

Estudo Experimental do Comportamento Higrotérmico de Igrejas

TÂNIA ALEXANDRA LOPES DA SILVA

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

Orientador: Professor Doutor Vítor Carlos Trindade Abrantes Almeida

ABRIL DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

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 - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008.*

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

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

À minha mãe e aos meus irmãos

AGRADECIMENTOS

Ao concluir o presente trabalho gostaria de agradecer a todos aqueles que, de algum modo, contribuíram para a sua realização.

Ao Professor Vítor Abrantes expresso aqui a minha admiração e o meu obrigado pela orientação e confiança depositada ao longo deste trabalho.

À Eng.^a Ana Guimarães agradeço a forma sempre simpática com que me apoiou e orientou na elaboração desta dissertação, bem como pelos conhecimentos transmitidos e pelo incentivo que sempre me deu.

Ao Laboratório de Física das Construções – LFC, pelo empréstimo dos aparelhos de medição, que permitiram a realização deste estudo.

Ao Padre Agostinho Pedroso, por tão gentilmente ter permitido a realização das medições na Igreja de Santo Ildefonso.

Aos amigos Carlos Dias e Quitéria Monteiro, por toda a amizade e companheirismo.

Finalmente, um agradecimento muito especial, à minha mãe, ao meu irmão e à minha irmã, por tudo o que fizeram por mim para me poder proporcionar todo este percurso académico. Por todo o carinho, apoio e incentivo, especialmente nos momentos mais difíceis deste percurso.

RESUMO

As construções mais antigas, e em particular as igrejas, constituem importantes edificações de valor histórico e patrimonial, apresentando-se por vezes bastante degradadas e a necessitar de intervenções de reabilitação. Por este motivo é necessário conhecer a resposta térmica dos materiais que constituem a envolvente deste tipo de edifícios face às variações climáticas internas e externas.

Na grande maioria das situações, a humidade é o principal agente responsável pelo aparecimento de patologias e da degradação dos elementos construtivos, sendo as manifestações mais comuns as condensações e as manchas de humidade na envolvente.

Com este estudo pretende-se caracterizar a qualidade do ambiente no interior de uma igreja, através de uma análise aos principais parâmetros de natureza higrotérmica, tais como, a temperatura e a humidade relativa, internas e externas ao edifício. Assim sendo, encontram-se no presente trabalho os resultados das medições efectuadas na Igreja de Santo Ildefonso, no Porto, durante cerca de 4 meses.

Os valores obtidos permitiram realizar uma série de gráficos que revelam o desempenho higrotérmico do edifício, fazendo-se ainda referência à influência da inércia térmica das paredes, à produção de vapor de água no interior da igreja e às condições de ventilação do espaço.

PALAVRAS-CHAVE: humidade, temperatura, patologias, condensações, comportamento higrotérmico.

ABSTRACT

The past constructions, and churches in particular, represent important historic buildings. However, many of them are quite degraded and it's necessary repair interventions. That's the reason why is essential to know the thermal answer from constructive elements of this type of buildings due to the internal and external climate variations.

In most of situations, damp is the main factor responsible for building's pathologies and degradation, which usually causes condensations and damp spots on the envelope.

This study characterize the quality of environment inside of a church, through an analysis to the main hygrothermal parameters, such as, temperature and relative damp, internal and external to the building. Therefore, we show in the present work, the results of the measurements carried out in "Igreja de Santo Ildefonso", in Porto, during nearly 4 months.

The results obtained allowed us to make a set of graphs that reveals the hygrothermal performance of the building. It was also give special attention to the influence of thermal inertia from the walls, to vapor production inside the church and to ventilation conditions of the room.

KEYWORDS: damp, temperature, pathologies, condensations, hygrothermal performance.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. INTERESSE E OBJECTIVOS DO TRABALHO	1
1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO	2
2. ESTUDO DO ESTADO DA ARTE	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO.....	3
2.2.1. ASPECTOS GERAIS	3
2.2.2. FACTORES CONDICIONANTES DAS VARIAÇÕES TERMO-HIGROMÉTRICAS	3
2.3. O PROBLEMA DAS PATOLOGIAS	4
2.3.1. DEFINIÇÃO.....	4
2.3.2. A HUMIDADE NA ORIGEM DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS	4
2.3.3. COMPLEXIDADE DOS FENÓMENOS	4
2.3.4. A DIFICULDADE DE REPARAÇÃO DAS CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS.....	5
2.4. A HUMIDADE NAS CONSTRUÇÕES ANTIGAS (IGREJAS)	5
2.4.1. PRINCIPAIS ASPECTOS QUE ESTÃO NA SUA ORIGEM.....	5
2.4.2. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA.....	6
2.5. O FENÓMENO FÍSICO ASSOCIADO	7
2.5.1. INFLUÊNCIA DA INÉRCIA TÉRMICA.....	7
2.5.2. VENTILAÇÃO DOS ESPAÇOS.....	8
2.5.3. INTERFACE ENTRE CAMADAS	8
2.5.4. O PROBLEMA DA SECAGEM.....	8
2.6. PARÂMETROS DE NATUREZA HIGROTÉRMICA.....	9
2.6.1. TEMPERATURA	9
2.6.2. HUMIDADE DO AR	9
2.6.3. PRESSÃO PARCIAL DA VAPOR	10

2.7. PRINCIPAIS FORMAS DE HUMIDADE QUE AFECTAM OS EDIFÍCIOS ANTIGOS	12
2.7.1. HUMIDADE DE CONDENSAÇÃO	12
2.7.1.1. NOÇÕES GERAIS.....	12
2.7.1.2. CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS	12
2.7.1.3. CONDENSAÇÕES INTERNAS	13
2.7.2. HUMIDADE DO TERRENO.....	13
2.7.2.1. NOÇÕES GERAIS.....	13
2.7.2.2. ALTURA DE PROGRESSÃO DA ÁGUA	13
2.7.2.3. PRESENÇA DE SAIS.....	14
2.7.2.4. PRINCIPAIS SINTOMAS.....	14
2.7.3. HUMIDADE HIGROSCÓPICA	15
2.7.4. HUMIDADE DE PRECIPITAÇÃO	15
2.8. FORMAS DE TRATAMENTO DA HUMIDADE	16
2.8.1. TRATAMENTO DA HUMIDADE DE CONDENSAÇÃO	16
2.8.2. TRATAMENTO DA HUMIDADE DO TERRENO.....	16
2.8.3. TRATAMENTO DA HUMIDADE HIGROSCÓPICA	17
2.8.4. TRATAMENTO DA HUMIDADE DE PRECIPITAÇÃO	17
2.8.5. OCULTAÇÃO DAS ANOMALIAS	17
2.9. CONCLUSÕES	18
3. ESTUDO EXPERIMENTAL	21
3.1. INTRODUÇÃO	21
3.2. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO	21
3.3. DESCRIÇÃO DAS ANOMALIAS	23
3.4. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS	25
3.4.1. APARELHOS DE MEDIÇÃO	25
3.4.2. PARÂMETROS A MEDIR E LOCALIZAÇÃO DOS APARELHOS.....	25
3.4.3. PERÍODO DE MEDIÇÕES.....	26
3.5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	27
3.5.1. EXTERIOR.....	27
3.5.1.1. GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS	27
3.5.1.2. GRÁFICO DE TEMPERATURAS MÉDIAS DIÁRIAS.....	27
3.5.1.3. GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE HUMIDADES RELATIVAS.....	28

3.5.1.4.GRÁFICO DE HUMIDADES RELATIVAS MÉDIAS DIÁRIAS.....	28
3.5.2. INTERIOR.....	29
3.5.2.1.GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS	29
3.5.2.2.GRÁFICO DE TEMPERATURAS MÉDIAS DIÁRIAS	29
3.5.2.3.GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DE HUMIDADES RELATIVAS	30
3.5.2.4.GRÁFICO DE HUMIDADES RELATIVAS MÉDIAS DIÁRIAS.....	30
3.6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	31
3.6.1. PERÍODO DE MEDIÇÕES	31
3.6.1.1.GRÁFICO DE TEMPERATURAS MÉDIAS DIÁRIAS	31
3.6.1.2.GRÁFICO DE HUMIDADES RELATIVAS MÉDIAS DIÁRIAS.....	31
3.6.1.3.GRÁFICO DE PRESSÕES PARCIAIS DE VAPOR DE ÁGUA	32
3.6.1.4.GRÁFICO DE VARIAÇÃO DA PRESSÃO PARCIAL DE VAPOR DE ÁGUA	33
3.6.1.5.GRÁFICO DE AMPLITUDES TÉRMICAS DIÁRIAS	33
3.6.1.6.GRÁFICO DE ATRASO TÉRMICO DIÁRIO.....	34
3.6.2. COMPORTAMENTO DIÁRIO.....	35
3.6.2.1.GENERALIDADES	35
3.6.2.2.GRÁFICOS DIÁRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS	35
3.6.2.3.GRÁFICOS DIÁRIOS DE HUMIDADES RELATIVAS.....	37
3.6.2.4.GRÁFICOS DIÁRIOS DE PRESSÕES PARCIAIS DE VAPOR DE ÁGUA	38
3.7. CONCLUSÕES	40
4. CONCLUSÕES	43
4.1. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS DA INVESTIGAÇÃO NESTE DOMÍNIO	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	47

ÍNDICE DE FIGURAS

2. ESTUDO DO ESTADO DA ARTE	3
Figura 2.1 – Exemplo de um diagrama psicrométrico [5]	10
Figura 2.2 – Altura atingida pela água nas paredes, em função das condições de evaporação [5]	14
3. ESTUDO EXPERIMENTAL	21
Figura 3.1 – Igreja de Santo Ildefonso	22
Figura 3.2 – Interior da Igreja de Santo Ildefonso.....	22
Figura 3.3 – Manchas escuras de humidade nas paredes	23
Figura 3.4 – Manchas escuras de humidade nas paredes	23
Figura 3.5 – Condensações na cobertura.....	24
Figura 3.6 – Condensações na cobertura.....	24
Figura 3.7 – Quadro escurecido pela humidade	25
Figura 3.8 – Aparelho de medição	25
Figura 3.9 – Púlpito da igreja onde foi colocado o primeiro aparelho de medição	26
Figura 3.10 – Torre sineira onde foi colocado o segundo aparelho de medição	26
Figura 3.11 – Distribuição da temperatura exterior entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008	27
Figura 3.12 – Temperaturas médias diárias exteriores entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008	27
Figura 3.13 – Distribuição da humidade relativa exterior entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008	28
Figura 3.14 – Humidades relativas médias diárias exteriores entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008	28
Figura 3.15 – Distribuição da temperatura interior entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008	29
Figura 3.16 – Temperaturas médias diárias interiores entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008	29
Figura 3.17 – Distribuição das humidades relativas interiores entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008	30
Figura 3.18 – Humidades relativas médias diárias interiores entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008	30
Figura 3.19 – Temperaturas médias diárias entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008	31

Figura 3.20 – Humidades relativas médias diárias entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008	32
Figura 3.21 – Pressões parciais de vapor de água entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008	32
Figura 3.22 – Variação da pressão parcial de vapor de água entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008.....	33
Figura 3.23 – Amplitudes térmicas diárias entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008	34
Figura 3.24 – Atraso térmico diário entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008.....	34
Figura 3.25 – Distribuição das temperaturas do dia 10/11/2007.....	35
Figura 3.26 – Distribuição das temperaturas do dia 26/11/2007.....	36
Figura 3.27 – Distribuição das temperaturas do dia 08/12/2007.....	36
Figura 3.28 – Distribuição das temperaturas do dia 01/01/2008.....	36
Figura 3.29 – Distribuição das humidades relativas do dia 08/11/2007.....	37
Figura 3.30 – Distribuição das humidades relativas do dia 10/11/2007.....	37
Figura 3.31 – Distribuição das humidades relativas do dia 21/12/2007.....	38
Figura 3.32 – Distribuição das humidades relativas do dia 15/01/2008.....	38
Figura 3.33 – Pressões parciais de vapor de água do dia 10/11/2007	39
Figura 3.34 – Pressões parciais de vapor de água do dia 11/11/2007	39
Figura 3.35 – Pressões parciais de vapor de água do dia 20/12/2008.....	40
Figura 3.36 – Pressões parciais de vapor de água do dia 22/01/2008.....	40

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

HR – humidade relativa do ar [%]

W – humidade absoluta do ar [Kg / m³]

Ws – limite de saturação do ar [Kg / m³]

Ps – limite de saturação do ar [Kg / m³]

t, T – temperatura do ar [°C ; K]

P – pressão parcial de vapor de água [Pa]

dP – variação da pressão parcial de vapor de água [Pa]

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As construções mais antigas, apesar de constituírem importantes edificações de valor histórico e patrimonial, apresentam-se por vezes bastante degradadas e a necessitar de intervenções de reabilitação, o que se demonstra complexo neste tipo de edifícios onde se procura preservar a identidade..

As igrejas são bons exemplos de construções históricas que devido à sua elevada importância acabam por revelar muitas dificuldades no que se refere às medidas de intervenção a tomar para o seu tratamento.

Na grande maioria das situações, o principal agente responsável pelo aparecimento de patologias e da degradação dos elementos construtivos é a humidade, que afecta não só a durabilidade e o aspecto das construções, mas também a saúde e segurança dos utentes [1].

Deste modo, o estudo do comportamento higrotérmico de igrejas é fundamental para caracterizar a qualidade do ambiente no seu interior, permitindo através dessa análise, o conhecimento da resposta térmica da envolvente dos edifícios quando sujeita às variações climáticas interiores e exteriores, tais como variações de temperatura, de humidade relativa e ainda das pressões de vapor de água.

