados em intervalos de 15 minutos, posteriormente transferidos para um computador.

Os sensores de temperatura e humidade relativa tiveram de ser escalonados/calibrados uma vez que o data-logger apenas regista magnitudes elétricas [2].

4.3. RECONSTITUIÇÃO DOS DADOS EM FALTA

Os registos foram executados em intervalos de 15 minutos, uma vez que se trata de milhares de registos, optou-se por trabalhar com registos médios horários. Como a variação da temperatura e da humidade relativa são relativamente lentas, considera-se um intervalo satisfatório.

No Quadro 4.1 apresentam-se os períodos de tempo em que os data-loggers não recolheram dados ou por saturação temporária/ou porque falhou o sinal, no entanto os subsistemas permaneceram em funcionamento extraindo humidade das paredes. No Quadro 4.2 apresentam-se os períodos de tempo em que os sensores de medição da humidade relativa e temperatura registaram incorretamente os valores no subsistema de ventilação Norte, muito provavelmente devido a uma incorreta calibração. Por forma a completar os dados em falta, assim como os que foram registados incorretamente (devido a problemas de calibração e funcionamento), optou-se por efetuar uma média entre os valores para o mesmo período mais próximo anterior e posterior. Como se tratam de valores (temperatura e humidade relativa) cuja variação ao longo do tempo é relativamente lenta e como o sistema durante esses períodos esteve efetivamente em funcionamento, considera-se uma boa aproximação.

Quadro 4.1 – Falta de registo de dados

Subsistema Norte		**Subsistema Sul**	
21/05/2013 14:03	14/06/2013 15:03	21/05/2013 14:00	14/06/2013 15:00
12/09/2013 15:03	14/09/2013 14:03	12/09/2013 16:00	14/09/2013 14:00
		03/10/2013 19:00	03/10/2013 19:00
		23/10/2013 00:00	23/10/2013 14:00
		26/10/2013 07:00	26/10/2013 09:00
13/12/2013 14:03	21/12/2013 15:03	13/12/2013 13:00	21/12/2013 14:00
		22/12/2013 21:00	22/12/2013 21:00
		26/12/2013 03:00	26/12/2013 10:00
		12/01/2014 15:00	12/01/2014 15:00
		31/01/2014 21:00	31/01/2014 21:00
		05/04/2014 09:00	05/04/2014 09:00
Aprox. 34 dias		Aprox. 35 dias	

Quadro 4.2 – Dados registados incorretamente

Subsistema Norte			
Entrada		Saída	
20/07/2011 22:03	20/07/2011 22:03		
		23/07/2011 17:00	24/07/2011 06:00
		13/08/2011 20:00	14/08/2011 07:00

		21/08/2011 21:00	22/08/2011 13:00
		15/10/2011 15:00	15/10/2011 15:00
		20/10/2011 09:00	20/10/2011 10:00
		03/04/2011 04:00	03/04/2011 08:00
		13/12/2011 22:00	14/12/2011 18:00
		12/01/2012 22:00	14/01/2012 14:00
		11/03/2012 03:00	11/03/2012 03:00
		16/04/2012 00:00	16/04/2012 09:00
30/04/2012 11:03	30/04/2012 11:03		
		04/05/2012 18:00	04/05/2012 18:00
26/05/2012 06:03	26/05/2012 06:03		
		30/05/2012 10:00	30/05/2012 10:00
26/10/2012 11:03	26/10/2012 11:03		
		12/11/2012 11:00	12/11/2012 11:00
		23/01/2013 03:00	23/01/2013 14:00
		01/02/2013 21:00	08/02/2013 17:00
		11/02/2013 14:00	11/02/2013 14:00
		03/03/2013 18:00	03/03/2013 18:00
		03/03/2013 22:00	04/03/2013 08:00
		11/03/2013 04:00	11:03:2013 08:00
		22/03/2013 20:00	30/03/2013 17:00
		25/06/2013 23:00	26/06/2013 13:00
		06/09/2013 00:00	06/09/2013 14:00
		23/10/2013 00:00	23/10/2013 16:00
		26/10/2013 07:00	26/10/2013 08:00
		04/11/2013 17:00	08/11/2013 21:00
		25/11/2013 18:00	30/11/2013 18:00
		09/12/2013 01:00	09/12/2013 08:00
		26/12/2013 04:00	26/12/2013 09:00
		05/01/2014 11:00	05/01/2014 13:00
		24/01/2014 20:00	02/02/2014 16:00
		05/02/2014 20:00	06/02/2014 09:00

	13/02/2014 08:00	13/02/2014 08:00
	05/04/2014 18:00	05/04/2014 19:00
	06/04/2014 18:00	07/04/2014 07:00
Aproximadamente 4 horas	Aproximadamente 42 dias	

Por forma a simplificar a interpretação e visualização dos dados registados e dos dados obtidos indiretamente através destes (quantidade de água retirada, diferenças de pressão de vapor, número de horas de funcionamento, etc.), foram elaborados vários gráficos e tabelas que combinam as várias grandezas analisadas.

4.4. SÍNTESE DOS SUBSISTEMAS IMPLEMENTADOS

Por forma a facilitar a interpretação da informação que se apresenta nos tópicos seguintes, expõem-se de forma sintética no Quadro 4.3 as principais caraterísticas subjacentes a cada subsistema de ventilação instalado na Igreja.

Quadro 4.3 – Caraterísticas principais de cada subsistema

	Norte	**Sul**
Comprimento	130 m	70 m
Orientação	60% Norte / 40% Este	100% Sul
Entrada de ar	Exterior / Este	Interior / Sul
Saída de ar	Exterior / Oeste	Exterior / Sul
Diâmetro da conduta	200 mm	200 mm
Potência do ventilador	95W	95W

4.5. QUANTIDADE DE ÁGUA RETIRADA PELOS SUBSISTEMAS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA À ENTRADA

Na Figura 4.3 apresentam-se os valores horários da variação da temperatura à entrada de cada subsistema e a quantidade de água retirada por este ao longo de cada ano analisado (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014).

Os valores relativos à temperatura foram retirados diretamente do equipamento de registo e a quantidade de água retirada para o exterior foi calculada através da expressão 4.1:

$$w = 0{,}002167 * \left(\frac{Ps}{273+Ts} - \frac{Po}{273+To}\right) * 0{,}0198234 \quad (4.1)$$

em que:

w – Quantidade de água retirada pelo sistema [kg];

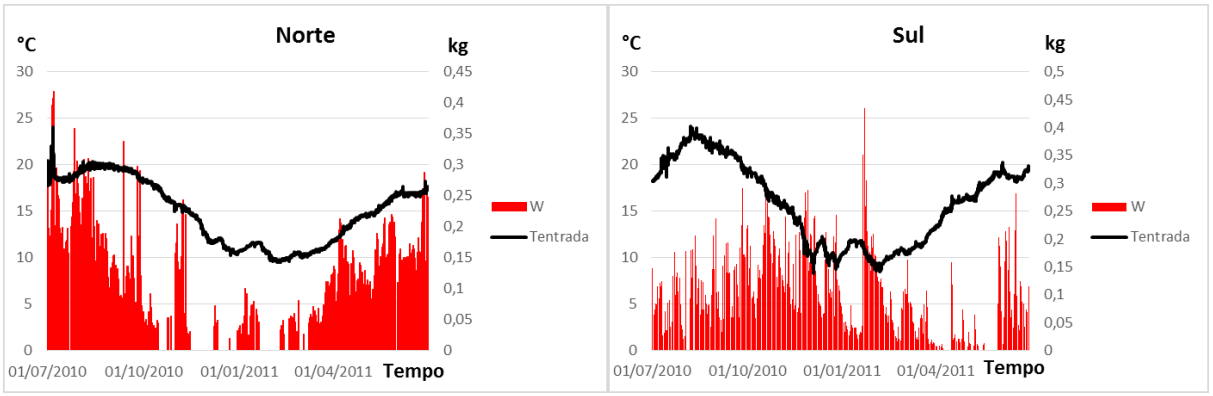
Ps - Pressão de vapor à saída do sistema [Pa];

Po - Pressão de vapor à entrada do sistema [Pa];

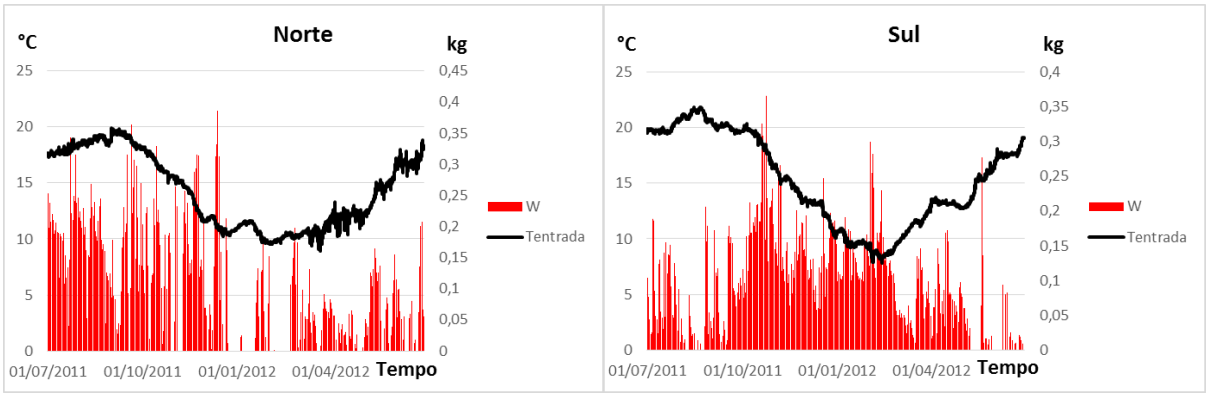
Ts – Temperatura à saída do sistema [ºC];

To – Temperatura à entrada do sistema [ºC].

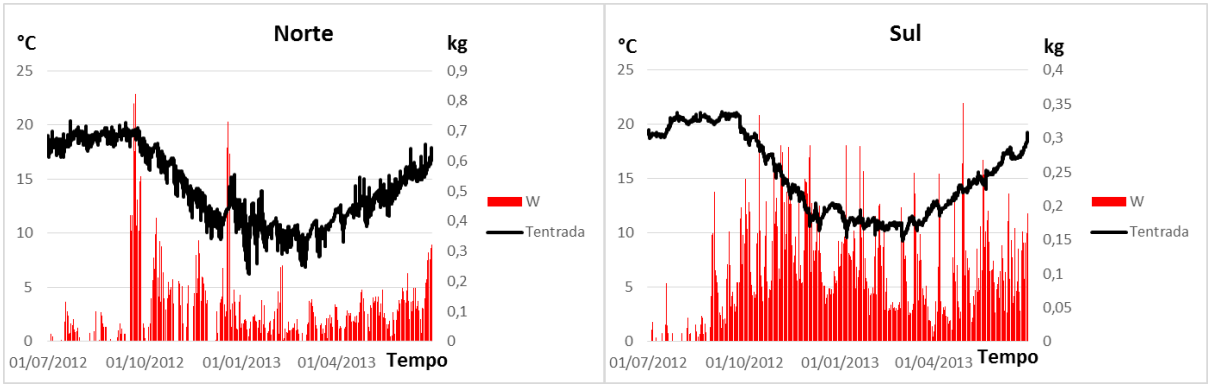
2010/2011



2011/2012



2012/2013



2013/2014

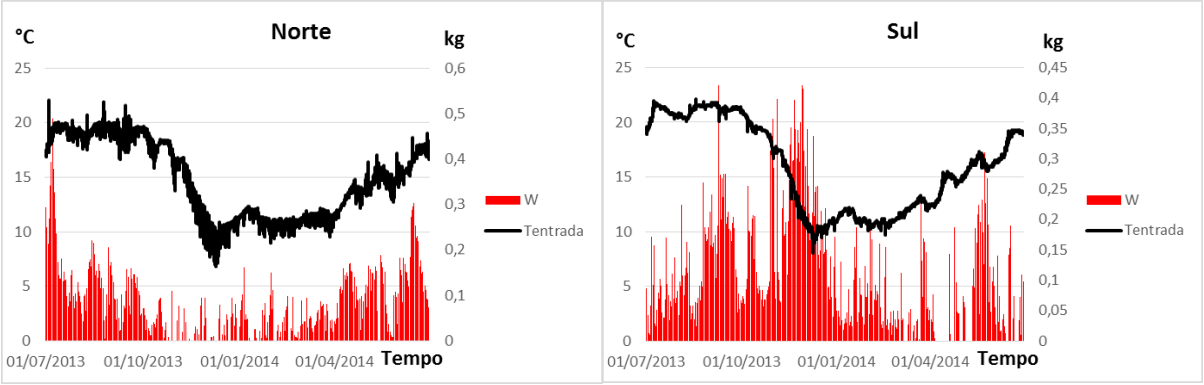


Fig. 4.3 – Variação da temperatura à entrada do subsistema Norte e Sul e quantidade de água retirada por cada subsistema

No subsistema Norte existe uma relação quase direta entre o valor da temperatura à entrada do subsistema e a quantidade de água retirada por este. Quanto mais elevada for a temperatura, maior será a quantidade de água retirada pelo subsistema que por sua vez coincide com o período de verão.