Por esta razão, entende-se que seria de grande interesse dispor de resultados quantitativos que permitissem a interpretação e a caracterização do desempenho higrotérmico dos elementos construtivos.

1.2. INTERESSE E OBJECTIVOS DO TRABALHO

O comportamento higrotérmico dos edifícios tem sido objecto de estudo nos últimos anos pelo grupo de Física das Construções da FEUP [2]. Assim sendo, pretende-se com este trabalho dar um pequeno contributo nesse sentido.

Conhecer o comportamento termo-higrométrico das igrejas é fundamental para se poder analisar a qualidade do ambiente no seu interior, o estado de degradação dos elementos que compõem a envolvente exterior, bem como, identificar medidas de intervenção a realizar para tentar eliminar ou minimizar as patologias encontradas neste tipo de edifícios.

A realização de medições permitirá obter uma gama de valores dos principais parâmetros de natureza higrotérmica, em diferentes condições de utilização da igreja (períodos de missa, de funcionamento ou de encerramento da igreja), que poderão também servir para comparação com outras igrejas.

Os principais objectivos deste trabalho podem resumir-se nos seguintes pontos:

- Análise experimental da variação da temperatura no interior da Igreja, face às variações externas e às características da envolvente;
- Análise experimental da variação da humidade relativa no interior da Igreja, face às variações externas e às características da envolvente;
- Análise experimental da variação da pressão parcial de vapor no interior da Igreja, face à produção de vapor de água no interior, às variações externas, às características da envolvente e às condições de ventilação.

1.3. ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DO TEXTO

O trabalho que aqui se apresenta encontra-se dividido em quatro partes:

- Na primeira parte (Capítulo 1) esclarece-se a motivação e o interesse subjacente à elaboração deste trabalho, e enumeram-se os principais aspectos a que se pretende dar resposta;
- Na segunda parte (Capítulo 2) apresenta-se um estudo bibliográfico do estado actual do conhecimento neste domínio, fazendo-se referência ao problema das patologias, à humidade como principal agente responsável pela degradação das construções antigas, à formação de condensações, à importância dos materiais que constituem a envolvente, nomeadamente a influência da inércia térmica, entre outros, aos principais elementos de natureza higrotérmica, às principais formas de humidade que afectam os edifícios antigos, bem como as suas formas de tratamento;
- Na terceira parte (Capítulo 3) é realizado um estudo experimental sobre o comportamento higrotérmico numa igreja, fazendo-se uma pequena descrição da mesma, dos aparelhos de medição utilizados e dos ensaios. Apresentam-se os resultados obtidos, bem como, uma análise dos respectivos valores;
- Na quarta e última parte (Capítulo 4) apresentam-se as principais conclusões resultantes da elaboração deste trabalho, e indicam-se ainda alguns aspectos a merecer desenvolvimentos futuros.

2

ESTUDO DO ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

Os estudos realizados ao longo do tempo sobre o comportamento higrotérmico nas construções históricas constituem um importante avanço no conhecimento, na medida em que permitiram a consciencialização dos problemas existentes neste tipo de edificações, do tipo de anomalias instaladas e das formas de tratamento possíveis, entre outras.

Assim sendo, é natural que os conhecimentos já adquiridos sirvam de base à realização de novos estudos neste domínio.

Neste capítulo é feita a descrição dos aspectos com maior relevância para a realização deste trabalho, partindo do conhecimento já adquirido em estudos experimentais anteriores.

2.2. COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO

2.2.1. ASPECTOS GERAIS

O comportamento higrotérmico dos locais é um parâmetro de grande importância nos estudos sobre os mecanismos de transferência calor e humidade através da envolvente dos edifícios.

A higrometria traduz o aumento da pressão de vapor de água no interior de um local em relação ao exterior e, conseqüentemente, define o gradiente de pressão de vapor de água a que se encontra submetida a sua envolvente [3]. O clima interior dos edifícios e as condições climáticas exteriores determinam esses gradientes de pressão, que por sua vez condicionam o fluxo de difusão de vapor através dos elementos que compõem a envolvente.

2.2.2. FACTORES CONDICIONANTES DAS VARIAÇÕES TERMO-HIGROMÉTRICAS

De um modo geral, é o clima que condiciona fortemente as trocas térmicas entre os edifícios e o ambiente que os rodeia, através sobretudo da temperatura do ar e da humidade, para além da chuva, do vento e da radiação solar. As características construtivas e as funções desempenhadas pelos edifícios são dois factores que também vão condicionar as variações termo-higrométricas no interior dos locais. Em relação às características construtivas e aos elementos de construção, a inércia térmica dos edifícios, que traduz a resistência oferecida por uma construção, um local ou um elemento à alteração do seu estado térmico [4], tem directa influência nas variações térmicas. A execução de caves nos edifícios ou de paredes enterradas é outro factor construtivo que vai condicionar bastante o desempenho higrotérmico do ambiente interior. Estas características construtivas enunciadas

anteriormente são típicas dos edifícios mais antigos, como por exemplo os edifícios históricos e me particular as igrejas que serão o objecto de estudo neste trabalho. As características funcionais dos edifícios intervêm na medida em que assumem óbvia influência nos consumos energéticos, dadas as diferentes exigências que as variadas actividades impõem, relativamente às condições ambientes interiores e à duração dos períodos em que tais condições devem ser asseguradas.

O comportamento termo-higrométrico no interior dos locais, como facilmente se compreenderá, apresenta importantes variações, não só entre diferentes edifícios, como também ao longo do tempo para um mesmo local.

2.3. O PROBLEMA DAS PATOLOGIAS

2.3.1. DEFINIÇÃO

Patologia representa qualquer alteração que um edifício sofreu ou os defeitos que adquiriu ao longo do tempo, que modifica o aspecto físico e as condições de habitabilidade das edificações.

2.3.2. A HUMIDADE NA ORIGEM DAS MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

Os edifícios mais antigos como as igrejas, em geral, padecem de várias patologias e uma das causas mais comuns deve-se à presença de água. A existência de humidade provoca diferentes tipos de estragos que dependem muito da forma como a água penetra e se movimenta no interior dos elementos construtivos dos edifícios. Este tipo de construções históricas apresenta, em regra, paredes muito espessas de alvenaria de pedra tradicional, o que se traduz numa elevada inércia térmica, causando muitas vezes problemas de condensações de vapor de água. Outra característica bastante comum deste tipo de edifícios é, como já foi referido anteriormente, a existência de paredes enterradas ou semi-enterradas, que, devido à sua localização e proximidade a zonas com muita água, propicia a ocorrência de fenómenos de humidade ascensional, causando também várias anomalias.

2.3.3. COMPLEXIDADE DOS FENÓMENOS

As diversas formas de manifestação da humidade nas construções constituem um problema de difícil explicação científica, dada a complexidade dos fenómenos que lhe estão associados [1].

Na generalidade dos casos, os vários tipos de anomalias devidas à humidade não ocorrem de forma isolada. Com efeito, é frequente que dois ou mais tipos de fenómenos apareçam associados, quer seja por existirem condições propícias para tal, quer seja porque uns podem ser consequência de outros.

Tomando como exemplo uma parede com problemas de humidade do terreno, é possível vir a verificar-se nessa mesma parede, a ocorrência de outro tipo de anomalias devidas a fenómenos de higroscopicidade como consequência da humidade ascensional, aumentando o teor em água da parede. Por sua vez, este acréscimo do teor em água provocará a diminuição da resistência térmica da parede, a qual, associada ao decréscimo da temperatura superficial exterior provocado pela evaporação da água, poderá propiciar a ocorrência de condensações superficiais. Refira-se ainda que, a parede em causa poderá também sofrer de infiltrações de água da chuva ou de alguma outra forma de humedecimento devida a causas fortuitas [5].

2.3.4. A DIFICULDADE DE REPARAÇÃO DAS CONSTRUÇÕES HISTÓRICAS

Todas estas consequências arrastam consigo, não só a degradação dos revestimentos e o aspecto desagradável que advém da conseqüente presença de limos e musgos nas paredes, como também provocam um ambiente demasiado húmido e bastante prejudicial à saúde.

Perante um comportamento deste tipo, a questão fundamental que se coloca é de como resolver estes problemas, em edifícios históricos (igrejas), sem alterar as características físicas das construções antigas, tendo em conta que não se pode simplesmente destruir um edifício destes para o voltar a construir, visto tratarem-se de construções com importante valor histórico e patrimonial para a sociedade e cultura portuguesas. Além disso, muitas vezes estas anomalias não se conseguem resolver, apenas se consegue atenuar os efeitos das mesmas, sendo que as reparações podem apresentar custos bastante elevados.

Com efeito, os problemas de humidade são das principais causas de degradação dos elementos, afectando aspectos tão importantes e tão diversos como a durabilidade, a estanquidade e o aspecto dos elementos construtivos, o conforto dos utentes e até a sua saúde e segurança, constituindo uma das mais importantes manifestações patológicas das edificações históricas em Portugal.

2.4. A HUMIDADE NAS CONSTRUÇÕES ANTIGAS

2.4.1. PRINCIPAIS ASPECTOS QUE ESTÃO NA SUA ORIGEM

A presença prolongada de humidade nos elementos construtivos constitui uma perturbação patológica bastante comum em edifícios antigos [6], como as igrejas, conforme foi dito anteriormente. Assim sendo, interessa referir alguns dos principais aspectos que podem estar na sua origem, tais como, aqueles que aqui são apresentados de seguida:

- A localização da igreja, em termos orográficos e hidrográficos, pode levar à afluência de águas, superficiais e subterrâneas, à plataforma em que se situa o edifício. A água, outrora funcionando como elemento essencial na eleição e plano construtivo do local para a implantação da igreja, na asserção utilitária e simbólica [7], é hoje o principal factor de aceleração do desgaste – apodrecimentos, humidificação, desagregação de superfícies, colonização biológica, etc;
- As condições climáticas locais têm óbvia influência nos problemas de humidade no caso de se caracterizarem por Invernos frios e húmidos, associados a uma baixa insolação da igreja;
- A elevada inércia térmica das construções, a ausência de isolamento térmico na envolvente e, muitas vezes, as baixas taxas de renovação do ar, criam um ambiente interior muito frio e com humidades relativas muito altas, excepto no Verão e em parte do Outono [7];
- Os materiais constituintes das fachadas, nomeadamente, as argamassas de cal e também o barro, aplicado nas juntas de alvenaria, têm grande capacidade de absorção de água o que leva a retenções elevadas de humidade nas paredes;
- A precipitação atmosférica pode causar infiltrações, através de telhas envelhecidas, remates na cobertura, juntas, orifícios, ligações mal vedadas, aberturas e peitoris, bem como a ausência de sistemas de recolha das águas pluviais afluentes aos logradouros envolventes;
- A ascensão capilar, devida essencialmente a níveis freáticos altos e à falta de barreiras impermeabilizantes que impeçam a passagem da água para o edifício, bem como o não funcionamento ou inexistência de sistemas de drenagem, são muito favoráveis à ocorrência de anomalias;

- As condições de temperatura e humidade e a sua estratificação, associada a fenómenos de convecção, podem favorecer a ocorrência de condensações nas paredes, pavimentos ou cobertura dos edifícios;
- A higroscopicidade dos revestimentos, que caracteriza a capacidade de determinado material para fixar água por adsorção e de a restituir ao ambiente em que se encontra, em função das variações de temperatura e da pressão parcial de vapor de água, constitui um parâmetro importante para a ocorrência de humidade nos edifícios;
- As condições de ocupação das igrejas estão directamente ligadas com a produção de vapor de água no interior, apresentando valores mais elevados para a produção de vapor nos períodos de missa, o que também se vai reflectir na humidade do ambiente e da envolvente.

2.4.2. MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA

A acção da água está na origem ou no agravamento de grande parte das anomalias, uma vez que vai procurando e encontrando os pontos mais fracos da alvenaria (fendas e vazios), através de caminhos de circulação preferenciais no interior dos elementos, geralmente as juntas de argamassa entre pedras ou tijolos, contribuindo para a redução da capacidade resistente ao longo do tempo e da capacidade de isolamento térmico, devido à maior condutibilidade térmica da água relativamente ao ar.

Os fenómenos de transferência de humidade através da envolvente dos edifícios podem ocorrer em fase vapor ou em fase líquida:

- na fase vapor, o transporte da humidade realiza-se pelos processos de difusão e convecção;
- na fase líquida, a água atravessa os poros da envolvente pelos processos de capilaridade e pelos efeitos da gravidade e dos gradientes de pressão externas.

Por sua vez, o transporte de humidade em fase vapor pode assumir uma das seguintes formas [8]:

- difusão de vapor através de uma camada de ar;
- difusão de vapor através de materiais porosos;
- convecção – o vapor de água desloca-se juntamente com o ar seco devido a gradientes de pressão e de temperatura.

Os mecanismos de transferência de humidade por difusão de vapor, através de elementos de construção, devem-se às diferenças de concentração de vapor de água entre as suas faces. Deste modo, o transporte de humidade nas paredes é função directa da diferença de pressões, da permeabilidade ao vapor de água dos elementos e das suas espessuras. Este processo efectua-se das seguintes formas:

- transferência de vapor entre o ar interior e a envolvente dos edifícios, através da superfície interior das paredes;
- transferência de vapor ao longo dos materiais constituintes da envolvente dos edifícios;
- transferência de vapor entre a envolvente dos edifícios e a atmosfera, através da superfície exterior das paredes.

Por sua vez, o teor de humidade existente nos materiais vai exercer uma grande influência sobre a condutibilidade térmica e sobre a permeabilidade ao vapor de água dos elementos de construção. Apesar deste último parâmetro ser uma característica bem definida para cada material, em alguns casos, o valor da permeabilidade ao vapor é bastante dependente do seu teor de humidade que, no domínio higroscópico, varia de acordo com as condições ambientes a que o material é submetido, em particular com a humidade relativa [3].

A temperatura também vai influenciar a permeabilidade ao vapor de água dos materiais, embora apresente menor importância que a humidade relativa.

Além da complexidade dos mecanismos de transferência de humidade, o transporte em fase líquida e em fase vapor pode ocorrer em simultâneo e as condições de temperatura, humidade relativa, precipitação, radiação solar e pressão do vento das ambiências – que definem as condições fronteira no interior e exterior, e das quais depende o transporte de humidade - são muito variáveis ao longo do tempo.

2.5. O FENÓMENO FÍSICO ASSOCIADO

2.5.1. INFLUÊNCIA DA INÉRCIA TÉRMICA

A noção de conforto térmico de um compartimento está associada à ausência de flutuações das temperaturas interiores. Estas dependem fundamentalmente da inércia térmica dos elementos que constituem a envolvente desse espaço, bem como do balanço energético dinâmico entre os ganhos solares através dos envidraçados, e as perdas verificadas através da envolvente para o exterior, quer por condução através dos elementos opacos, quer por renovação do ar (infiltração e ventilação natural).

Nas construções antigas, as paredes são caracterizadas pela sua grande espessura de alvenaria de pedra. Esta característica deve-se essencialmente às funções e ao desempenho pretendidos para este tipo de paredes, nomeadamente, a capacidade de mobilizar forças estabilizadoras, derivadas do seu elevado peso, que equilibrem forças derrubadoras e deslizantes, e a protecção contra agentes atmosféricos, no caso das paredes exteriores, tais como a água da chuva ou o vento, e ainda capacidade de limitação e uniformização das temperaturas interiores.

A inércia térmica de um edifício traduz a capacidade de um elemento construtivo de contrariar as variações de temperatura no seu interior, devido ao facto de armazenar calor dentro da estrutura da edificação. Esta propriedade confere-lhe a função de dissipador de calor, evitando a oscilação e os picos de temperatura durante o dia, transmitindo o calor mais tarde. Uma edificação com pouca inércia térmica revela uma variação de temperatura interna muito próxima da externa.

Dois conceitos relacionados com a inércia térmica de um edifício são o amortecimento e o atraso térmico.

O amortecimento térmico corresponde à diferença entre a energia que incide sobre a face exterior exposta e a energia que alcança a face interior, ou seja, é a capacidade da envolvente diminuir a amplitude das variações térmicas.

O atraso térmico corresponde ao intervalo de tempo que decorre até o calor absorvido no exterior alcançar a face interior da envolvente, dependendo este tempo da inércia térmica da parede.

As igrejas, e todos os edifícios antigos em geral, são edificações de elevada inércia térmica por possuírem paredes de grande espessura. Esta característica assume um papel fundamental no comportamento térmico dos edifícios, pois origina um grande desfasamento entre a temperatura do ar no exterior e no interior. Com efeito, as variações de temperatura verificadas no exterior destas construções não correspondem às que se verificam no interior, dado que as paredes deste tipo de construções retardam a transmissão das solicitações térmicas exteriores ao ambiente interior. Por este motivo, é comum que no Inverno a temperatura interior dessas edificações seja consideravelmente maior que a exterior e menor no Verão, mesmo sem a utilização de qualquer tipo de correcção [6].

2.5.2. VENTILAÇÃO DOS ESPAÇOS

A renovação do ar no interior dos edifícios é um processo fundamental para garantir uma atmosfera com níveis satisfatórios de temperatura e humidade adequadas às necessidades dos utentes. É responsável por trocas térmicas entre os edifícios e o meio exterior que, sobretudo no Inverno, contribuem para o aumento das necessidades de consumos energéticos destinados à correcção das condições termo-higrométricas do ambiente interior. A importância da renovação do ar nas edificações é bem marcada quando se analisam situações de produção de grandes quantidades de vapor de água. Nas igrejas, verifica-se que a produção de vapor de água é elevada nos períodos de missa, sendo por isso essencial extrair esse excesso de humidade para não provocar outro tipo de fenómenos como a ocorrência de condensações.

A ventilação dos espaços é de facto um mecanismo de grande importância na redução da humidade relativa interior, na medida em que permite a admissão do ar exterior, normalmente mais seco, e a extracção do ar interior, transportando consigo alguma humidade em forma de vapor de água [8]. Deste modo, a humidade relativa de um local interior ventilado é sobretudo condicionada pela humidade exterior e pelo equilíbrio entre a produção de vapor no interior e o caudal de ventilação.

Nas situações em que não se verifiquem os fenómenos de condensações é normal considerar que 95% da humidade produzida no interior é conduzida para o exterior através dos mecanismos de ventilação, e que os restantes 5% são transferidos pelas paredes exteriores através dos mecanismos de difusão [6].

2.5.3. INTERFACE ENTRE CAMADAS

Um factor que influencia bastante a transmissão de humidade através da envolvente dos edifícios é a existência de camadas nas paredes das edificações. A presença de interfaces entre camadas cria uma resistência hídrica que condiciona os fluxos transmitidos. Esta resistência à transferência de humidade verifica-se, quer nos fenómenos de embebição, quer nos de secagem das paredes. Com efeito, durante um processo de embebição, a camada que está em contacto directo com a humidade é a que fica saturada mais rapidamente, enquanto que a segunda camada se humidifica lentamente consoante a grandeza do fluxo transmitido. Num processo de secagem, a camada que é condicionada pela presença da interface, nomeadamente, a camada a jusante da alimentação da água, é a que seca mais rapidamente, enquanto que a camada a montante apresenta uma secagem mais lenta, exactamente por ter mais humidade no interior dos seus poros.

2.5.4. O PROBLEMA DA SECAGEM

Os materiais de construção devem permitir a rápida saída da água nas paredes através dos processos de secagem, o que normalmente ocorre sob a forma de vapor. Por sua vez, a secagem dos materiais está dependente da diferença de concentração de vapor de água existente na ambiência e na superfície desses materiais. No entanto, em edificações antigas, essa diferença de concentração tende para zero quando a humidade relativa é elevada, o que se deve ao facto de neste tipo de construções não haver grande diferença entre a temperatura do ar interior e a temperatura superficial interior das paredes, fazendo com que o fluxo de secagem tenda também para zero [9].

Outro factor que assume óbvia influência na secagem dos materiais é a incidência solar nas paredes das edificações. Este efeito é responsável pela menor degradação das fachadas voltadas a Sul relativamente às orientadas a Norte, devido ao facto da temperatura superficial das paredes a Sul ser superior à das paredes voltadas a Norte, o que provoca uma mais rápida secagem para teores elevados

de humidade. Este acréscimo de temperatura é ainda responsável pela condução da humidade para o interior através dos fenómenos de termomigração. Por outro lado, as paredes orientadas a Norte tornam-se mais propícias ao aparecimento de musgos e apresentam-se bem mais degradadas que as paredes a Sul, devido ao seu lento processo de secagem. No entanto, quando a humidade relativa à superfície das paredes é baixa, a radiação deixa de ter praticamente influência na secagem.

2.6. PARÂMETROS DE NATUREZA HIGROTÉRMICA

2.6.1. TEMPERATURA

A temperatura dos locais, seja ela interior ou exterior, condiciona fortemente o comportamento higrotérmico dos edifícios, uma vez que influencia directamente o valor da humidade relativa do ar no interior de um compartimento.

O clima exterior apresenta grandes variações de temperatura ao longo do ano, com valores elevados durante o Verão e valores mais baixos no Inverno. Por sua vez, o clima interior dos edifícios não deve apresentar grandes oscilações de temperatura, para se conseguir manter o equilíbrio e o conforto térmico.

A temperatura interior está ainda relacionada com a renovação do ar nos espaços, através das condições de ventilação, com a radiação solar e a inércia térmica da envolvente, bem como das condições de ocupação e produção de vapor no interior.

A envolvente de um edifício, estando sujeita a um gradiente de temperatura provocado pelas diferenças climáticas interiores e exteriores, vai originar mecanismos de termomigração, que conduzem a humidade da zona quente para a zona fria.

2.6.2. HUMIDADE DO AR

Tal como foi referido anteriormente, e de acordo com o NIT 002 – LFC [3], o ar pode conter uma certa quantidade de vapor de água, que por sua vez varia na razão directa da variação da temperatura, isto é, quanto maior for a temperatura maior é a quantidade de vapor de água que o ar pode conter, e quanto menor for a temperatura menor será também o seu potencial para conter vapor de água.

Deste modo, define-se humidade absoluta (W) como sendo a quantidade de vapor de água existente por unidade de volume ou de massa de ar.

Como também já foi referido anteriormente, a quantidade de vapor de água que um dado volume de ar pode conter é limitada, designando-se por limite de saturação (W_s) a quantidade máxima de vapor de água susceptível de ser contida no ar para uma dada temperatura.

Assim sendo, é possível definir a humidade relativa (HR) como sendo a quantidade de vapor de água presente no ar relativamente à quantidade máxima de vapor de água que esse ar poderia conter, para uma mesma temperatura [3]:

$$HR = \frac{W}{W_s} \times 100 \quad (2.1)$$

em que:

HR: Humidade relativa do ar – [%]

W: Humidade absoluta do ar – [Kg/m³]

Ws: Limite de saturação do ar – [Kg/m³]

2.6.3. PRESSÃO PARCIAL DE VAPOR

O vapor de água existente por unidade de volume ou de massa de ar exerce uma determinada pressão, designada por pressão parcial de vapor (P). O seu valor é tanto maior quanto mais vapor de água existir no ambiente, sendo a pressão limite correspondente ao limite de saturação, e que por sua vez se designa por pressão de saturação (Ps) [3].

As diferenças de pressão de vapor de água, entre ambiências separadas por uma envolvente, condicionam o transporte da humidade através dos elementos construtivos, assim como o gradiente de concentração de vapor entre a superfície da envolvente e a ambiência controla o processo de secagem. Por sua vez, as diferenças de pressão de vapor são consequência do comportamento higrotérmico dessas mesmas ambiências, nomeadamente das condições de temperatura e da humidade relativa.

A pressão parcial de vapor pode ser determinada a partir do conhecimento destes dois parâmetros, através do Diagrama Psicrométrico (Figura 2.1). Este diagrama exprime as relações existentes entre as temperaturas, as humidades absolutas e relativas, e as pressões de vapor de água.

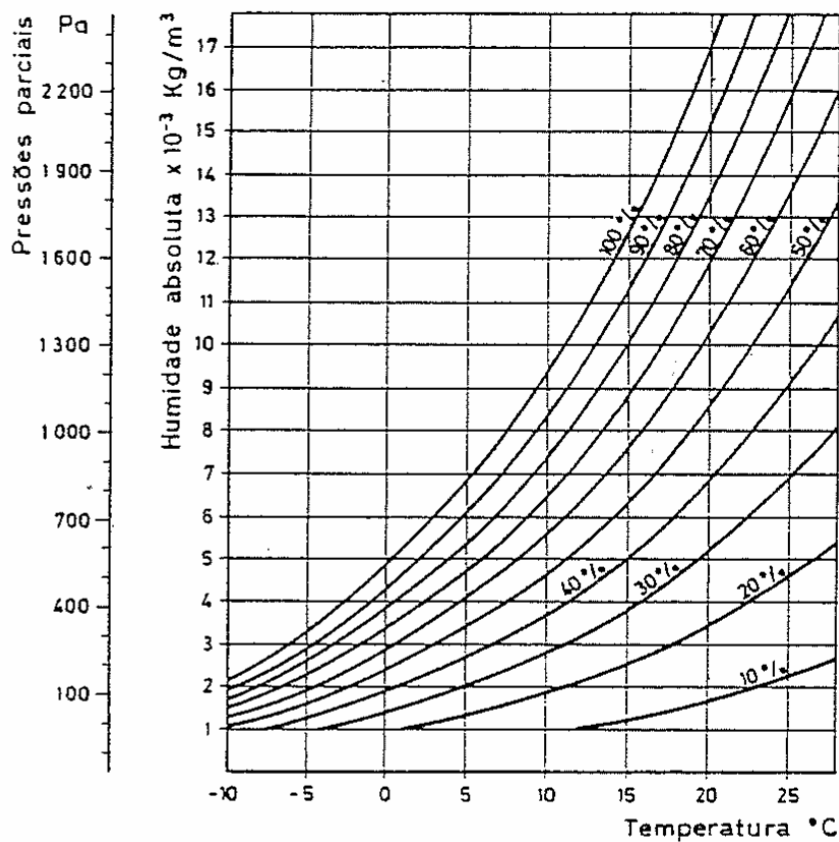


Figura 2.1 – Exemplo de um diagrama psicrométrico [5]

Em abscissas apresenta os valores da temperatura do ar, em ordenadas apresenta os valores da humidade absoluta e da pressão de vapor, e apresenta ainda um conjunto de isolinhas de humidade relativa, sendo a isolinha de valor 100% correspondente ao estado limite de saturação do ar em vapor de água.

Do mesmo modo que as isolinhas são constituídas por pontos de igual humidade relativa, as linhas horizontais representam pontos com igual humidade absoluta e as linhas verticais pontos com igual temperatura.