No subsistema Sul verifica-se o oposto, quanto menor for o valor da temperatura à entrada do subsistema maior é a quantidade de água retirada. O sistema mostra-se mais eficaz durante o período de inverno.

Este comportamento pode ser explicado pelo facto de no período de verão a temperatura no interior da conduta ser inferior à temperatura no interior da Igreja, aumentando a possibilidade de ocorrência de condensações no interior da mesma. Nestas situações o dispositivo de controlo está programado de forma a não entrar em funcionamento. Este comportamento repete-se ao longo dos vários anos analisados.

Relativamente aos valores registados de temperatura (com o sistema em funcionamento) à entrada de cada subsistema (Quadro 4.4), é possível concluir que apesar da temperatura à entrada dos subsistemas afetar a quantidade de água retirada, uma temperatura média superior não implica que o subsistema retire maior quantidade de água e vice-versa. No entanto o subsistema Norte apresenta-se sensivelmente 0,12°C superior. Este facto ajuda a excluir a temperatura como principal condicionante para a discrepância entre a quantidade de água retirada pelos dois subsistemas.

Quadro 4.4 – Valores médios de temperatura e quantidade de água acumulada retirada por cada subsistema

	Norte		**Sul**	
	Temperatura média [°C]	W acumulado [kg]	Temperatura média [°C]	W acumulado [kg]
2010/2011	15,52	355,102	15,24	443,670
2011/2012	15,15	353.496	14,15	425,269
2010/2013	13,59	366,661	14,37	476,489
2013/2014	15,42	270,489	15,80	444,555

Com o acesso ao Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos - SNIRH [23] foi possível obter dados relativos à temperatura média mensal de uma estação metrológica localizada na cidade de Barcelos (a 6 kms do Mosteiro de Vilar de Frades). Apenas existiam dados mensais de temperatura relativos ao primeiro ano analisado, 2010/2011 (Figura 4.4).

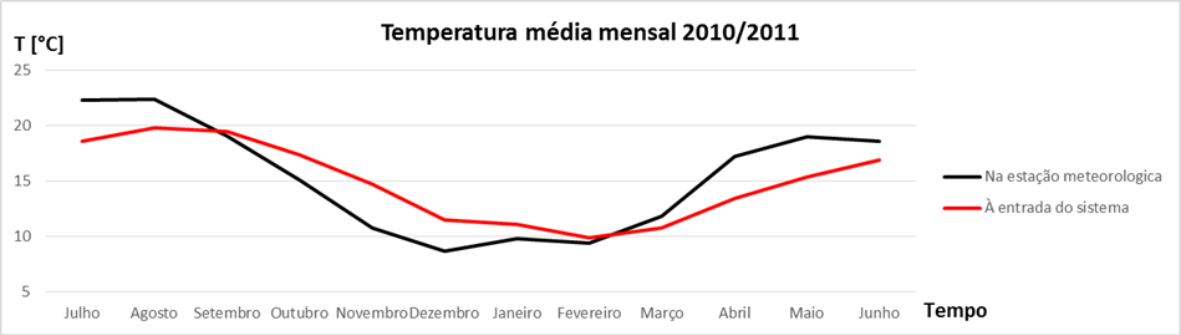


Fig. 4.4 – Temperatura média mensal registada na estação meteorológica de Barcelos (Estação 04F/01C) e à entrada do sistema

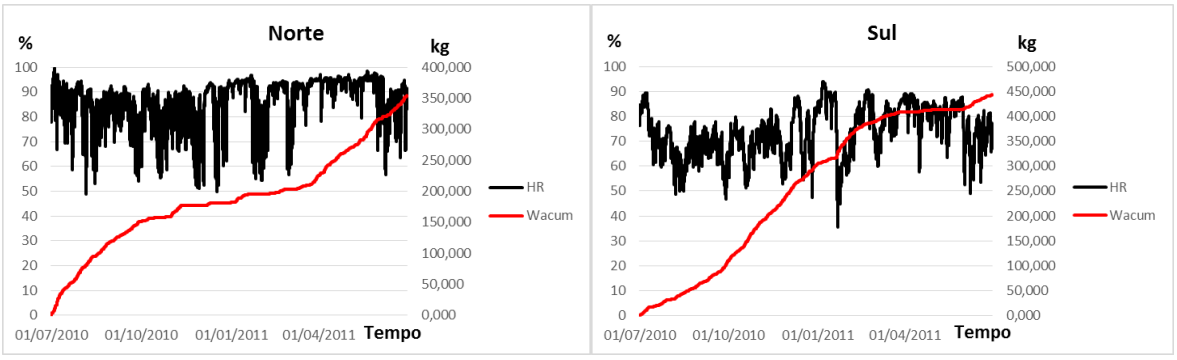
Comparando os dados relativos ao mesmo período expostos na Figura 4.4 foi possível concluir que os valores de temperatura registados pelo sensor à entrada do subsistema Norte (admissão de ar do exterior), são ligeiramente diferentes dos valores registados na estação meteorológica (em média varia 1°C), no entanto a curva apresenta um comportamento semelhante. Isto demonstra que temperatura poderá estar dependente da orientação da entrada de ar exterior do sistema (assim como da localização da sonda no interior da conduta) visto que a estação meteorológica não se encontra voltada para uma direção específica.

4.6. QUANTIDADE DE ÁGUA RETIRADA PELOS SUBSISTEMAS EM FUNÇÃO DA HUMIDADE RELATIVA À ENTRADA

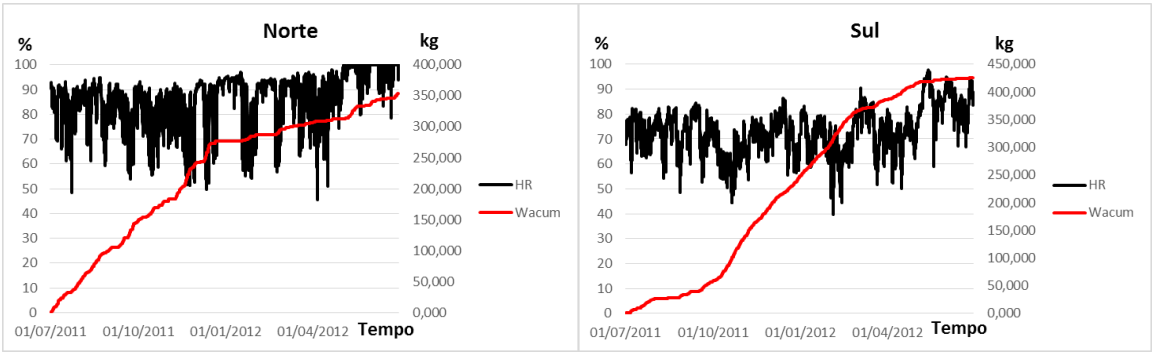
Na Figura 4.5 apresentam-se os valores horários da variação da humidade relativa à entrada de cada subsistema e a quantidade de água retirada ao longo de cada ano analisado (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014).

Os valores referentes à humidade relativa foram retirados diretamente do equipamento de registo e a quantidade de água retirada para o exterior foi calculada através expressão 4.1.

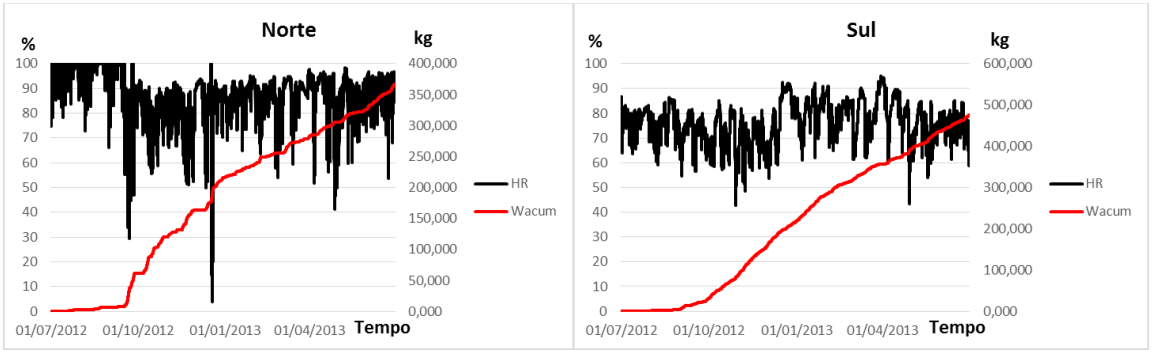
2010/2011



2011/2012



2012/2013



2013/2014

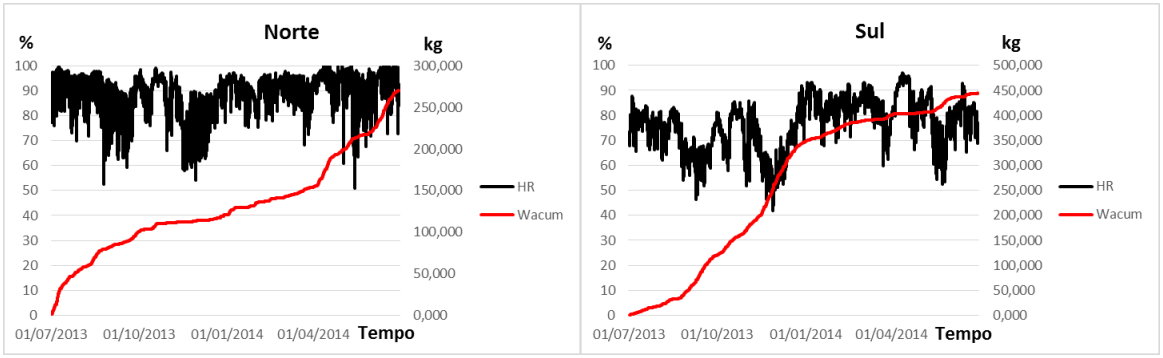


Fig. 4.5 – Variação da humidade relativa à entrada do subsistema Norte e Sul e quantidade de água retirada por cada subsistema

O subsistema Norte apresenta maiores variações de humidade relativa à entrada do subsistema em comparação com o subsistema Sul. Tal acontece porque o ar admitido no subsistema Sul é proveniente do interior da Igreja, absorvendo as variações bruscas de humidade relativa exterior. Ambos os subsistemas apresentam valores mais elevados de humidade relativa no período de inverno, no entanto para o mesmo período o subsistema Sul funciona eficazmente (maior inclinação da reta a vermelho) enquanto o subsistema Norte reduz a quantidade de água retirada (menor inclinação da reta a vermelho).