Considere-se por exemplo, uma situação em que o ar se encontra a uma temperatura de 20°C e uma humidade relativa de 50%. Partindo desta situação inicial, isto é, da intersecção da recta vertical correspondente aos 20°C com a curva de humidade relativa de 50%, é possível traçar uma recta horizontal – o que significa humidade absoluta constante – que permite determinar o valor da pressão parcial de vapor de água, que no caso seria de 1170 Pa. Ao arrefecer a temperatura, sem fazer variar o teor de humidade absoluta, verifica-se um aumento da humidade relativa, tal como, nas mesmas condições, se se fizer aumentar a temperatura a humidade relativa diminuirá [4]. Assim se explica a ocorrência de variações de humidade relativa no interior de um compartimento sem a produção de vapor.

Quando a humidade relativa atinge os 100%, o ar atinge o seu limite de saturação, sendo a temperatura correspondente designada por temperatura do ponto de orvalho (t_s) [3].

Uma forma de obter valores mais exactos para a pressão de saturação é através da expressão seguinte [3]:

$$P_s = 611 \cdot e^{\left(\frac{at}{t'+t}\right)} \quad (2.2)$$

em que:

P_s : Pressão de saturação – [Pa]

e : Número de Nepper – $e \approx 2,718$

t : Temperatura – [°C]

$a = 22,44$; $t' = 272,44$ °C – para $t < 0$ °C

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

Existem ainda outras expressões que permitem determinar as humidades absolutas e relativas através de relações estabelecidas entre os parâmetros anteriormente enunciados:

- Humidade absoluta:

$$W = 2,167 \times 10^{-3} \cdot \frac{P}{T} \quad (2.3)$$

em que:

W: Humidade absoluta do ar – [Kg/m³]

P: Pressão parcial de vapor de água – [Pa]

T: Temperatura – [K]

- Humidade relativa:

$$HR = \frac{P}{P_s} \times 100 \quad (2.4)$$

em que:

HR: Humidade relativa do ar – [%]

P: Pressão parcial de vapor de água – [Pa]

P_s: Pressão de saturação – [Pa]

2.7. PRINCIPAIS FORMAS DE HUMIDADE QUE AFECTAM OS EDIFÍCIOS ANTIGOS

2.7.1. HUMIDADE DE CONDENSAÇÃO

2.7.1.1. Noções Gerais

O ar pode apresentar na sua composição uma quantidade máxima de vapor de água, designada limite de saturação, que varia directamente com a temperatura, aumentando ou diminuindo consoante a temperatura aumenta ou diminui, respectivamente.

O arrefecimento do ar pode provocar a condensação do vapor de água, sempre que seja atingido o respectivo limite de saturação correspondente a uma dada temperatura. O fenómeno da condensação de vapor de água existente no ar pode ocorrer na superfície ou no interior dos elementos de construção. A humidade em excesso presente nas ambiências interiores das edificações, ou é transportada para o exterior através da renovação do ar interior, ou atravessando as paredes exteriores por difusão, ou condensa nos paramentos da envolvente exterior dos edifícios.

2.7.1.2. Condensações Superficiais

Em geral na Primavera, a temperatura exterior começa a aumentar, no entanto, para as edificações antigas como as igrejas, este acréscimo de temperatura do ar exterior não é acompanhado no interior, devido à elevada inércia térmica causada pela grande espessura das paredes. Desta forma, quer o ar ambiente interior, quer as superfícies interiores das paredes, mantêm as temperaturas que tinham anteriormente, aumentando cada vez mais os respectivos diferenciais em relação à temperatura exterior. Por sua vez, este acréscimo de temperatura do ar exterior é ainda, geralmente, acompanhado por um aumento da humidade absoluta. O ar quente e húmido do exterior é então conduzido para o interior através da ventilação regular das edificações, onde vai arrefecendo progressivamente, atingindo valores especialmente baixos nas zonas de contacto com as paredes. Este abaixamento de temperatura é acompanhado por um acréscimo da humidade relativa, podendo atingir o respectivo

limite de saturação junto às paredes, provocando nessas circunstâncias a ocorrência de condensações [5]. Com efeito, as condensações superficiais são muito frequentes na Primavera neste tipo de edificações, independentemente da produção de vapor no seu interior.

Em relação aos sintomas causados pelos fenómenos de condensação superficial, refere-se o aparecimento de manchas de humidade e bolores, generalizadas ou localizadas, nas superfícies interiores das paredes.

2.7.1.3. Condensações Internas

As condensações internas ocorrem quando o vapor de água, ao atravessar a parede por difusão, condensa no seu interior. Este tipo de condensações não dá origem, em geral, a distúrbios visíveis, podendo no entanto, provocar o apodrecimento de materiais orgânicos, o destaque de materiais, entre outros. Por sua vez, a eventual absorção da água condensada, vai provocar um acréscimo do teor de água dos materiais constituintes das paredes, fazendo diminuir a resistência térmica desses materiais e, conseqüentemente, das paredes em que estão inseridos. Este facto pode eventualmente dar origem à ocorrência de condensações superficiais.

2.7.2. HUMIDADE DO TERRENO

2.7.2.1. Noções Gerais

As paredes dos pisos térreos e caves das edificações antigas (igrejas) normalmente apresentam problemas provocados pela água do solo. Esta humidade proveniente do terreno – humidade ascensional – manifesta-se quando as paredes estão em contacto com a água ou com solo húmido, sempre que os materiais constituintes apresentam elevada capilaridade e quando não existe um corte hídrico. Com efeito, a maioria das construções históricas, para além de não possuírem qualquer protecção contra a humidade ascendente do solo, grande parte dos seus materiais de construção apresenta valores de capilaridade por vezes elevados [5], dando origem a que a humidade possa migrar através deles.

A alimentação da água pode ter duas origens: as águas freáticas e as águas superficiais, apresentando formas de manifestação e de reparação distintas.

2.7.2.2. Altura de Progressão da Água

Duma forma geral pode considerar-se que a ascensão de água numa parede progride até que se verifique o equilíbrio entre a quantidade de água evaporada pela parede e aquela que é absorvida do solo por capilaridade. Sempre que se reduzem as condições de evaporação de uma parede através da colocação de um revestimento impermeável, como por exemplo azulejo, a altura atingida pela água tem tendência a aumentar até um nível em que se restabeleça um novo equilíbrio a uma cota mais elevada (Figura 2.2).

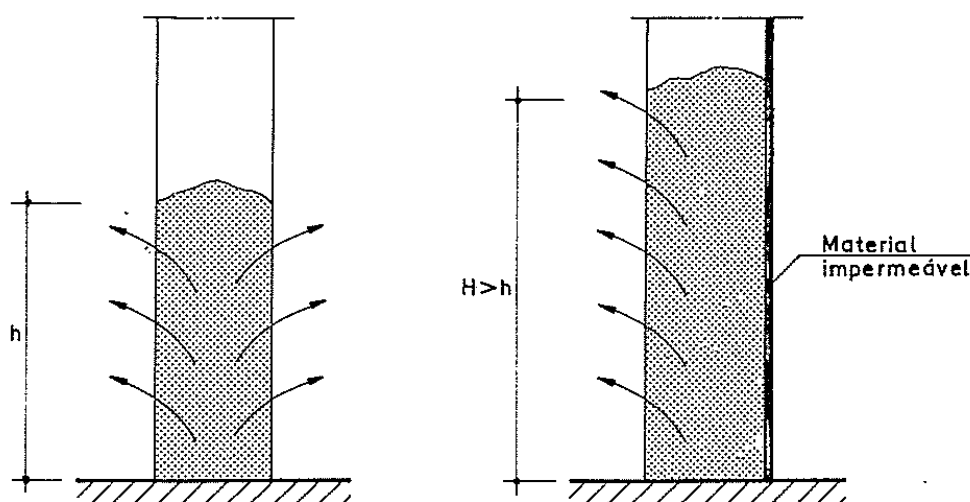


Figura 2.2 – Altura atingida pela água nas paredes, em função das condições de evaporação [5]

A altura de progressão da humidade ascensional depende das condições climáticas das ambiências (temperatura e humidade relativa), da espessura da parede, da insolação, da orientação da parede em causa – as paredes viradas a Norte são mais afectadas que as orientadas a Sul -, da porosidade dos materiais e da presença de sais. Na prática, as humidades ascensionais atingem a cota mais elevada no Inverno, podendo alcançar, em casos extremos, mais do que 5 metros (é o caso da Igreja de S. Bernardo em Roma, cujas paredes de 4 metros de espessura permitiram a ascensão da água até uma altura de 5,3 metros) [5], quando a humidade relativa do ar está mais próxima da saturação. Para uma dada constituição das paredes em condições ambientes constantes, quanto maior for a espessura maior será a altura atingida pela humidade.

2.7.2.3. Presença de Sais

Outro factor que vai influenciar a altura de progressão da água é a presença de sais no terreno ou nos materiais constituintes das paredes. Com efeito, quando se verifica a ascensão capilar, os sais são dissolvidos pela água, que os transporta ao longo da parede para alturas mais elevadas. Ao chegar às superfícies das paredes, a água evapora originando a cristalização dos sais que aí se depositam. Esta deposição à superfície pode originar eflorescências – acumulações visíveis de sais cristalizados. Com o fenómeno da cristalização dos sais vai-se dando o preenchimento dos poros da parede, provocando a diminuição da permeabilidade ao vapor de água dos elementos construtivos. Esta redução da superfície permeável das paredes vai funcionar como um revestimento, fazendo com que a altura a que a água ascende possa ainda aumentar. Além disso, o aumento de volume que ocorre aquando da cristalização dos sais, pode originar uma diminuição progressiva das capacidades resistentes das paredes.

2.7.2.4. Principais Sintomas

Os sintomas associados aos fenómenos de humidade proveniente do terreno são constituídos essencialmente por manchas de humidade, localizadas na base das paredes, e, em certos casos, por

manchas de bolor localizadas principalmente em zonas com fraca ventilação. Muitas vezes, é ainda possível verificar-se a existência de uma “linha” nas paredes (aproximadamente horizontal), que separa uma zona escura de outra mais clara. Esta “linha” tem lugar onde ocorre o equilíbrio entre a água absorvida por capilaridade e a água evaporada à superfície das paredes, apresentando também, se for o caso disso, a ocorrência de eflorescências. Convém aqui referir que a presença de eflorescências só se verifica acima desta “linha”, porque abaixo dela, a água mantém os sais em solução.

Relativamente à origem das águas, é possível distinguir se as anomalias são causadas pelas águas freáticas ou superficiais, através da análise dos fenómenos de humidade.

No caso das zonas húmidas derivarem de águas freáticas, não se verificam alterações significativas ao longo do ano, sendo a altura das manchas de humidade sensivelmente constante em cada parede. Devido a um maior grau de evaporação, as paredes exteriores apresentam manchas mais pequenas que as paredes interiores.

No caso de serem as águas superficiais a causar patologias, os fenómenos podem variar todo o ano, apresentando maior gravidade no Inverno. A altura das zonas húmidas já não se mantém constante, podendo variar bastante em cada parede.

2.7.3. HUMIDADE HIGROSCÓPICA

A higroscopicidade é uma propriedade dos materiais que os caracteriza pela sua capacidade de fixação da humidade.

As paredes das edificações revelam muitas vezes a presença de sais higroscópicos, que podem fazer parte dos próprios materiais constituintes da parede, ou que podem ter migrado por capilaridade devido aos fenómenos de humidade ascensional. Conforme foi referido anteriormente, os sais em solução ao atingirem a superfície das paredes cristalizam, ficando aí depositados. A sua presença à superfície vai permitir a absorção de humidade do ar, sempre que a humidade relativa apresente valores superiores a determinado patamar, dando-se assim a dissolução dos sais e provocando o humedecimento da parede.

Para valores de humidade relativa inferiores àquele patamar, os sais voltam a cristalizar, por consequência da evaporação da humidade. Deste modo, para variações de humidades relativas em torno do patamar de referencia, vão ocorrer ciclos de dissolução-cristalização, contribuindo para a degradação das paredes.

As patologias associadas a este tipo de fenómeno, tais como manchas de humidade, eflorescências, degradação do aspecto das paredes e degradação da própria parede, devido aos ciclos de dissolução-cristalização, podem ocorrer durante todo o ano, sempre que se verifiquem elevadas humidades relativas.

2.7.4. HUMIDADE DE PRECIPITAÇÃO

A acção da chuva sobre as paredes dos edifícios cria um efeito de molhagem que pode causar o humedecimento dos seus paramentos interiores. Com efeito, a água ao incidir sobre as paredes vai-se infiltrar nos pontos de maior vulnerabilidade, como as juntas, as zonas de ligação entre elementos, as fissuras, entre outras. Este acréscimo do teor em humidade dos elementos vai causar uma diminuição da resistência térmica da envolvente exterior, podendo ocorrer a formação de condensações. Para além disto, as paredes húmidas, quando sujeitas aos fenómenos de secagem, em especial quando a secagem

é muito rápida devido a ventos de forte intensidade, vão sofrer uma diminuição da temperatura superficial exterior. Este é mais um factor que pode vir a propiciar a ocorrência de condensações.

2.8. FORMAS DE TRATAMENTO DA HUMIDADE

2.8.1. TRATAMENTO DA HUMIDADE DE CONDENSAÇÃO

Uma forma de tratamento possível para a eliminação dos problemas de condensações consiste no aquecimento interior das edificações. Este método propõem o aquecimento dos pavimentos, com o objectivo de criar uma corrente ascensional de ar mais quente. O aquecimento, efectuado numa faixa de 60 a 80 cm ao longo das paredes, deve aumentar a temperatura superficial das paredes relativamente à temperatura do ar ambiente [5]. Desta forma, além de se incrementar a temperatura interior, ocorre ainda uma diminuição da humidade relativa. Posto isto, o risco de ocorrência de condensações será eliminado, e a secagem das paredes será efectuada de forma mais rápida e eficaz.

A utilização de soluções com isolamento térmico constitui também uma hipótese para o tratamento da humidade de condensação, no entanto, a escolha dos materiais isolantes e a sua aplicação nas paredes das construções antigas nem sempre é muito fácil, o que se compreende devido à impossibilidade de alterar as características construtivas e arquitectónicas dos edifícios com valor histórico.

Outra forma de tratamento deste tipo de anomalias é a melhoria das condições de ventilação das edificações. Com efeito, a renovação do ar é muito importante para a extracção do vapor de água que se acumula no interior dos espaços, resultante das actividades humanas. No caso particular das igrejas, os períodos de missa constituem as fases mais gravosas da produção de vapor de água, devendo por isso, proceder-se à ventilação dos espaços nessas alturas. Em condições normais de utilização dos edifícios, a ventilação deve ser limitada às horas mais quentes do dia.

2.8.2. TRATAMENTO DA HUMIDADE DO TERRENO

Existem vários métodos para o tratamento da humidade proveniente do solo, tais como:

- Ventilação da base das paredes [9] – Esta técnica consiste na abertura de valas periféricas no exterior dos edifícios, de modo a impedir o contacto das águas superficiais com as paredes da envolvente.

Para esta técnica funcionar nas melhores condições é essencial que seja aplicada preferencialmente, em casos cujo nível freático seja inferior às cotas das fundações do edifício.

- Execução de corte hídrico [9] – Este método tem como objectivo impedir a ascensão das águas freáticas, através da execução de um corte hídrico.

Uma das técnicas é a redução da secção absorvente, cujo fundamento consiste na redução da secção das paredes por onde a água ascende por capilaridade, através da execução de espaços de ar nesses locais. Deste modo, a água que ascende pode mais facilmente evaporar-se ao encontrar esses espaços vazios. Facilmente se compreenderá que esta é uma solução que pode causar muitos problemas estruturais e arquitectónicos, sendo por isso, apenas aplicada a alguns edifícios. Por este motivo, torna-se pouco usual nos dias de hoje. Este tratamento foi inicialmente idealizado para a resolução dos problemas de humidade ascensional existentes na Igreja de S. Luís dos Franceses em Roma [5].

Outro método utilizado é a introdução de barreiras estanques. A metodologia deste tipo de tratamento consiste na aplicação de materiais impermeabilizantes em toda a espessura da parede, para assim criar uma barreira que impeça a água de ascender pelas paredes.

Existe ainda a introdução de produtos hidrófugos ou tapa-poros – barreira química. Enquanto que a técnica referida anteriormente é realizada através de barreiras físicas, este método utiliza barreiras químicas como material estanque. Esta técnica consiste na furação da parede e conseqüente preenchimento com os devidos produtos químicos.

- Criação de um potencial oposto ao potencial capilar [9] – Este tratamento baseia-se na criação de um potencial eléctrico oposto ao potencial gerado pela ascensão da água – electro-osmose – procurando deste modo, anular ou inverter a migração da água na parede.
- Aplicação de drenos atmosféricos / tubos de arejamento [9] – Este processo foi idealizado por Knapen que sugeriu que fossem colocados tubos nas alvenarias para permitir a ventilação e facilitar a secagem das paredes.

2.8.3. TRATAMENTO DA HUMIDADE HIGROSCÓPICA

O problema da existência de sais higroscópicos nos materiais de construção é praticamente impossível de resolver [10]. Na realidade, a remoção dos sais não é uma medida viável em termos práticos, devido essencialmente à sua distribuição espacial nas alvenarias, e ainda à sua impossibilidade de remoção total, criando assim grandes dificuldades para qualquer procedimento que vise a anulação dos seus efeitos.

2.8.4. TRATAMENTO DA HUMIDADE DE PRECIPITAÇÃO

O tratamento das anomalias associadas à humidade de precipitação baseia-se essencialmente na criação de soluções destinadas a resolver as deficiências de estanquidade das paredes e aos problemas de infiltrações através de fissurações. Assim sendo, a sua eliminação passa pela aplicação de novos revestimentos de parede, com remoção dos já existentes, e pelo tratamento de fissuras e juntas de alvenaria das faces exteriores.

2.8.5. OCULTAÇÃO DAS ANOMALIAS

Na impossibilidade de eliminação dos problemas de humidade existentes nas paredes das edificações, pode-se optar pela ocultação das anomalias. Obviamente, este método não irá resolver o problema mas sim esconder o aspecto degradado das paredes afectadas. Um dos modos de actuação seria a aplicação de revestimentos impermeáveis nas paredes, contudo, este tipo de solução não funciona a longo prazo, devendo por isso ser evitada.

A forma mais eficaz de ocultação das anomalias consiste na execução de uma parede interior que seja impermeabilizada na base, afastada da parede inicial cerca de 5 a 10 cm e com o espaço de ar entre elas ventilado para o exterior [9].

Esta é uma técnica que também apresenta grandes inconvenientes como a alteração do aspecto interior das edificações, a redução da área e ainda a necessidade de compatibilização com a envolvente já existente. Tratando-se de edificações históricas, estes inconvenientes apresentam uma importância ainda maior.

2.9. CONCLUSÕES

A pesquisa efectuada permitiu reunir um conjunto de conclusões que retratam o comportamento higrotérmico nas construções históricas e em particular nas igrejas:

- As trocas térmicas entre os edifícios e o ambiente são condicionadas pela temperatura do ar, pela humidade relativa, pela chuva, pelo vento, pela radiação solar, bem como pelas características construtivas e funcionais das edificações;
- O problema das patologias e da reabilitação das igrejas é de difícil resolução devido ao valor histórico que essas construções apresentam;
- A humidade é uma das causas principais de degradação e da ocorrência de anomalias nas edificações antigas;
- As principais formas de humidade que afectam os edifícios antigos (igrejas) são: a humidade de condensação, a humidade do terreno, a humidade higroscópica e a humidade de precipitação;
- A grande espessura das paredes retarda a transmissão das solicitações térmicas exteriores. Esta elevada inércia térmica é responsável pelo grande desfasamento entre as temperaturas interiores e exteriores, tornando propícia a ocorrência de condensações;
- A ventilação dos espaços é um mecanismo fundamental para a extracção do vapor de água existente no interior e, conseqüentemente, para a prevenção das condensações;
- Quanto maior for a produção de vapor de água no interior dos espaços e menores forem as condições de ventilação, maiores são os riscos de condensações;
- A existência de interfaces entre camadas nas paredes cria uma resistência hídrica que se manifesta quer nos processos de embebição quer nos de secagem;
- Nas edificações antigas, quanto maior for a humidade relativa mais difícil é o processo de secagem das paredes;
- A secagem dos materiais depende da diferença de concentração do vapor de água existente na ambiência e na superfície dos materiais;
- As paredes voltadas a Norte apresentam-se mais degradadas que as paredes voltadas a Sul, devido a uma menor insolação;
- A secagem é mais rápida nas paredes orientadas a Sul relativamente ás orientadas a Norte para elevados valores de humidade relativa;
- As variações térmicas e higrotérmicas são as principais causas das condensações;
- O aumento da humidade relativa nas edificações favorece a ocorrência de condensações;
- Condições higrotérmicas gravosas, a que correspondem elevados valores de temperatura e de humidade relativa, podem provocar condensações internas;
- O vapor de água, ao atravessar os elementos de construção através dos processos de difusão, pode condensar no seu interior;
- A manifestação dos fenómenos de humidade ascensional nas construções antigas deve-se essencialmente à existência de paredes térreas, à capilaridade dos elementos de construção e à inexistência de um corte hídrico;
- A altura de progressão da água numa parede, verifica-se até ao nível onde é atingido o equilíbrio entre a água absorvida e a evaporada;
- A presença dos sais higroscópicos nos materiais de construção causa o humedecimento das paredes sempre que a humidade relativa apresente valores elevados;
- A humidade de precipitação cria um efeito de molhagem responsável pelo humedecimento dos paramentos interiores das paredes;
- No tratamento das diversas formas de humidade, interessa adoptar soluções que assegurem resultados satisfatórios a longo prazo;

- O tratamento da humidade de condensação passa pelo aquecimento e pela ventilação dos espaços;
- O tratamento da humidade devida a fenómenos de higroscopicidade é muito difícil dada a impossibilidade, em termos práticos, de remoção física dos sais higroscópicos;
- O tratamento das anomalias causadas pela humidade de precipitação passa pela aplicação de novos revestimentos e pelo tratamento das juntas e fissuras;
- Existem diversas formas para o tratamento da humidade ascensional, no entanto, o melhor modo de tratar este problema consiste na sua prevenção;
- A ventilação da base das paredes e a execução de corte hídrico são dois métodos interessantes de tratamento, sendo que o primeiro constitui uma tecnologia simples que ainda é objecto de estudo, e o segundo depende do tipo de produto e das condições de aplicação para a sua eficácia;
- A criação de um potencial oposto ao potencial capilar e a aplicação de drenos atmosféricos são técnicas que não apresentam resultados satisfatórios;
- A ocultação das anomalias não resolve os problemas mas sim, esconde o aspecto degradado dos elementos afectados, implicando para isso, a alteração física do espaço.

É essencial referir ainda que os aspectos aqui analisados fazem parte de um vasto estudo existente neste domínio.

3

ESTUDO EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUÇÃO

Uma forma de conhecer o comportamento higrotérmico no interior de uma construção é efectuando estudos experimentais, para se obterem resultados reais. Assim sendo, realizou-se um conjunto de medições numa igreja seleccionada, para avaliar o seu comportamento. Desta forma, os valores obtidos ao fim de algum tempo, irão traduzir o desempenho higrótermico real da igreja, face às variações climáticas, às suas características construtivas, bem como às suas características funcionais. A análise destes valores irá permitir a obtenção de valores médios e a elaboração de gráficos, que poderão servir de exemplo de comparação com outros estudos eventualmente realizados. Para além disso, este tipo de estudos experimentais têm como principal objectivo, além da caracterização termo-higrométrica da construção em questão, a apresentação de propostas de melhoramento e correcção do edifício no que respeita à sua higrometria, tendo em conta todas as dificuldades e impedimentos que este tipo de construções com importância histórica podem ter.

3.2. DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO

A igreja analisada neste trabalho foi a Igreja de Santo Ildefonso, que se situa numa das extremidades da Praça da Batalha na cidade do Porto. A sua escolha para este trabalho foi devido ao facto de ser uma construção já bastante antiga (século XVIII) e por fazer parte do património nacional.

Esta igreja foi edificada a partir de 1709 sobre os alicerces da Ermida de Santo Ildefonso, que se encontrava em ruínas, ficando esta obra concluída a 18 de Julho de 1739. Assenta numa plataforma a que se ascende por uma escadaria de dimensões consideráveis, apresentando uma fachada regular, composta por duas torres sineiras com dentilhões nas cornijas, rematadas em cada face por esferas e frontões de fantasia. As suas paredes são espessas e em granito, sendo a fachada revestida com azulejos de Jorge Colaço (1932) [11], retratando cenas da vida de Santo Ildefonso e alegorias à eucaristia. No interior, a nave é poligonal (octógono alongado) em estilo proto-barroco, com um tecto abobadado em madeira e estuques ornamentais repetidos nas paredes. Nestas existem dois grandes quadros emoldurados em estilo rococó. A nave apresenta ainda seis nichos de altares e dois púlpitos, sendo o pavimento em madeira. A capela-mor é receptora do retábulo em talha dourada e decorada com trabalhos em gesso, incorporando um tecto abobadado de quatro vertentes com uma lanterna central. O nártex da igreja apresenta uma área tumular com estruturas em granito. No exterior existe um centro paroquial que envolve a capela-mor.



Figura 3.1 – Igreja de Santo Ildefonso

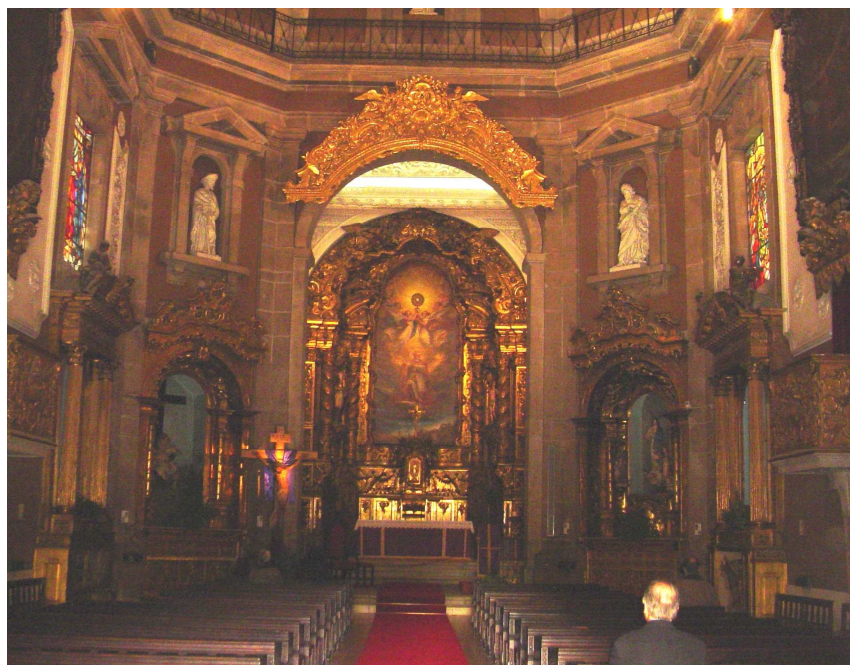


Figura 3.2 – Interior da Igreja de Santo Ildefonso

3.3. DESCRIÇÃO DAS ANOMALIAS

No decorrer das visitas realizadas à Igreja foi possível identificar sinais da presença da humidade no seu interior, tais como: manchas escuras nas zonas inferiores das paredes e contrafortes, condensações nos cantos da cobertura da nave e ainda dois quadros bastante escurecidos e deteriorados, como se pode ver nas Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6.