O subsistema Norte apresenta uma humidade relativa média à entrada (com o sistema em funcionamento) na ordem dos 88% e o subsistema Sul na ordem dos 73% ao longo dos vários anos em análise. Esta diferença de aproximadamente 15% (Quadro 4.5) permite justificar até certo ponto a discrepância entre a quantidade de água retirada pelos dois subsistemas. Ao contrário do que se verificou na análise anterior, relativamente à temperatura, a humidade relativa à entrada do subsistema tem um papel fundamental no funcionamento e eficácia do mesmo.

O critério que limita o funcionamento do sistema em função da humidade relativa (HR > 35%) nunca foi acionado, a humidade mínima registada com o sistema em funcionamento foi de 48,3% no subsistema Norte e 35,4% no subsistema Sul. Esta observação permite concluir que o critério deve ser repensado, por exemplo reduzindo o seu valor, não colocando em causa a eficácia do sistema e contribuindo para a diminuição da ocorrência de cristalização e dissolução de sais (Quadro 2.1) que são fonte de degradação do sistema e do meio onde ele se encontra instalado. Todavia, esta é uma situação delicada e de elevada complexidade, dependendo do tipo de sal, concentração, misturas, etc, que num futuro deverá ser cuidadosamente estudada.

Quadro 4.5 – Valores médios de humidade relativa e quantidade de água acumulada retirada por cada subsistema

	Norte		**Sul**	
	Humidade relativa média [°C]	W acumulado [kg]	Humidade relativa média [°C]	W acumulado [kg]
2010/2011	89,79%	355,102	72,50%	443,670
2011/2012	84,85%	353.496	70,52%	425,269
2010/2013	85,09%	366,661	76,59%	476,489
2013/2014	92,41%	270,489	73,99%	444,555

Com o acesso ao SNIRH [23] foi possível obter os dados relativos à precipitação mensal de uma estação metrológica localizada na cidade de Barcelos. Apenas existiam dados mensais de precipitação relativos aos dois primeiros anos de análise, 2010/2011 e 2011/2012 (Figura 4.6).

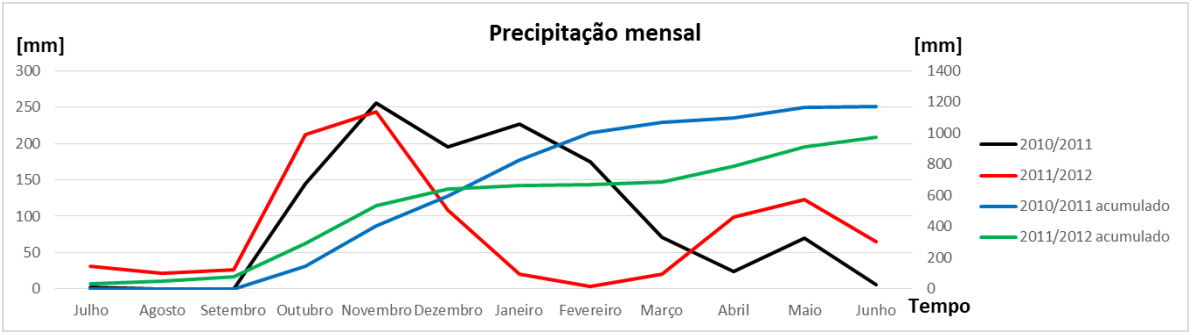


Fig. 4.6 – Precipitação mensal registada na estação metrológica de Barcelos (Estação 04F/01C)

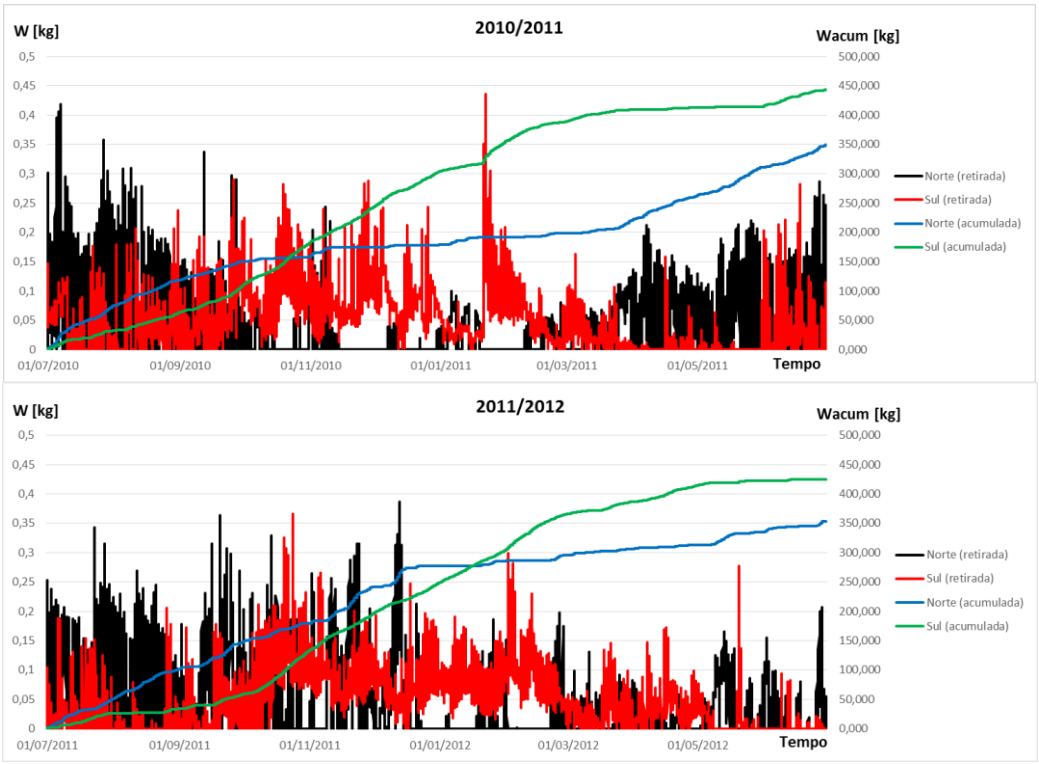
Comparando os dados relativos ao mesmo período das Figura 4.5 e 4.6 foi possível concluir que a quantidade de água retirada por cada subsistema não está diretamente dependente dos valores da precipitação (é importante salientar que nos períodos em que ocorre precipitação, a humidade relativa já se encontra próxima de 100%). No subsistema Norte o ar admitido é proveniente do exterior e para os meses de Setembro a Novembro a precipitação é muito semelhante, no entanto no ano de 2011/2012 o sistema funcionou eficazmente em comparação com o mesmo período do ano anterior.

A predominância da direção da chuva nos períodos de inverno ser Sul e a admissão do sistema se localizar a Este, poderá ser o principal motivo das desigualdades encontradas.

4.7. QUANTIDADE DE ÁGUA RETIRADA E ACUMULADA

Na Figura 4.7 apresenta-se a variação horária da quantidade de água retirada e acumulada em cada subsistema em cada ano em analisado.

Os valores da quantidade de água retirada para o exterior foram obtidos através da expressão 4.1.



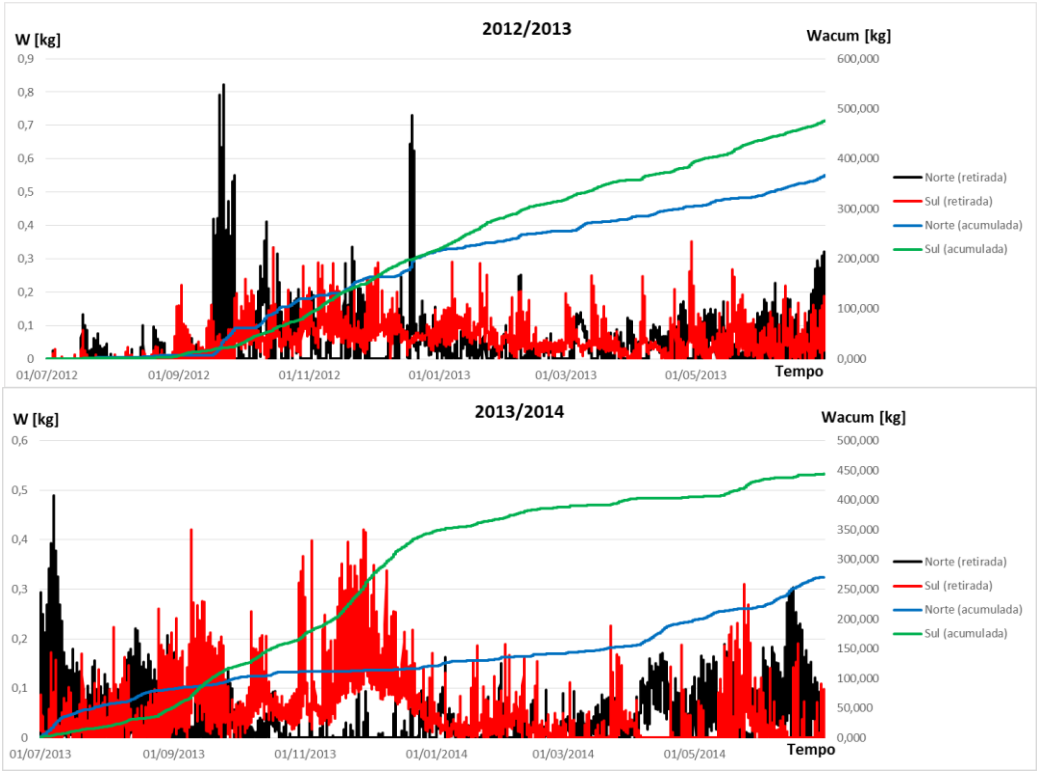


Fig. 4.7 – Variação da quantidade de água retirada e acumulada de cada subsistema (Norte e Sul)

O subsistema de ventilação Sul retirou uma maior quantidade de água (1790,68 kg) do que o subsistema Norte (1345,68 kg).

Sessenta por cento da água retirada por cada subsistema ocorre durante o primeiro semestre de cada ano analisado (Quadro 4.6), com a exceção do ano 2013/2014 no subsistema Norte e do ano 2012/2013 no subsistema Sul.

O subsistema Sul retira água de uma forma mais contínua ao longo dos vários anos.

Quadro 4.6 – Quantidade de água retirada por cada subsistema em cada semestre

	Norte		**Sul**	
	1º Semestre	2º Semestre	1º Semestre	2º Semestre
2010/2011	178,87 kg	171,13 kg	243,31 kg	200,36 kg
2011/2012	277,20 kg	76,30 kg	248,13 kg	177,14 kg
2012/2013	215,96 kg	150,70 kg	218,81 kg	257,68 kg
2013/2014	120,96 kg	149,53 kg	347,98 kg	97,56 kg
Total	742,99 kg	547,66 kg	1058,23 kg	732,74 kg
	57,57%	42,43%	59,09%	40,91 %

4.8. VARIAÇÃO DA PRESSÃO DE VAPOR AO LONGO DO TEMPO E PERÍODOS DE FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS

Na Figura 4.8 encontram-se os valores horários da pressão de vapor à entrada e à saída de cada subsistema (Norte e Sul) e os períodos de funcionamento em cada ano de analisado.