Figura 3.3 – Manchas escuras de humidade nas paredes



Figura 3.4 – Manchas escuras de humidade nas paredes



Figura 3.5 – Condensações na cobertura

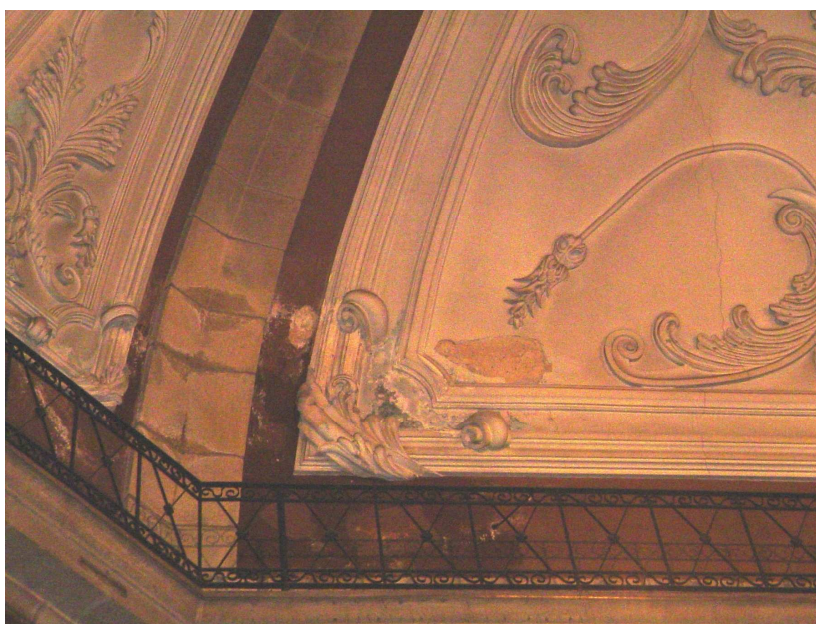


Figura 3.6 – Condensações na cobertura



Figura 3.7 – Quadro escurecido pela humidade

3.4. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS

3.4.1. APARELHOS DE MEDIÇÃO

Para a realização das medições pretendidas ao longo deste estudo, foram utilizados dois aparelhos electrónicos de aquisição de sinais – HOB0 RH/Temp Data Logger, da Onset Computer Corporation - um para efectuar medições no interior e outro no exterior. Estes sensores são de tamanho reduzido e vêm com um software que é instalado no computador, podendo ser programado para leituras horárias, ou de fracções de hora, sendo depois descarregada essa informação no computador.

Este equipamento foi cedido pelo Laboratório de Física das Construções da FEUP.



Figura 3.8 – Aparelho de medição

3.4.2. PARÂMETROS A MEDIR E LOCALIZAÇÃO DOS APARELHOS

Para avaliar o comportamento termo-higrométrico de um local é necessário conhecer os principais parâmetros de natureza higrotérmica, mais precisamente, a temperatura e a humidade relativa. Como tal, foi colocado um dos sensores no interior da igreja e outro no exterior, para medir as temperaturas e as humidades relativas internas e externas ao edifício, respectivamente. O primeiro ficou localizado no

púlpito e o segundo ficou na torre sineira, estando este último protegido da chuva e do vento por uma caixa de plástico devidamente furada para deixar entrar o ar.

As Figuras 3.8 e 3.9 demonstram os locais onde foram dispostos os Data Loggers.



Figura 3.9 – Púlpito da Igreja onde foi colocado o primeiro aparelho de medição



Figura 3.10 – Torre sineira onde foi colocado o segundo aparelho de medição

3.4.3. PERÍODO DE MEDIÇÕES

As medições foram efectuadas durante um período de cerca de 4 meses, tendo-se iniciado com as leituras no dia 07/11/2007 e terminado no dia 21/02/2008. A aquisição de dados, quer de temperatura, quer de humidade relativa, foi feita de $\frac{1}{4}$ em $\frac{1}{4}$ de hora, para melhor se verificarem as alterações da ambiência, principalmente no interior da igreja durante o seu período de utilização.

O procedimento das medições ao longo destes meses consistiu: na instalação dos aparelhos, previamente programados, nos respectivos locais e registo da data e hora de início das medições; passado determinado número de dias, era necessário regressar à igreja para se fazer a transferência da informação dos aparelhos para um ficheiro, em formato Microsoft Excel; seguidamente colocavam-se os sensores novamente nos seus lugares, já com a memória de dados livre e novamente programados para novas leituras; por fim, todos os dados obtidos eram armazenados numa folha Excel.

3.5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.5.1. EXTERIOR

3.5.1.1 Gráfico de Distribuição de Temperaturas

Na Figura 3.11, é possível visualizar a grande variação de temperaturas que ocorre no exterior, sendo de realçar a diminuição deste parâmetro até meados de Dezembro, vindo depois a aumentar bastante por volta do mês de Fevereiro.

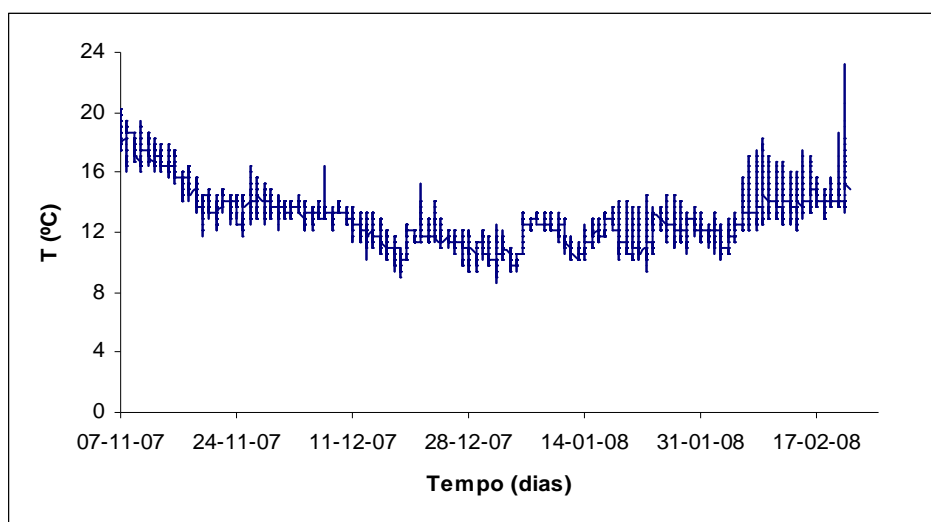


Figura 3.11 – Distribuição da temperatura exterior entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.5.1.2. Gráfico de Temperaturas Médias Diárias

Na Figura 3.12, apresenta-se a distribuição das temperaturas verificadas no exterior segundo médias diárias. Verifica-se que as temperaturas mais elevadas ocorreram nos dias 07/11/2007 e 21/02/2008.

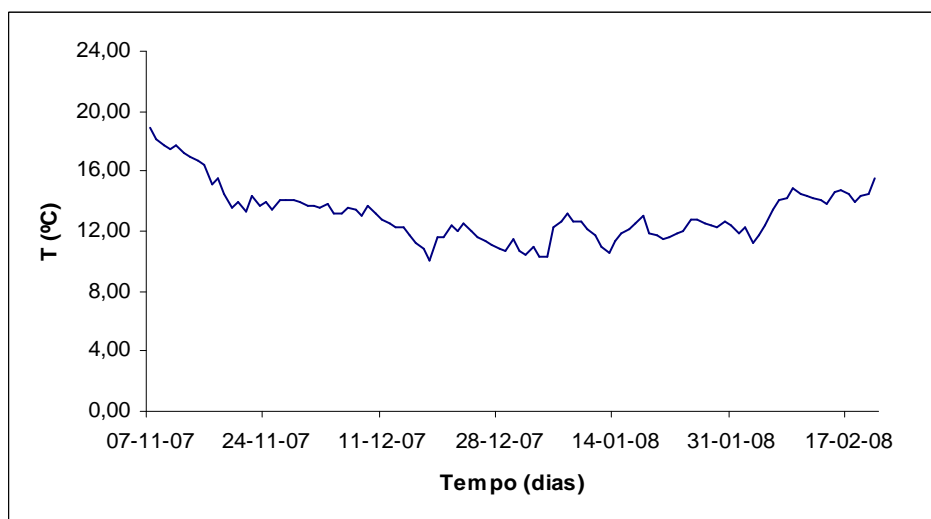


Figura 3.12 – Temperaturas médias diárias exteriores entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.5.1.3. Gráfico de Distribuição de Humidades Relativas

O gráfico da Figura 3.13 revela uma grande variação da humidade relativa no exterior, sendo que os valores extremos oscilam entre 24% e 92%, aproximadamente.

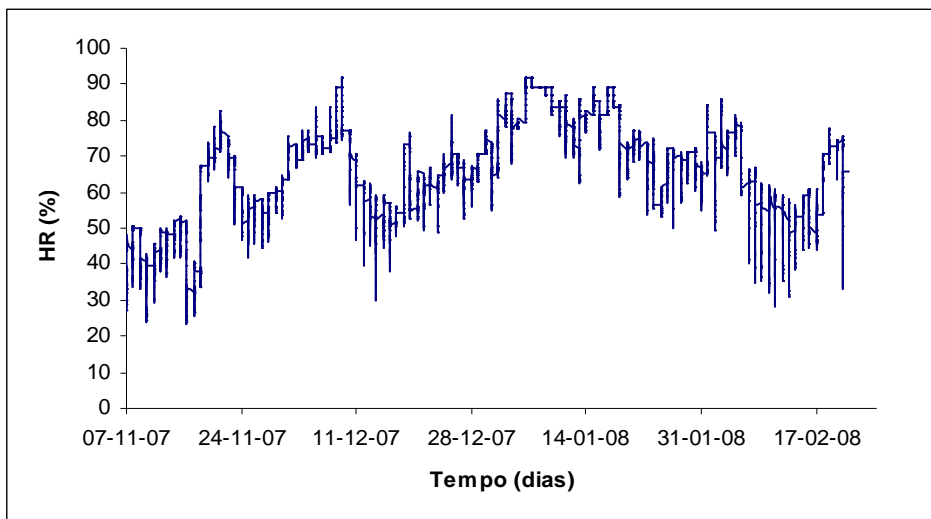


Figura 3.13 – Distribuição da humidade relativa exterior entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.5.1.4. Gráfico de Humidades Relativas Médias Diárias

Neste gráfico (Figura 3.14), é possível verificar as oscilações da humidade relativa através de valores médios diários. O dia 17/11/2007 foi aquele que apresentou um valor médio de humidade relativa mais baixo.

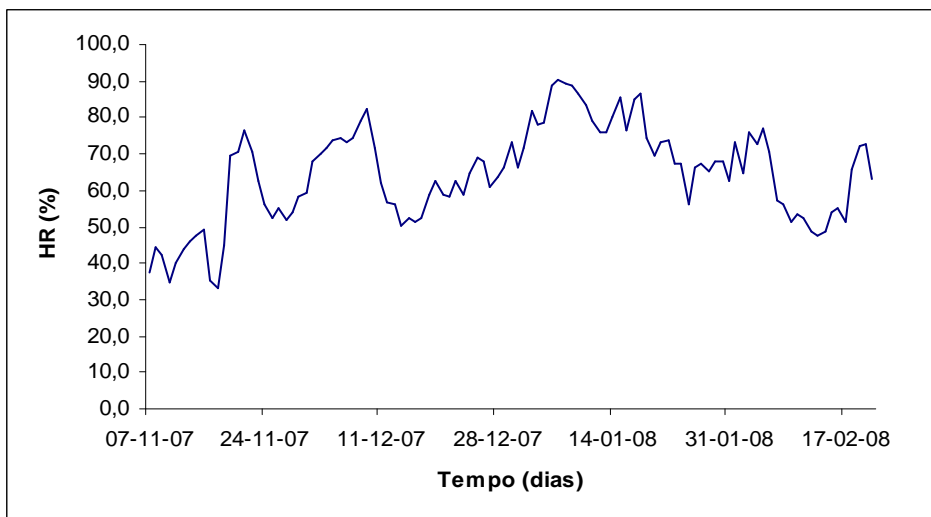


Figura 3.14 – Humidades relativas médias diárias exteriores entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.5.2. INTERIOR

3.5.2.1. Gráfico de Distribuição de Temperaturas

A variação das temperaturas no interior da igreja está representada na Figura 3.15. Por observação deste gráfico é possível verificar que inicialmente a temperatura diminuiu, depois manteve-se mais ou menos constante, vindo a aumentar por volta do mês de Fevereiro.