Os valores de pressão de vapor foram obtidos através dos valores de humidade relativa e temperatura com o auxílio da expressão 4.2.

$$P = 611 * e^{\frac{17{,}08*T}{234{,}18+T}} * \frac{HR}{100} \quad (4.2)$$

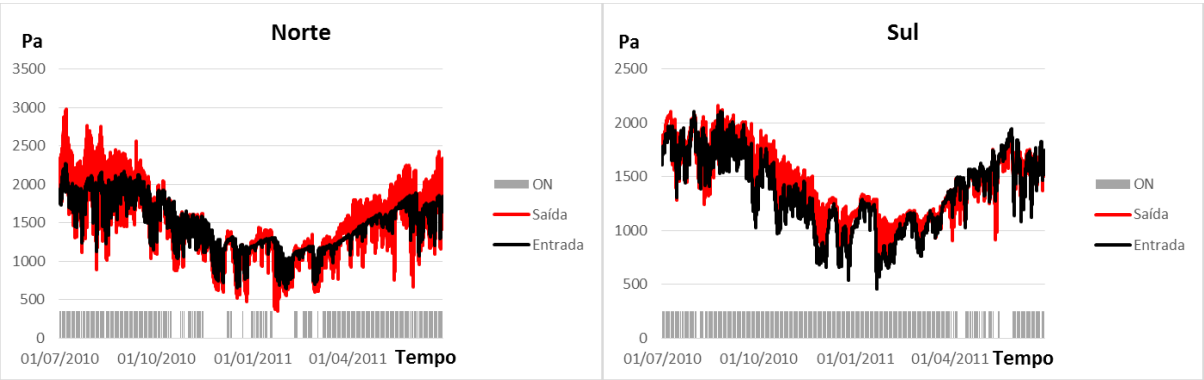
em que:

P – Pressão de vapor [kPa];

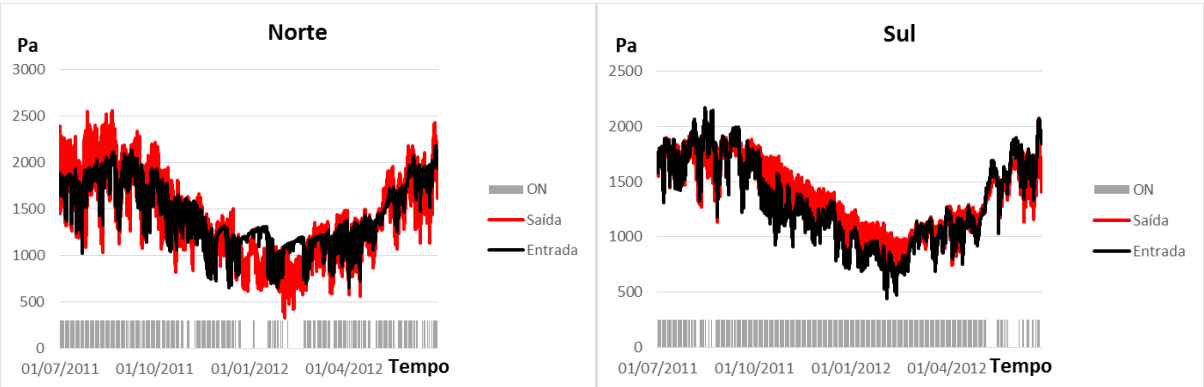
T – Temperatura [°C];

HR – Humidade relativa [%].

2010/2011



2011/2012



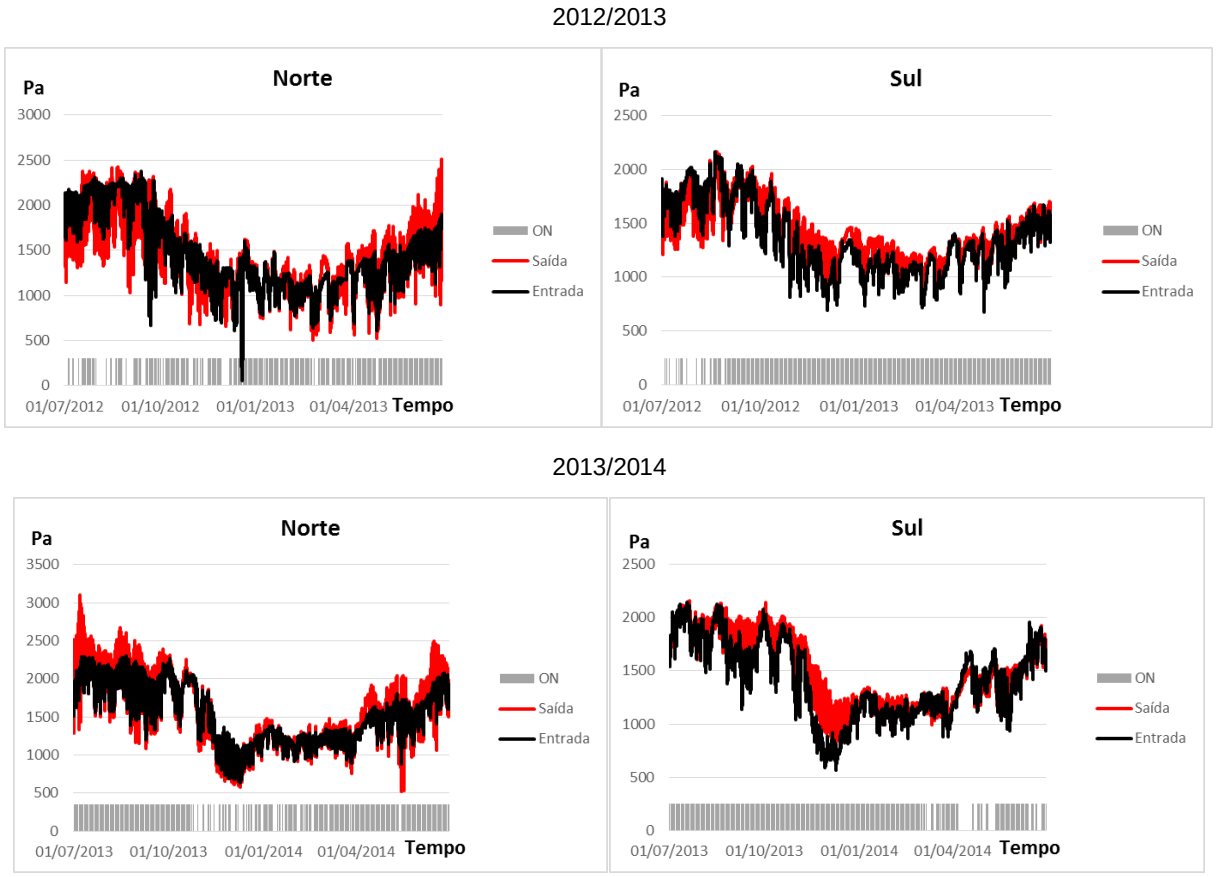


Fig. 4.8 – Variação da pressão de vapor à entrada e saída do subsistema Norte e Sul e respetivo período de funcionamento

Durante os quatro anos analisados no presente estudo, o subsistema Norte permaneceu em funcionamento 17455 horas o que corresponde a 50% do tempo total e o subsistema Sul permaneceu em funcionamento 26012 horas o que corresponde a 75% do total do período em análise.

A maioria das paragens ocorridas no subsistema Norte ocorreram no período de inverno e no subsistema Sul no período de verão (devido a problemas de condensações no interior da conduta referidos no tópico 4.5). O menor número de arranques (Figura 4.9) aliado ao funcionamento mais contínuo do subsistema Sul, reduz o risco de condensação no interior da conduta, contribuindo para a durabilidade do próprio sistema (reduzindo a necessidade de manutenção e substituição) e das paredes onde este se encontra instalado (menor probabilidade de ocorrência de dissoluções/cristalizações de sais). No entanto é o que apresenta custos energéticos associados mais elevados (maior tempo de funcionamento).

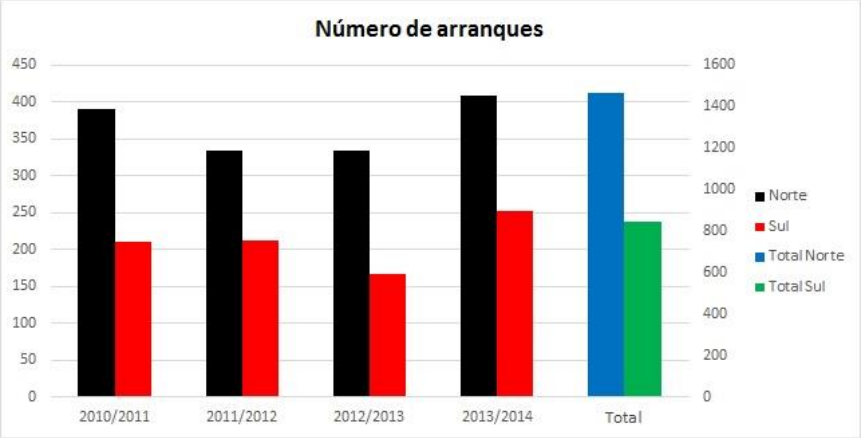


Fig. 4.9 – Número de arranques de cada sistema de ventilação

Durante os meses de verão o subsistema Norte apresentou uma maior variação de pressão de vapor positiva, contribuindo para uma maior eficácia do sistema nesses períodos. O subsistema Sul apresenta uma maior eficácia nos meses de inverno.

Para variações de pressão de vapor muito pequenas os subsistemas encontram-se a funcionar, no entanto retiram uma quantidade muito reduzida de água.

4.8.1. ANÁLISE ECONÓMICA

A análise económica que se apresenta (Quadro 4.7) pretende quantificar e justificar os gastos energéticos inerentes ao funcionamento de cada subsistema.

O ventilador instalado (Figura 4.10) em cada subsistema é um ventilador helico-centrífugo (o ar à entrada segue um o trajeto conforme as superfícies cilíndricas coaxiais e á saída segue uma direção axial relativamente à entrada) de baixo perfil, fabricado em chapa de aço galvanizado com uma potência máxima absorvida de 95W [22].

O custo da energia é obtido com o auxílio à expressão 4.3, e o custo médio horário da energia em kWh durante o período analisado é considerado sensivelmente 0,18€/kWh (valor estimado tendo em conta que não foi possível obter o valor exato).



Fig. 4.10 – Ventilador [22]

$$Custo = \frac{Potência}{1000} * 0.18 * Período\ de\ funcionamento \quad (4.3)$$

em que:

Custo – Custo horário [€/hora]

Potencia – Potencia do ventilador [W]

Período de funcionamento – Horas de funcionamento [horas]

0.18 – Valor médio do custo de energia [€/kWh]

Quadro 4.7 – Gastos energéticos inerentes ao funcionamento de cada subsistema

	Norte			Sul		
	Tempo de funcionamento [horas]	Custo energético [€]	W acumulado [kg]	Tempo de funcionamento [horas]	Custo energético [€]	W acumulado [kg]
2010/2011	4318	73,84	355,102	6580	112,52	443,670
2011/2012	3920	67,03	353.496	6206	106,12	425,269
2010/2013	4584	78,39	366,661	6907	118,11	476,489
2013/2014	4633	79,22	270,489	6257	106,99	444,555
Total	17455	298,48	1345,758	25950	443,75	1789.983
		4,51 [kg/€]			4,03 [kg/€]	

De acordo com os valores apresentados no Quadro 4.7, do ponto de vista energético o subsistema de ventilação Sul é 12% mais eficiente que o subsistema Norte, necessitando apenas de 4,03€ para retirar 1 kg de água do interior.

4.8.2. Proposta de otimização económica

Como já foi referido no capítulo anterior, o sistema entra em funcionamento quando a humidade relativa do ar à entrada é superior a 35% e quando o diferencial de pressões de vapor entre a saída e entrada de ar é positivo.

Na análise que se segue pretende-se avaliar a possibilidade de alterar o critério da diferença de pressão de vapor.

Optou-se por abordar os dados referentes apenas ao ano 2010/2011 uma vez que, como se verificou anteriormente, não existiram variações significativas entre os vários anos analisados que justifiquem uma análise mais global (basta monitorizar um ano para se conhecer e definir o funcionamento ótimo do sistema).

Através da análise da Figura 4.11 verifica-se que para pequenas variações de pressão de vapor entre a saída e a entrada de cada subsistema o sistema encontra-se a funcionar retirando uma quantidade muito reduzida de água.

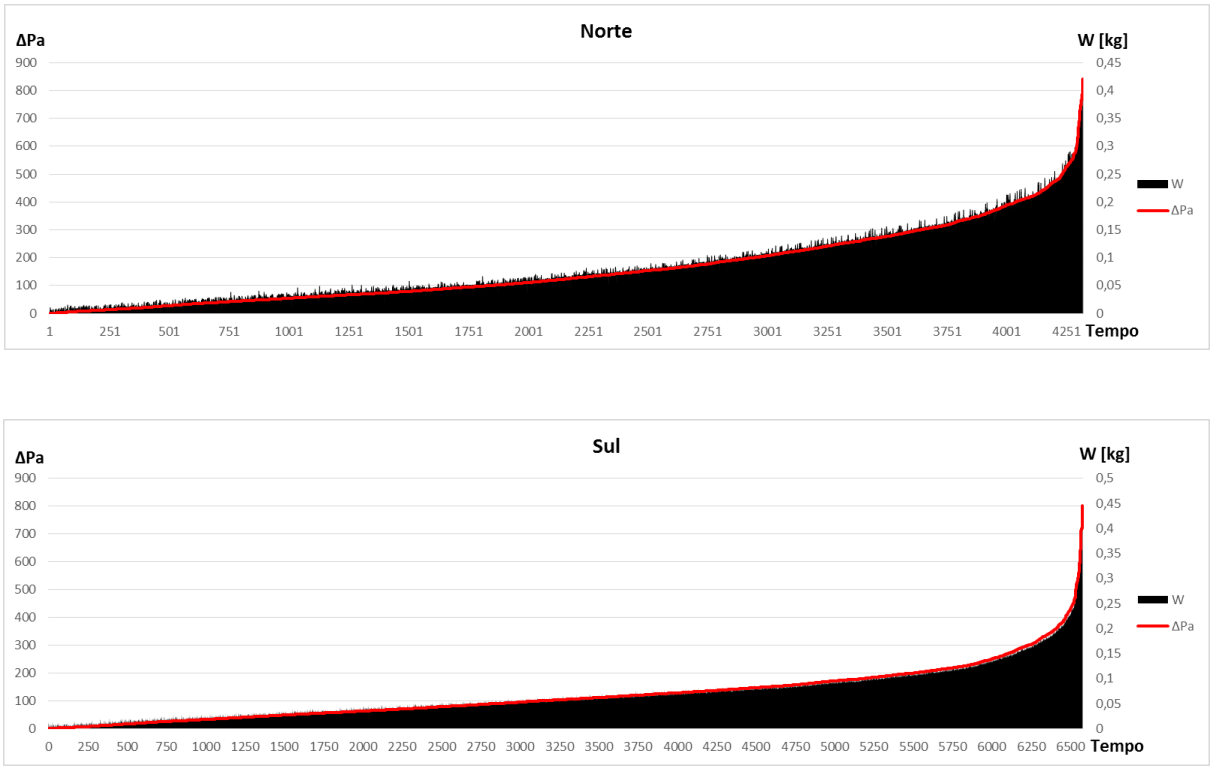


Fig. 4.11 – Diferença da pressão de vapor de cada subsistema (Norte e Sul) e respetiva quantidade de água retirada em 2010/2011

Com base nesta observação, pretende-se alterar o critério de pressão de vapor de forma a que o sistema reduza aproximadamente 2% (8kg) a quantidade de água retirada. Esta condição implica alterar o critério de pressão de vapor para aproximadamente 30kPa, isto é, o sistema apenas entra em funcionamento para diferenças de pressão superiores a 30 kPa.

Optou-se por uma redução de 2% de forma a evitar que o sistema entre em funcionamento quando retira uma quantidade muito reduzida (inferior a 0,02kg/h) de água. Também foi tido em conta a redução dos custos energéticos, sem diminuir de forma excessiva a quantidade total de água retirada pelos sistemas. No entanto seria de igualmente interessante estudar vários cenários, nomeadamente reduções de 4%, 8% e 12%.

No Quadro 4.8 que se segue apresenta-se a redução do tempo de funcionamento, os custos e a quantidade de água retirada inerentes à alteração do critério relativo à diferença de pressão de vapor entre a saída e entrada do subsistema de ventilação.

Quadro 4.8 – Alterações provocados pela modificação do critério de funcionamento

	Norte			**Sul**		
	Tempo de funcionamento novo/original [horas]	Custo energético novo/original [€]	W acumulado novo/original [kg]	Tempo de funcionamento novo/original [horas]	Custo energético novo/original [€]	W acumulado novo/original [kg]
2010/2011	3776/4318 (12,5%)	64,6/73,8 (12,5%)	350,079/355,10 (1,4%)	5669/6580 (13,8%)	96,9/112,5 (13,9%)	432,96/443,67 (2,4%)
2011/2012	3411/3920 (13,0%)	58,3/67,0 (13,0%)	349,07/353.50 (1,3%)	5474/6206 (11,8%)	93,6/106,1 (11,8%)	416,59/425,27 (2,0%)
2012/2013	3888/4584 (15,2%)	66,5/78,4 (15,2%)	359,96/366,66 (1,8%)	6253/6907 (9,5%)	106,9/118,1 (9,5%)	467,38/476,49 (1,9%)
2013/2014	3650/4633 (21,2%)	62,4/79,2 (21,2%)	261,24/270,49 (3,4%)	5217/6257 (16,6%)	89,21/107,0 (16,6%)	432,44/444,56 (2,7%)
Total	14725/17455 (15,6%)	251,8/298,5 (15,6%)	1320,35/1345,76 (1,9%)	22613/25950 (12,9%)	386,7/443,8 (12,9%)	1749,37/1789.98 (2,3%)
	5,07/4.51 [kg/€] (12,4%)			4,52/4,03 [kg/€] (12,2%)		

A introdução do novo critério permite reduzir os gastos energéticos em aproximadamente 14% (15,6% subsistema Norte e 12,9% subsistema Sul) e o desgaste do ventilador (redução do número de para/arranca e tempo de funcionamento) sem comprometer de forma excessiva o funcionamento do sistema (redução da quantidade de água retirada em 1,9% no subsistema Norte e 2,3% no subsistema Sul). Como se tratam de paragens em que em que o diferencial de pressões é positivo (entre 0 e 30 kPa), mesmo que exista alguma circulação de ar no interior da conduta (uma vez que o sistema não é fechado), o risco de condensações e cristalizações no interior é reduzido. O ideal seria a adoção de um sistema semifechado que apenas permitisse a circulação de ar no mesmo sentido do funcionamento do sistema.

Com a redução dos custos energéticos (103,7€ no período analisado de quatro anos) é possível efetuar parte da manutenção (limpezas) e possíveis reparações do sistema, sem custos adicionais.

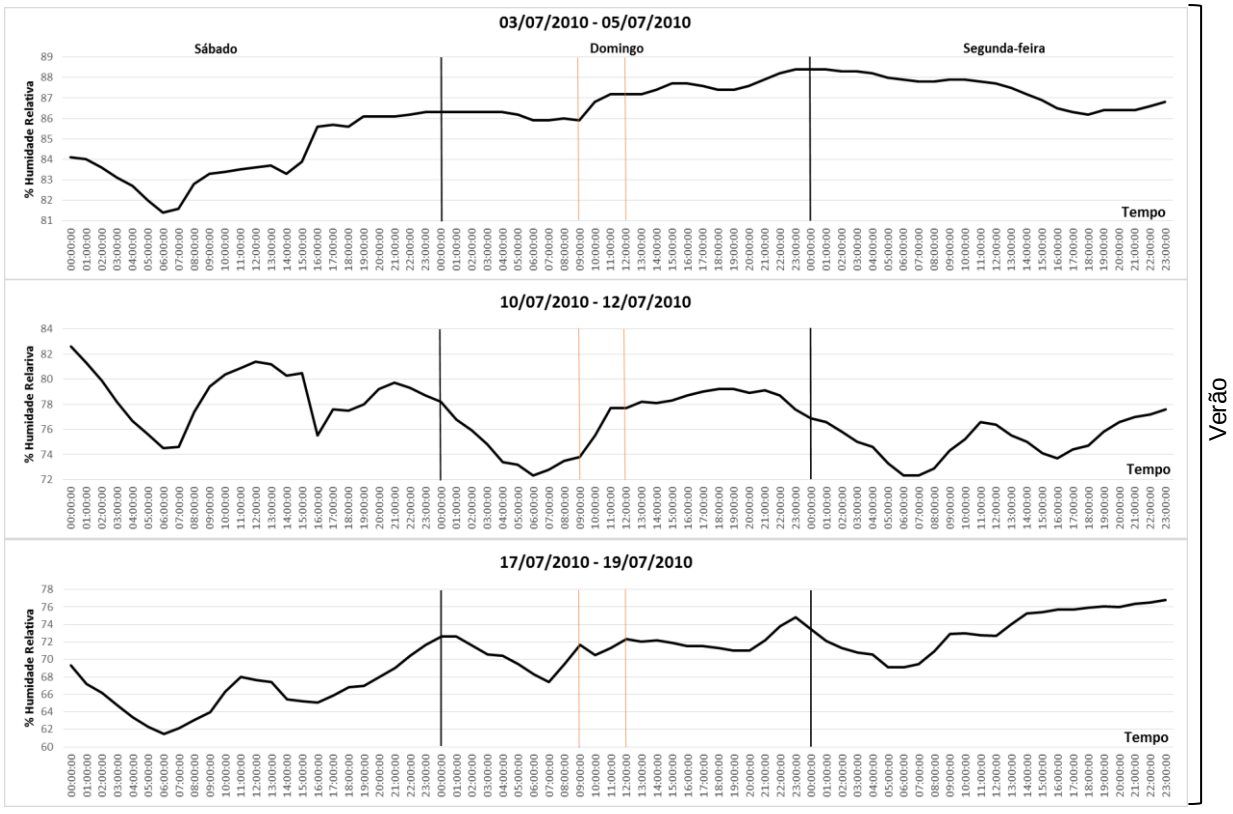
Esta análise permitiu ganhar alguma sensibilidade relativamente ao critério de funcionamento relacionado com a pressão de vapor, no entanto cada caso a tratar é um caso independente com exigências ao nível da eficácia diferentes, o que leva a que se adotem critérios que melhor se adaptam à resolução da situação.