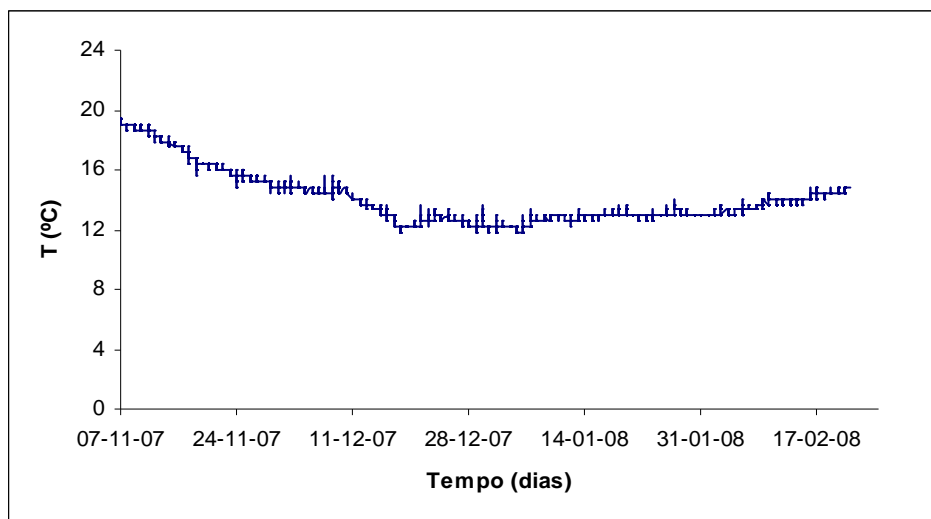


Figura 3.15 – Distribuição da temperatura interior entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.5.2.2. Gráfico de Temperaturas Médias Diárias

Na Figura 3.16, encontram-se os valores médios diários para as temperaturas registadas na igreja. A temperatura mais elevada ocorreu no dia 07/11/2007.

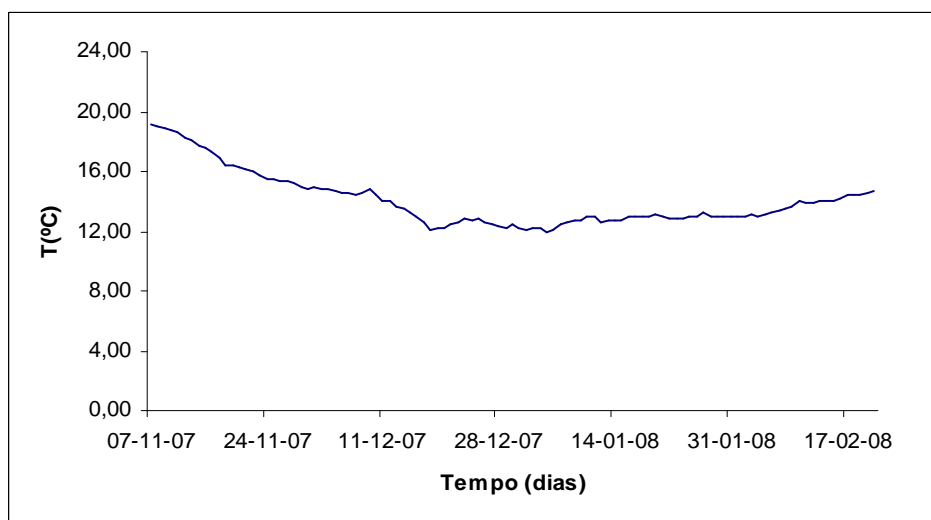


Figura 3.16 – Temperaturas médias diárias interiores entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.5.2.3. Gráfico de Distribuição de Humidades Relativas

As medições da humidade relativa no interior da igreja encontram-se na Figura 3.17, onde é possível verificar uma grande variação dos valores, apresentando oscilações entre 22% e 80%, aproximadamente.

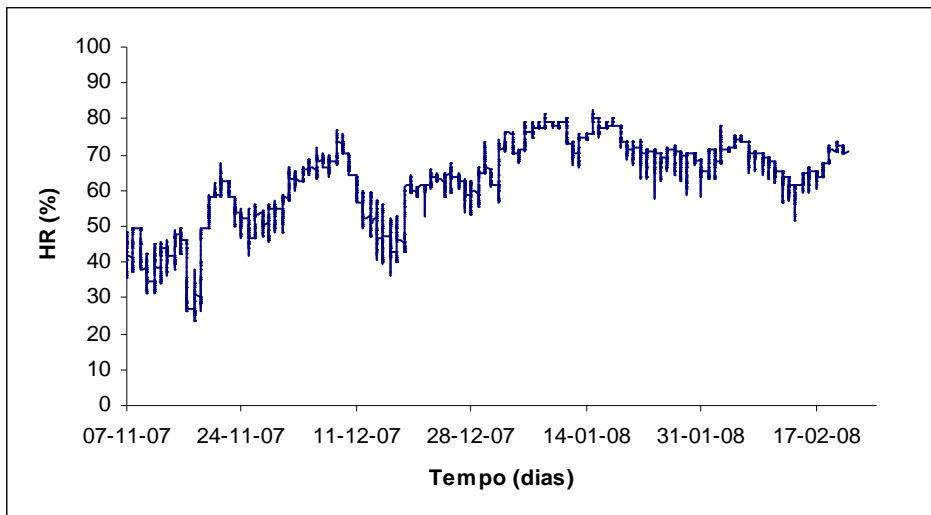


Figura 3.17 – Distribuição das humidades relativas interiores entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.5.2.4. Gráfico de Humidades Relativas Médias Diárias

Na Figura 3.18 apresentam-se os valores médios diários de humidade relativa. O valor mais baixo ocorreu no dia 17/11/2007.

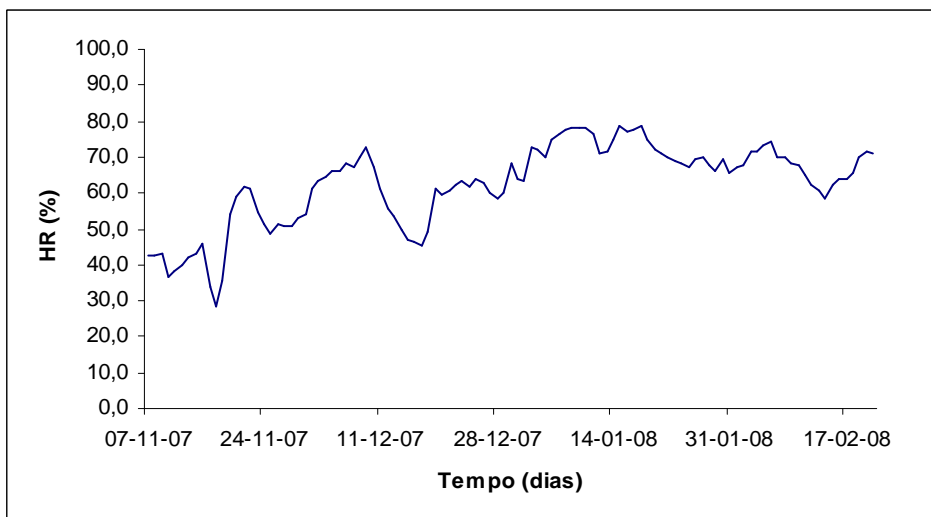


Figura 3.18 – Humidades relativas médias diárias interiores entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.6.1. PERÍODO DE MEDIÇÕES

3.6.1.1 Gráfico de Temperaturas Médias Diárias

A Figura 3.19 apresenta os valores médios diários das temperaturas internas e externas à igreja, agora num único gráfico para uma melhor comparação dos resultados.

Por observação deste gráfico é possível verificar que o interior da igreja apresenta estabilidade térmica, pois apesar das temperaturas internas seguirem o comportamento das temperaturas externas, não o fazem com grandes oscilações nem grandes picos de temperatura máxima e mínima. Verifica-se também que as temperaturas no interior da igreja durante o período de medições em questão (Inverno), são quase sempre superiores às que se fazem sentir no exterior, excepto em alguns dias de Janeiro e de Fevereiro, quando a temperatura exterior começa a aumentar.

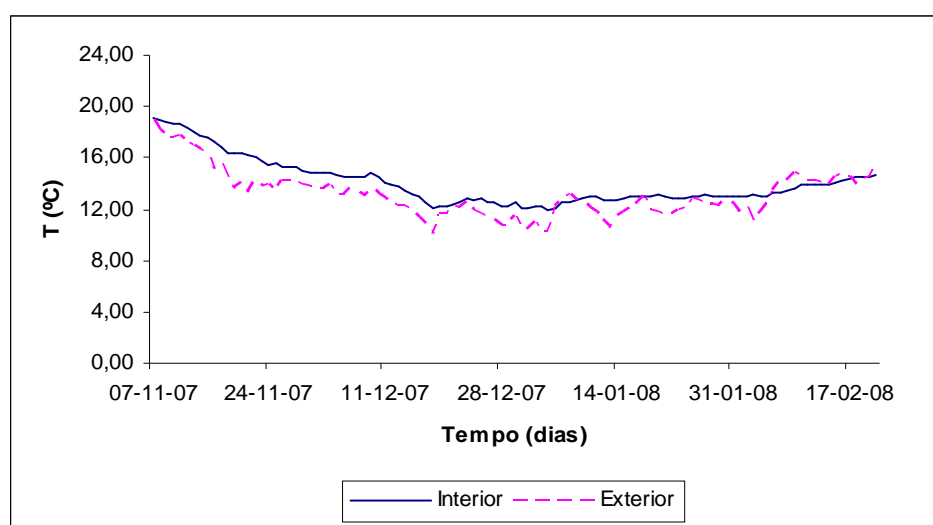


Figura 3.19 – Temperaturas médias diárias entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.6.1.2. Gráfico de Humidades Relativas Médias Diárias

A Figura 3.20 apresenta os valores médios diários da humidade relativa, registados no interior e no exterior da igreja.

A visualização deste gráfico revela grandes oscilações nos valores de humidade relativa, quer no exterior, quer no interior, sendo as oscilações exteriores um pouco mais frequentes. Também é possível verificar que, normalmente, as humidades relativas interiores são inferiores às que ocorrem no exterior da igreja.

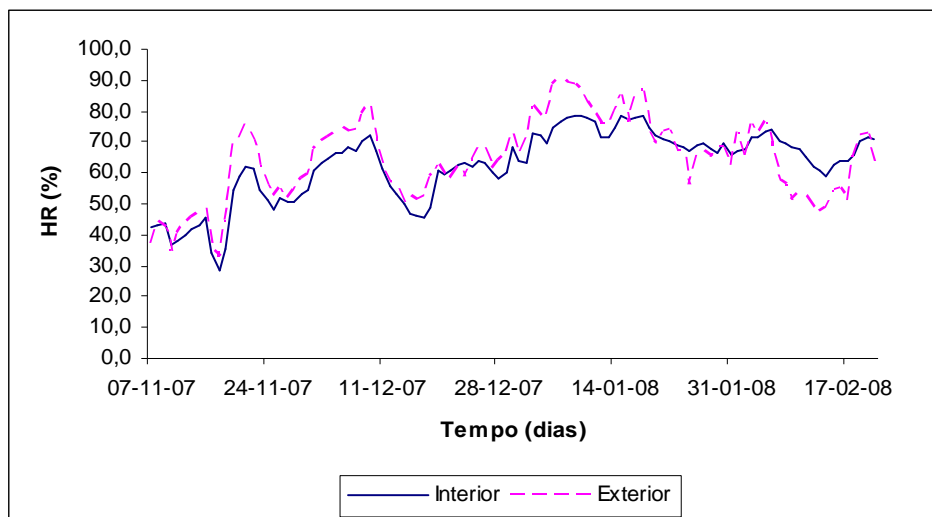


Figura 3.20 – Humidades relativas médias diárias entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.6.1.3. Gráfico de Pressão Parcial de Vapor de Água

Os valores da pressão parcial de vapor de água, no interior e no exterior da igreja, foram calculados através das expressões (2.2) e (2.4), enunciadas no Capítulo 2, a partir do conhecimento das temperaturas e humidades relativas internas e externas, respectivamente. Os resultados são apresentados no gráfico da Figura 3.21.

A análise deste gráfico permite constatar que a pressão parcial de vapor no interior é muito próxima da pressão no exterior, sendo a primeira, por vezes, superior à segunda. Isto deve-se ao facto de haver uma grande produção de vapor de água no interior nos períodos de utilização da igreja, encontrando-se esta, na maioria das vezes, pouco ventilada, acumulando assim o vapor de água no seu interior. Este comportamento vai levar a que a humidade relativa no interior também aumente.

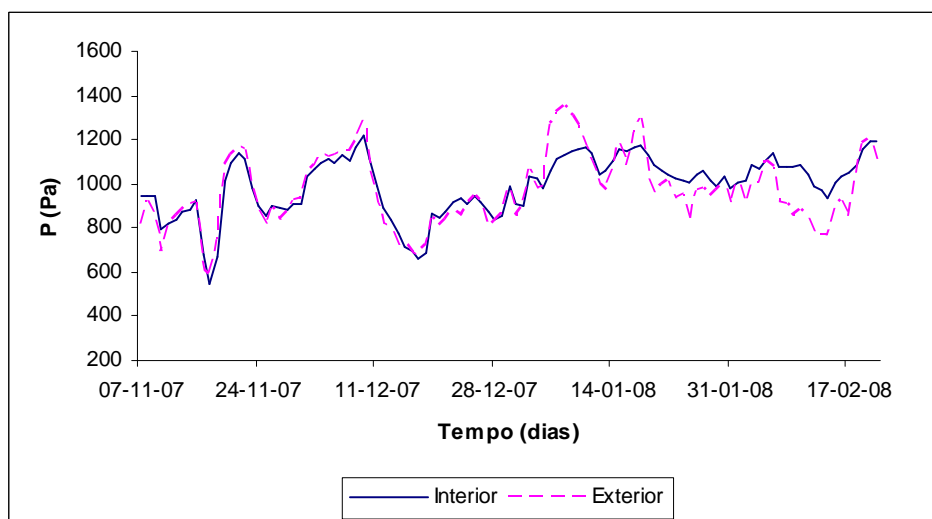


Figura 3.21 – Pressões parciais de vapor de água entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.6.1.4. Gráfico da Variação da Pressão Parcial de Vapor de Água

Para uma melhor compreensão da evolução da pressão parcial de vapor no interior da igreja, calcularam-se as variações de pressão ($dP = P_{\text{interior}} - P_{\text{exterior}}$) (Figura 3.22).