4.9. INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DA IGREJA NO COMPORTAMENTO DO SUBSISTEMA DE VENTILAÇÃO SUL

Após as várias intervenções de recuperação realizadas à Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades esta voltou a exercer funções religiosas subjacentes à função de Igreja assim como novas funções turísticas, ficando a fazer parte dos roteiros turísticos.

Como a admissão de ar pertencente ao subsistema Sul se localiza no interior da Igreja, considerou-se ser de interesse estudar a influência da produção de vapor de água no interior do edifício na eficácia do subsistema tendo em consideração que um ser humano produz aproximadamente 70/80 gramas (em função da massa corporal e da atividade praticada) de água por dia.

Segundo um levantamento efetuado, a Igreja abre portas de quarta-feira a domingo no verão e de sexta-feira a domingo no inverno das 10h até as 18h. Para além de missas esporádicas, é realizada todas as semanas uma missa dominical das 9:45h até às 11h. No presente estudo optou-se por analisar a influência da missa dominical no aumento da humidade no interior da Igreja devido à periodicidade da mesma e maior ocupação do espaço. A Figura 4.12 apresenta a variação da humidade relativa ao longo de três dias consecutivos, sábado, domingo e segunda-feira em três semanas do mês de Julho (verão) do ano 2010 e três semanas do mês de Janeiro (inverno) de 2011. Para que seja percetível a alteração da humidade no período analisado, optou-se por escolher um intervalo de tempo relativamente pequeno.



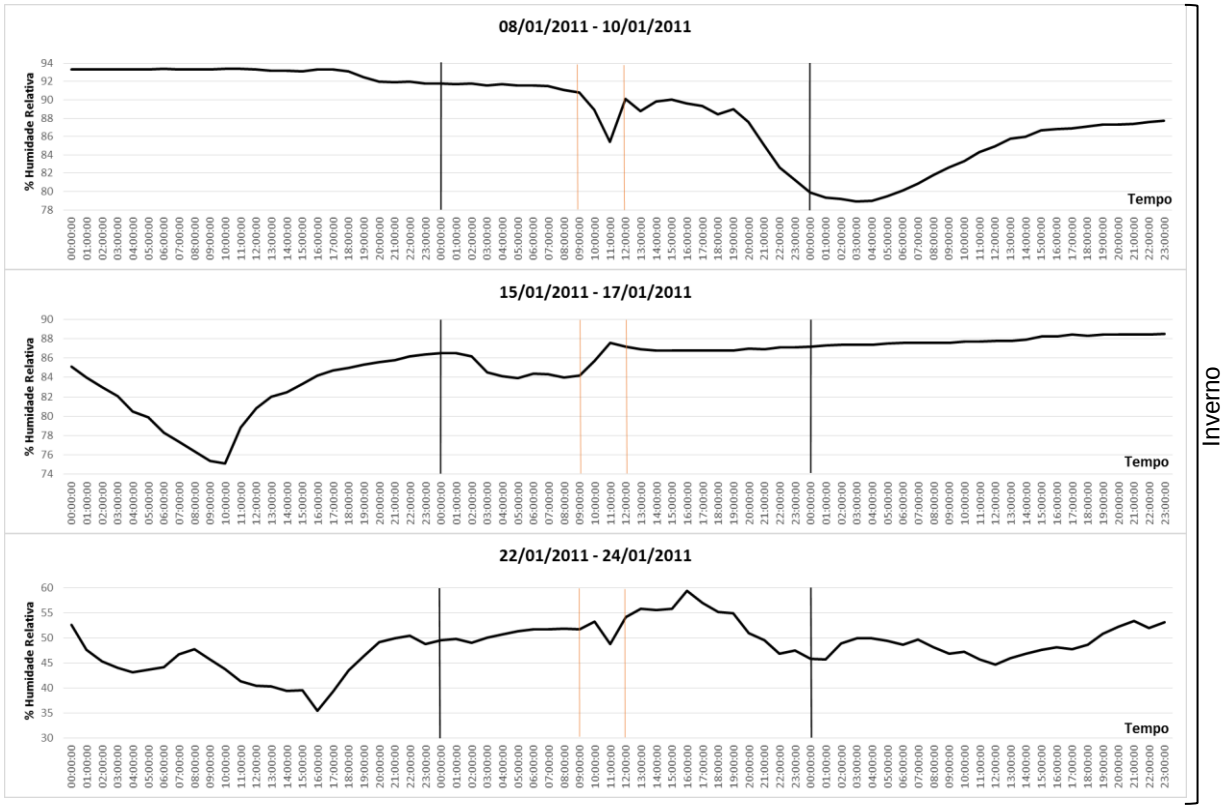


Fig. 4.12 – Variação da humidade relativa à entrada do subsistema Sul

Durante os vários períodos de análise do mês de Julho (3 a 7, 10 a 12 e 17 a 19) verificou-se um ligeiro aumento da humidade relativa à entrada do sistema de 1.3%, 3.9%, 0.6% respetivamente. Durante o mês de Janeiro (8 a 10, 15 a 17 e 22 a 24) a situação alterou-se, a humidade diminui-o e aumentou -5,4%, 3% e 2,4% respetivamente. A diminuição da humidade pode ser explicada pelo facto de a humidade no interior já se encontrar muito elevada e a utilização da Igreja (abertura das portas) contribuiu para a circulação e renovação do ar interior, uma vez que esta se encontra com as janelas sempre fechadas para evitar a entrada de animais que contribuam para a degradação do espaço (morcegos, pombos, etc.).

Como se tratam de variações muito ligeiras, pode-se concluir que a utilização da Igreja altera de facto a humidade relativa interior, no entanto esta alteração é muito reduzida e por um período de tempo muito limitado não afetando de forma significativa a eficácia do sistema instalado.

4.10. FUNCIONAMENTO DOS SUBSISTEMAS DE DIA E DE NOITE

Na análise que se segue pretende-se comparar o funcionamento dos subsistemas Norte e Sul em diferentes períodos do dia. A Figura 4.13 representa a quantidade de água retirada por cada subsistema em dois períodos distintos, de dia (9h – 21h) e de noite (21h – 9h) durante o ano 2010/2011.

Optou-se por avaliar os dados referentes apenas ao ano 2010/2011 uma vez que como se verificou anteriormente, não existiram variações significativas entre os vários anos analisados que justifiquem uma análise mais global.

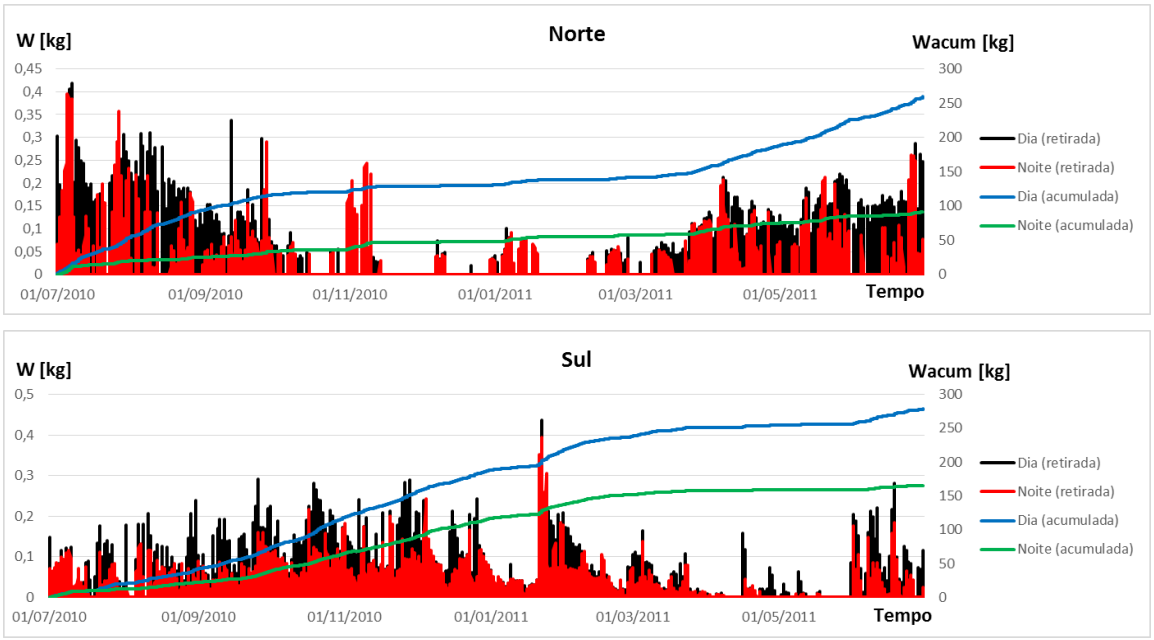


Fig. 4.13 – Variação da quantidade de água retirada e acumulada de cada subsistema (Norte e Sul) em dois períodos distintos do dia

O subsistema de ventilação Norte retirou uma maior quantidade de água de dia no valor de: 259,22 kg e uma menor quantidade de agua de noite de valor 90,85 kg. O subsistema Sul apresentou um comportamento em algo semelhante, no entanto a diferença entre a quantidade de água retirada é de 278,59 kg dia para 165,08 kg de noite.

De acordo com o Quadro 4.9, o subsistema Norte funciona com valores de temperatura e humidade relativa superiores à média e o subsistema Sul funciona com valores inferiores.

O subsistema Norte durante o período diurno funciona com valores médios de temperatura em aproximadamente 0,5°C superiores ao período noturno, no entanto a humidade relativa não varia entre o período diurno e noturno. O subsistema Sul comporta-se de forma muito semelhante.

Quadro 4.9 – Média da temperatura e humidade relativa de cada subsistema (Norte e Sul)

	Norte				**Sul**			
	Temperatura [°C]		Humidade relativa [%]		Temperatura [°C]		Humidade relativa [%]	
	Dia	Noite	Dia	Noite	Dia	Noite	Dia	Noite
À entrada do sistema	14,91	14,86	86,95	84,50	15,94	15,82	73,95	73,66
Com o sistema em funcionamento	15,79	15,35	90,27	89,42	14,49	14,95	72,81	72,15

4.11 INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NO DESEMPENHO DOS SISTEMAS

Tendo em consideração os resultados obtidos na comparação dos dados resultantes da monitorização com os obtidos numa estação meteorológica surgiu a ideia de tentar extrapolar os resultados obtidos anteriormente para outros locais distintos do país dos quais ainda não se encontra nenhum sistema monitorizado. Para tal recorreu-se novamente à base de dados do SNIRH [23]. Devido à disponibilidade de dados existentes para o objetivo pretendido (humidade relativa e temperatura), selecionaram-se duas localidades, São Julião do Tojal (a 15 km de Lisboa) e São Brás de Alportel (a 15 km de Faro).

A Figura 4.14 apresenta a variação de humidade relativa e temperatura para o período em estudo (01/07/2010 a 30/06/2014). No entanto, para a estação localizada em São Julião do Tojal apenas foi possível obter dados até Maio de 2013.

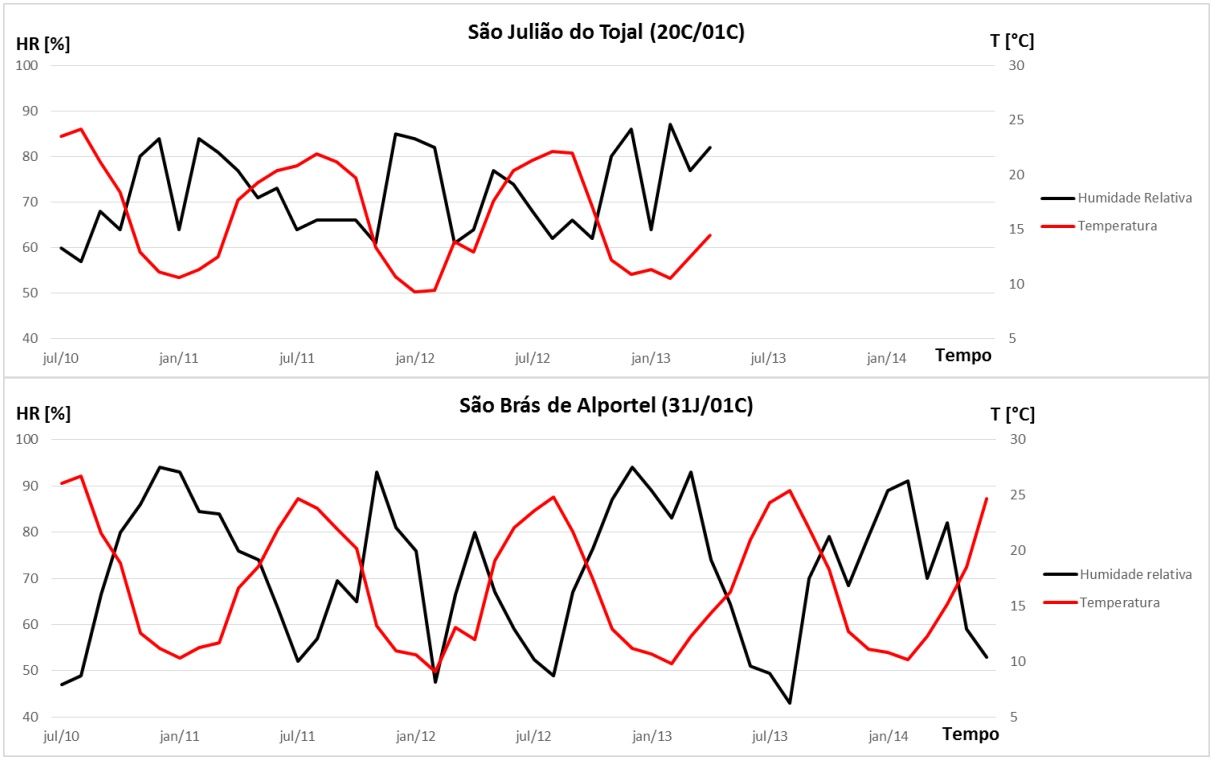


Fig. 4.14 – Variação da humidade relativa e temperatura no período selecionado em São Julião do Tojal (a 15 km de Lisboa) e em São Brás de Alportel (a 15 km de Faro)

Comparando os dados obtidos anteriormente (Figura 4.3 e Figura 4.5) com os dados apresentados na Figura 4.14 e no Quadro 4.10 e possível concluir que para as mesmas condições do edifício em estudo, o sistema funcionaria de forma mais eficaz nas novas localidades selecionadas tendo em consideração que a eficácia do sistema aumenta para valores de humidade relativa baixos e temperatura altos e as localidades selecionadas apesentam valores médios superiores aos valores obtidos na localidade analisada.

Um sistema similar instalado na região Sul de Portugal terá certamente uma maior eficiência que um sistema instalado na região Norte ou para a mesma eficácia não necessita de gastar tanta energia. O comprimento do sistema poderá ser maior, evitando até uma subdivisão em vários subsistemas.

Quadro 4.10 – Humidade relativa média e temperatura média em cada ano analisado

	São Julião do Tojal		**São Brás de Alportel**	
	HR [%]	T [°C]	HR [%]	T [°C]
2010/2011	71	18,05	78	17,60
2011/2012	67	15,75	66,75	16,15
2012/2013	74	13,50	75,25	15,35
2013/2014	-	-	70	16,75
Média	71	17,1	72	16,45

4.12. INTERPRETAÇÃO GLOBAL DOS RESULTADOS OBTIDOS

O Quadro 4.11 e o Quadro 4.12 pretendem sintetizar os parâmetros analisados de cada subsistema de ventilação monitorizado.

Quadro 4.11 – Síntese dos parâmetros analisados do subsistema Norte

		Norte				
		2010/2011	**2011/2012**	**2012/2013**	**2013/2014**	**Média**
Entrada	**HRmáx**	99,70	100,00	100,00	100,00	100,00
	HRméd	89,48	90,00	88,85	91,45	89,74
	HRmin	48,70	45,70	29,40	50,90	47,20
	Tmáx	24,00	19,90	20,40	22,10	21,25
	Tméd	15,05	14,35	13,65	14,25	14,30
	Tmin	9,50	8,90	6,20	6,80	7,85
	PVmáx	2273,73	2174,13	2371,79	2300,59	2287,16
	PVméd	1522,81	1399,20	1312,26	1490,45	1444,83
	PVmin	650,06	650,06	610,00	636,57	643,31
Saída	**HRmáx**	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	HRméd	92,45	89,90	95,20	98,56	93,83
	HRmin	24,70	31,30	30,30	25,20	27,75
	Tmáx	28,20	27,10	27,00	27,50	27,30
	Tméd	14,65	13,43	13,23	14,53	13,98
	Tmin	0,20	0,50	2,10	0,80	0,65
	PVmáx	2978,02	2559,44	2509,84	3106,91	2768,73
	PVméd	1535,84	1385,04	1339,44	1537,16	1460,44
	PVmin	351,29	333,01	506,78	521,08	429,04

Total	**DP**	148,59	90,74	84,56	108,43	99,58
	Wacum	355,10	353,50	366,66	270,49	354,30
	W/dia	0,97	0,97	1,00	0,74	0,97
	ON/OFF	4318,00	3920,00	4584,00	4633,00	4451,00
	% Tempo ligado	49,26	44,72	52,29	52,85	50,78

Quadro 4.12 – Síntese dos parâmetros analisados do subsistema Sul

Sul						
		2010/2011	**2011/2012**	**2012/2013**	**2013/2014**	**Média**
Entrada	**HRmáx**	94,00	97,90	95,10	97,00	96,05
	HRméd	75,20	73,60	77,41	77,58	76,31
	HRmin	35,40	39,80	42,90	41,90	40,85
	Tmáx	24,10	21,80	21,20	22,10	21,95
	Tméd	16,45	15,20	14,53	15,70	15,45
	Tmin	8,30	7,80	9,30	8,00	8,15
	PVmáx	2106,64	2169,27	2163,52	2139,84	2151,68
	PVméd	1423,24	1277,73	1262,37	1407,78	1342,76
	PVmin	459,26	442,32	679,98	567,80	513,53
Saída	**HRmáx**	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	HRméd	85,55	81,05	87,55	87,09	86,32
	HRmin	48,90	51,60	57,50	58,60	54,55
	Tmáx	21,50	20,90	19,90	19,60	20,40
	Tméd	15,40	14,30	14,05	15,15	14,73
	Tmin	9,80	8,80	10,20	10,90	10,00
	PVmáx	2166,23	2148,84	2161,08	2160,58	2160,83
	PVméd	1475,08	1401,01	1342,35	1400,55	1400,78
	PVmin	704,70	684,05	813,88	837,31	759,29
Total	**DP**	170,88	174,85	159,62	194,49	172,86
	Wacum	443,67	425,27	476,54	445,20	444,44
	W/dia	1,21	1,16	1,30	1,22	1,22
	ON/OFF	6580,00	6206,00	6969,00	6257,00	6418,50
	% Tempo ligado	75,06	70,80	79,50	71,38	73,22

Relacionando os valores médios de cada parâmetro com os valores de cada ano analisado reforça-se o que já se tinha referido anteriormente. Será suficiente conhecer/monitorizar um ano para se obter informação geral do funcionamento e comportamento do sistema, desde que não se trate de um ano atípico (facilmente detetável com o acesso aos dados existentes no SNIRH [23]).

Desta forma, após a instalação de um novo sistema, terá algum interesse monitorizar o primeiro ano e reutilizar o equipamento de monitorização em outras instalações, servindo para "afinar" a solução.

4.13 SÍNTESE DO CAPÍTULO

O estudo realizado tinha como principal objetivo analisar detalhadamente o funcionamento do sistema de ventilação da base das paredes instalado na Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades através do acesso a quatro anos ininterruptos de registos resultantes da monitorização que tem vindo a ser realizada.

Através da análise realizada foi possível concluir que:

- Existe uma relação quase direta entre a temperatura registada à entrada do subsistema Norte e a quantidade de água retirada por este. Quanto mais elevada for a temperatura à entrada maior a quantidade de água retirada. Em contrapartida o subsistema Sul funciona de forma oposta, retirando uma maior quantidade de água nos períodos em que a temperatura se encontra nos valores mais reduzidos;

- Os valores de temperatura obtidos na estação meteorológica são em média 1°C superiores aos valores registados à entrada do subsistema Norte, demonstrando que a temperatura poderá estar dependente da orientação da entrada de ar exterior do sistema;

- Ambos os sistemas apresentam valores mais elevados de humidade relativa no período de Inverno. No entanto o subsistema Sul funciona eficazmente. Tal acontece porque para o mesmo período a temperatura admitida é próxima da temperatura da superfície interior da conduta, reduzindo o risco de condensações e por sua vez, reduzindo o período de paragem do sistema;

- O subsistema de ventilação Norte apresenta uma humidade relativa média à entrada (com o sistema em funcionamento) na ordem dos 88% e o subsistema Sul na ordem dos 73,4%. Esta diferença de aproximadamente 14,6% permite justificar a discrepância entre a quantidade de água retirada pelos dois subsistemas.

- O critério que limita a humidade relativa à entrada em 35% nunca entrou em funcionamento, deixando em aberto a possibilidade de alterar/restringir mais o seu valor;

- Os valores de precipitação obtidos na estação meteorológica mais próxima do edifício em estudo não afetam diretamente a quantidade de água retirada pelos subsistemas;

- O subsistema de ventilação Sul retira maior quantidade de água e de forma mais contínua do que o subsistema Norte e 60% da água retirada pelos subsistemas ocorre durante o período de Julho a Dezembro. Valores de humidade relativa baixos e temperatura altos durante esse período são os principais fatores condicionantes;

- Apesar de o subsistema Norte apresentar um comprimento significativamente maior do que o subsistema Sul, este retira menor quantidade de água. O comprimento influencia a quantidade de água retirada por um sistema (reduzindo a eficácia à medida que o comprimento aumenta), no entanto quando comparado com a influência da combinação dos valores de temperatura e humidade relativa à entrada o comprimento perde relevância;

- O subsistema de ventilação Norte apresenta diferenças de pressão superiores no verão e esteve em funcionamento 50% do tempo, enquanto que o subsistema de ventilação Sul apresenta diferenças de pressão superiores no inverno e esteve em funcionamento 75% do tempo;

- O subsistema de ventilação Sul é 12% mais económico que o subsistema Norte, necessitando de cerca de apenas de 4€ para retirar 1 kg de água do interior da conduta;

- A alteração do critério da pressão do vapor permite reduzir os custos energéticos sem comprometer de forma excessiva a eficácia do sistema de ventilação. Uma redução de 2% na eficácia do sistema pode reduzir aproximadamente 12% os custos energéticos inerentes ao funcionamento. Em função dos objetivos principais da instalação do sistema, este critério pode ser reajustado;

- A utilização do espaço interior da Igreja altera a humidade relativa, aumentando quando a humidade relativa apresenta valores mais baixos e reduzindo quando apresenta valores mais elevados (devido à abertura de portas), no entanto não compromete de forma significativa a eficácia do sistema;

- Os subsistemas de ventilação Norte e Sul retiram uma maior quantidade de água durante o dia, 73% e 63% respetivamente. O subsistema Norte funciona com valores de temperatura e humidade relativa superiores à média e o subsistema Sul funciona com valores inferiores;

- Um sistema similar instalado na região Sul de Portugal terá uma maior eficiência do que um sistema instalado na região Norte. À medida que se avança em direção a Sul os valores médios de temperatura sobem e a percentagem de humidade relativa desce, contribuindo assim para uma secagem mais eficaz;

- Será suficiente monitorizar um determinado sistema durante apenas um ano para se obter informação relativa ao comportamento do sistema, desde que não se trate de um ano atípico.

5
CONCLUSÕES

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ventilação da base das paredes para o tratamento e o controlo da humidade ascensional em paredes de edifícios Históricos é uma ideia que esta tem vindo a ser bastante estudada, com o sistema higroregulável patenteado.

Ao longo dos últimos anos, os estudos realizados no âmbito do sistema de ventilação da base das paredes HUMUVENT permitiram otimizar e comprovar a eficácia do mesmo. Desde então surgiram ideias no sentido de adaptar o sistema a outras situações que impliquem o controlo da humidade relativa. A ventilação de paredes na sequência de cheias/inundações e a ventilação de desvãos sanitários foram duas situações analisadas.

Dos vários edifícios onde o sistema já se encontra implementado, no presente estudo optou-se por estudar o sistema implementado na Igreja do Mosteiro de Vilar de Frades assim como os respetivos critérios de funcionamento e a sua evolução.

Com o término deste trabalho, os objetivos inicialmente propostos foram alcançados tendo-se obtido as seguintes conclusões:

- O subsistema de ventilação Norte funciona de forma mais eficaz para valores de temperatura (14,92°C) e humidade relativa (88%) elevados, isto é, superior aos valores médios que por sua vez corresponde ao período de verão. Esteve em funcionamento 50% do tempo e retirou uma maior quantidade de água durante o dia (73%). O sistema apresenta ainda um custo energético de 5€ por cada kg de água retirada;

- Em contra partida o subsistema de ventilação Sul funciona mais eficazmente nos períodos em que a temperatura (14,89°C) e humidade relativa (73,4%) se encontram nos valores mais baixos, isto é, inferior aos valores médios que por sua vez corresponde ao período e inverno. Tal acontece porque a temperatura no interior da conduta nos meses de verão é bastante inferior à temperatura do ar admitido, que aliado a valores elevados de humidade relativa, aumenta a possibilidade da ocorrência de condensações no interior. Esteve em funcionamento 75% do tempo e retirou uma maior quantidade de água durante o dia (63%). O subsistema de ventilação Sul é 12% mais económico do que o subsistema de ventilação Norte, necessitado de 4€ para retirar um kg de água;

- A análise realizada ao citério e pressão de vapor permitiu concluir que a quantidade de água retirada não é proporcional á diferença de pressão de vapor. Para variações de pressão de vapor muito reduzidas os sistemas encontram-se a funcionar, retirando uma quantidade muito reduzida de água. Em função dos objetivos principais da instalação do sistema, este critério pode ser reajustado;

- O critério que limita a humidade relativa à entrada (em 35%) nunca entrou em funcionamento, deixando em aberto a possibilidade de alterar/restringir mais o seu valor (havendo uma clara necessidade de, para tal, aprofundar o estudo relativo ao tipo de sais, concentração, etc.);

- Os valores de temperatura registados numa estação meteorológica próxima do local onde se encontra a Igreja são ligeiramente diferentes dos valores registados à entrada do subsistema Norte onde o ar é admitido do exterior (em média varia 1°C). Isto deve-se ao facto da estação meteorológica não se encontrar voltada para uma direção específica e a entrada de ar do sistema estar voltada para Norte. Também foi possível concluir que a precipitação não afeta diretamente a quantidade de água retirada pelos subsistemas;

- A localização influencia a eficácia dos sistemas, um sistema instalado na região Sul de Portugal terá uma maior eficiência do que um sistema instalado na região Norte;

- Apesar do comprimento do sistema afetar a eficácia do mesmo (reduzindo a eficácia à medida que o comprimento aumenta), não é um fator relevante quando comparado com a influência da combinação dos valores de temperatura e humidade relativa;

- A utilização da Igreja faz variar a humidade relativa interior (à entrada do subsistema Sul), no entanto não afeta de forma significativa a eficácia do sistema. A humidade interior aumenta quando se encontra em valores mais baixos (produção de vapor de água) e reduz quando se encontra em valores mais elevados (devido à abertura de portas);

- Tendo em conta o comportamento similar dos sistemas ao longo dos anos, será suficiente monitorizar um determinado sistema durante apenas um ano compacto para se obter informação sobre o comportamento e funcionamento do sistema (desde que não se trate de um ano atípico).

No Quadro 5.1 encontra-se uma síntese das principais conclusões alcançadas relativas ao funcionamento dos sistemas estudados.

Quadro 5.1 – Síntese dos principais aspetos adjacentes ao funcionamento dos subsistemas de ventilação

	Subsistema de ventilação Norte	**Subsistema de ventilação Sul**
Tempo de funcionamento	50%	75%
Tempo de funcionamento durante o dia	73%	63%
Custo energético associado	5€/kg	4€/kg
Humidade relativa média à entrada (em funcionamento)	88%	73,4%
Temperatura média à entrada (em funcionamento)	14,92°C	14,89°C
Número de arranques médio por ano	367	211

5.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Ao longo do desenvolvimento da presente Dissertação de Mestrado verificou-se que existem temas que poderiam ser trabalhados e desenvolvidos. Apresentam-se de seguida algumas propostas dos temas para desenvolvimentos futuros:

- Monitorizar edifícios em locais distintos do país a fim de estudar a real influência da localização no desempenho dos sistemas;
- Estudar de forma aprofundada o comportamento dos sais e a sua variação em locais distintos do país;
- Estudar outras possibilidades de aplicação do sistema de ventilação em situações que impliquem o controlo da humidade relativa;
- Refazer o estudo, mas num caso em que a conduta de ventilação se encontre impermeabilizada nas faces que se encontram em contacto com o terreno;
- Desenvolver um sistema capaz de efetuar a monitorização dos sistemas à distância e em tempo real;
- Variar a velocidades de circulação do ar no interior da conduta e analisar os efeitos na eficácia e comportamento do sistema, incluindo uma análise económica;
- Efetuar a combinação de soluções de tratamento da humidade ascensional, como por exemplo drenos atmosféricos e sistema de ventilação da base das paredes (aumentar a área de evaporação da parede no interior da conduta).

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] Neiva, F. V. *Manual de Pré-Dimensionamento de Sistemas HUMIVENT para o Tratamento/Controlo da Humidade Ascensional em Paredes*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2015.

[5] Freitas, V. P., Torres, M. I. M. Guimarães, A. S., *Humidade Ascensional*. FEUP edições, Porto, 2008.

[6] Freitas, V. P., Torres, M. I. M. Ascensão, A., Gonçalves, P., *Tratamento da humidade ascensional na Igreja de Vilar de Frades*. Revista Património – estudos, Nº3 – 2002, pg. 54-62, IPPAR – Departamento de Estudos.

[7] Freitas, V. P., Guimarães, A. S., Delgado, J. M. P. Q., *The HUMIVENT Device for Rising Damp Treatment*. Recent Patents on Engineering, Vol. 5 (3), 2011.

[8] Freitas, V. P., Guimarães, A. S. et al. *Manual de Apoio ao Projeto de Reabilitação de Edifícios Antigos*. Edições OERN – Ordem dos Engenheiros da Região Norte, ISBN:978-972-99918-7-5, 03/2012.

[9] Martins, M. R. *Ventilação da Base Das Paredes Para Secagem de Edifícios Na Sequencia de Inundações/Cheias*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2015.

[10] 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.

[11] Freitas, R. J. G. *Técnicas de Tratamento/Controlo da Humidade Ascensional – Catálogo*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2014.

[12] Vinhas, J. A. *A Igreja e o Convento de Vilar de Frades*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Letras da Universidade do Porto – FLUP, 1998.

[13] http://www.google.com/patents/US20050204653. [Accessed: 24-Fev-2016]

[14] http://www.google.com/patents/US7143558. [Accessed: 24-Fev-2016]

[15] http://www.google.com/patents/DE3902065A1?cl=de. [Accessed: 24-Fev-2016]

[16] 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.

[17] https://pt.wikipedia.org/wiki/Igreja_de_Vilar_de_Frades#cite_note-Vinhas-2. [Accessed: 26-Fev-2016]

[18] http://www.culturanorte.pt/pt/patrimonio/convento-de-sao-salvador-de-vilar-de-frades/. [Accessed: 26-Fev-2016]

[19] http://www.monumentos.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=1053. [Accessed: 26-Fev-2016]

[20] http://www.patrimoniocultural.pt/pt/patrimonio/patrimonio-imovel/pesquisa-do-patrimonio/classificado-ou-em-vias-de-classificacao/geral/view/70698/. [Accessed: 08-Mar-2016]

[21] http://pedroluissilva.wordpress.com/2015/01/28/visita-guiada-ao-convento-de-vilar-de-frades/. [Accessed: 27-Abr-2016]

[22] http://www.solerpalau.pt/product.jsp?PRODUCTID=169&CATEGORYID=45. [Accessed: 05-Mai-2016]

[23] http://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=1&idItem=1.1. [Accessed: 09-Mai-2016]

[24] 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.

[25] Torres, M. I. M. *Humidade Ascensional em Paredes*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra – FCTUC, 1998.

[26] Kunzel, H. M., Holm, A., Eitner, V., Schmidt, T. WUFI – 2D Program description.

[27] Oudin, L. *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'unmodèle pluie-débit global*. PhD Thesis Sciences de l'eau, ENGREF, 2004.

[28] Monteith, J. L., *Evaporation and environment.* 19th Symposia of the Society for Experimental Biology, University Press, 1965, pg. 205-234, Cambridge.

[29] Torres, M. I. M., López, O. *Ventilation system for drying out buildings after a flood*, 1st International Symposium on Building Pathology, ISBP 2015.

[30] 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.

[31] Torres, M. I. M., Freitas, V. P. *Humidades Ascensionais*. FEUP edições, Porto, 1998.

[32] Torres, M. I. M., Freitas, V. P. *Treatment of rising damp in historical buildings: Wall base ventilation.* Building and Environment, Volume 42, 2007, pg. 424-435.

[33] Torres, M. I. M., Freitas, V. P. *Modelling of Rising Damp in Historical Buildings.* Historical Constructions, 7/11/2011 a 9/11/2011, Guimarães, pg. 381-390.

[34] Henriques, F. *Ação da Humidade em Paredes – Formas de Manifestação, Critérios de Quantificação e Análise de Soluções de Reparação.* Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 1993.

[35] Freitas, V. P. *Relatório HT – 181/02: Parecer Sobre o Comportamento Face à Humidade da Igreja de Vilar de Frades, Areias de Vilar – IPPAR*, Porto, 2002.

[36] Gaspar, A. M. R. *Tratamento da Humidade Ascensional em Igrejas*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2011.

[37] Morais, M. J. A. *Simulação Numérica da Humidade Ascensional Em Edifícios Históricos*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, 2011.

[38] Henriques, F. *Ação da Humidade em Paredes – Formas de Manifestação, Critérios de Quantificação e Análise de Soluções de Reparação.* Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, 1993.

[39] Torres, M. I. M., Freitas V. P. Avaliação da eficiência da ventilação da base das paredes em função da sua espessura no tratamento das humidades ascensionais, PATORREB, 2006, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.