As baixas variações apresentadas neste gráfico comprovam, mais uma vez, a proximidade entre as pressões de vapor no exterior e no interior. É ainda possível verificar que em vários momentos a variação da pressão de vapor se anula e até inverte o seu valor, ou seja, a pressão parcial de vapor torna-se maior no exterior da igreja do que no seu interior.

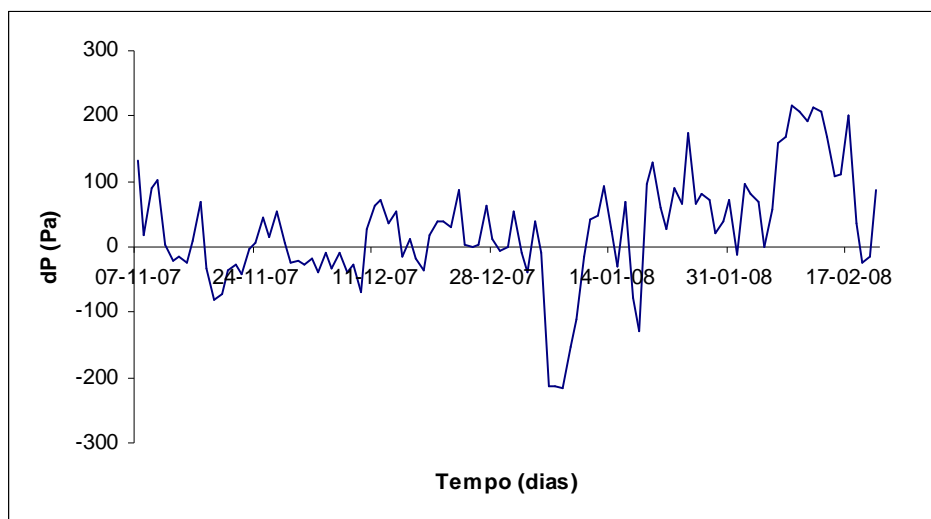


Figura 3.22 – Variação da pressão parcial de vapor de água entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.6.1.5. Gráfico de Amplitudes Térmicas Diárias

A Figura 3.23, apresenta as amplitudes térmicas diárias verificadas no interior e no exterior da igreja. Este gráfico obtém-se da subtração entre o valor máximo e mínimo de temperatura diária, de forma a se poder comparar as amplitudes externas com as amplitudes internas.

Por observação deste gráfico, facilmente se compreende que a variação de temperatura no interior é muito pequena, chegando várias vezes a manter-se constante durante alguns dias. Isto deve-se ao efeito da inércia térmica das paredes, que provoca o amortecimento dos picos de temperatura, mantendo um ambiente térmico constante e confortável no interior da igreja. É possível verificar ainda que o aumento das temperaturas exteriores por volta do mês de Fevereiro, que conduziram a maiores amplitudes térmicas no exterior, não se fizeram sentir no interior da igreja.

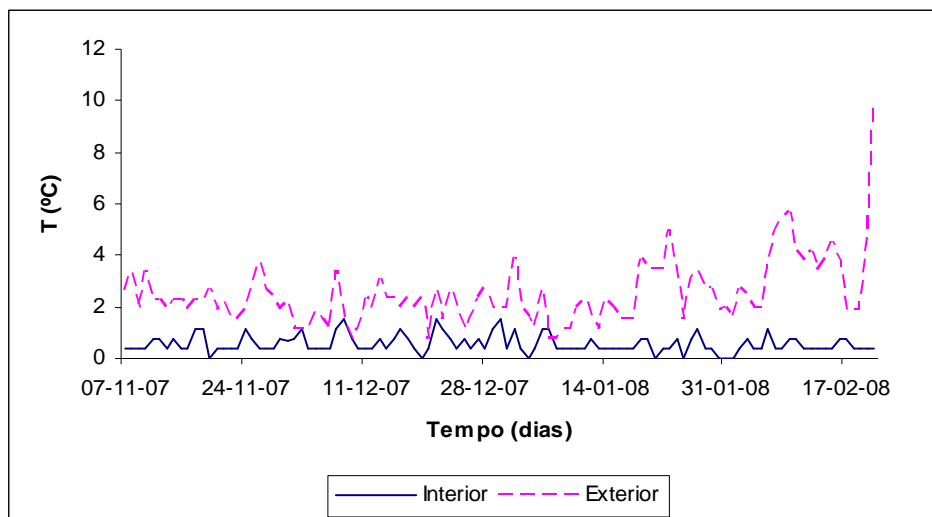


Figura 3.23 – Amplitudes térmicas diárias entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

3.6.1.6. Gráfico do Atraso Térmico Diário

O atraso térmico diário está representado no gráfico da Figura 3.24 e corresponde ao intervalo de tempo que demora a atingir a temperatura máxima no interior partindo do instante em que ocorre a temperatura máxima no exterior.

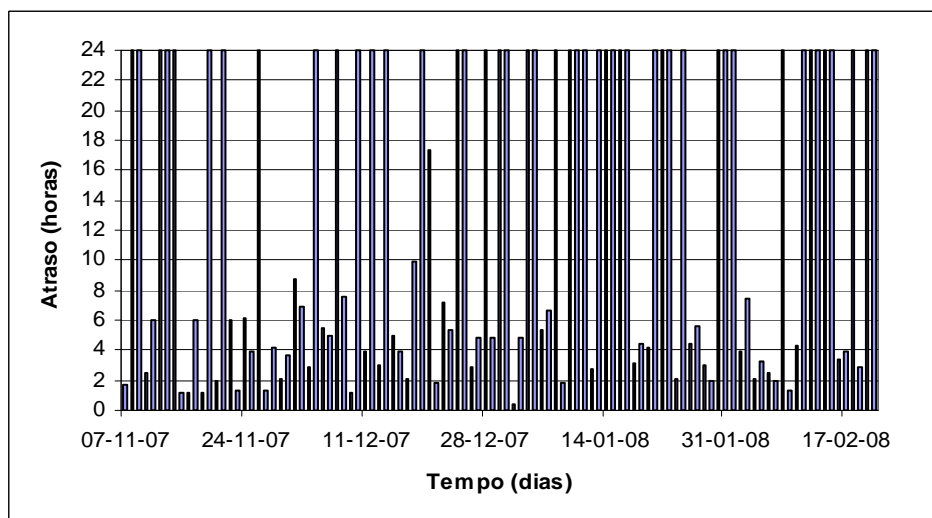


Figura 3.24 – Atraso térmico diário entre o início do dia 07/11/2007 e o fim do dia 21/02/2008

A análise deste gráfico permite verificar que em vários dias, o atraso térmico é tão elevado que nem chega a ter efeito sobre as temperaturas internas, nesses mesmos dias. Isto significa que, nestes casos, a temperatura no interior da igreja, se mantém constante ou passado algum tempo diminui, apesar do aumento da temperatura externa. No gráfico, os dias em que o atraso térmico não se faz sentir no interior e que não chega a influenciar as temperaturas internas, são aqueles a que correspondem atrasos térmicos diários de 24 horas. Este é mais um efeito da inércia térmica, que retarda a transmissão do calor através da sua acumulação nos materiais de construção.

3.6.2. COMPORTAMENTO DIÁRIO

3.6.2.1. Generalidades

No sentido de analisar mais particularmente o comportamento diário da igreja, em períodos de utilização, apresentam-se neste Sub-Capítulo alguns gráficos diários, com as condições climáticas internas e externas, para uma melhor comparação dos resultados.

Os dias seleccionados, que aqui se apresentam, são representativos do comportamento da igreja, por apresentarem o desempenho característico verificado durante o período de medições deste trabalho.

O período de funcionamento da igreja durante a semana e também ao Sábado é das 9h às 12h e das 15h às 18:30h, encontrando-se encerrada à Segunda-feira de manhã, e ao Domingo é das 9h às 13h e das 18h às 20h.

O horário das missas é, de Segunda a Sexta-feira, às 18h, Sábados às 19h e Domingos às 10h, 12h e 19h.

3.6.2.2. Gráficos Diários de Distribuição de Temperaturas

As Figuras 3.25, 3.26, 3.27 e 3.28 apresentam as temperaturas internas e externas à igreja em dias distintos.

Como se pode verificar nos gráficos das Figuras anteriores, a temperatura no interior da igreja não apresenta grandes oscilações, mantendo-se praticamente constante ao longo do dia, apesar da variação externa. Este facto já era de se esperar devido à elevada inércia térmica das paredes, que permitem manter a estabilidade térmica e evitar as oscilações. Para além disso, a temperatura no interior é quase sempre superior à temperatura exterior, o que se deve ao armazenamento do calor no interior da igreja.

É ainda possível verificar a diminuição da temperatura com a chegada dos dias mais frios.

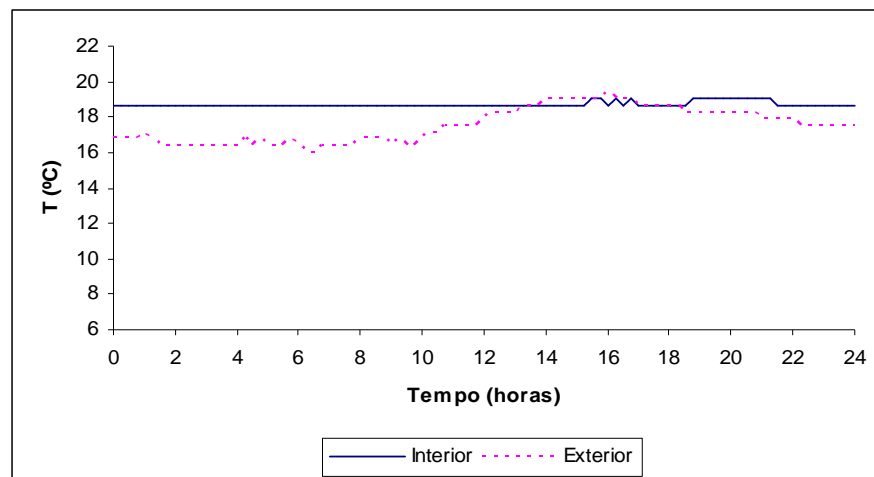


Figura 3.25 – Distribuição das temperaturas do dia 10/11/2007

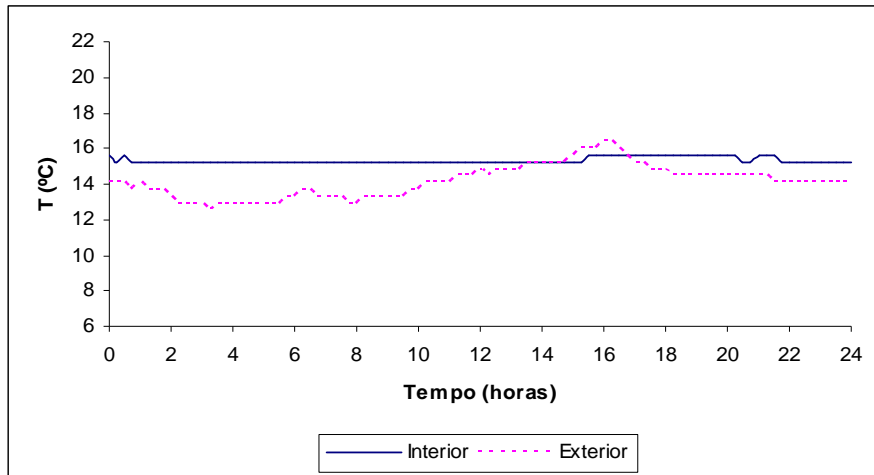


Figura 3.26 – Distribuição das temperaturas do dia 26/11/2007

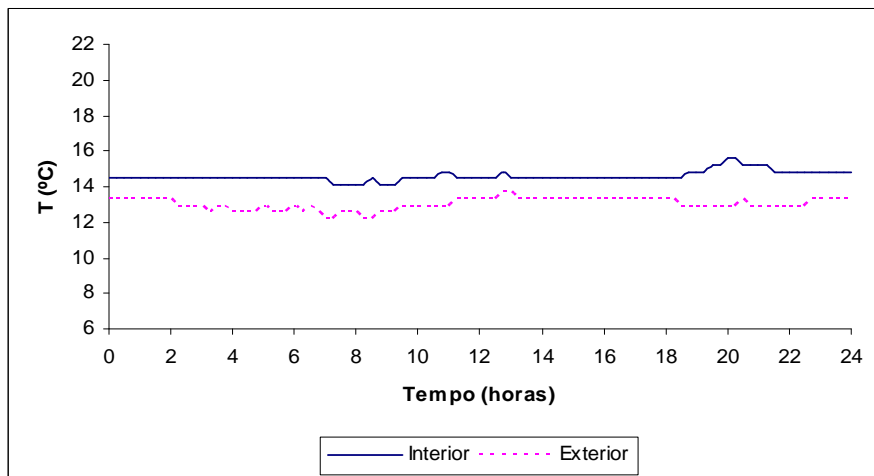


Figura 3.27 – Distribuição das temperaturas do dia 08/12/2007

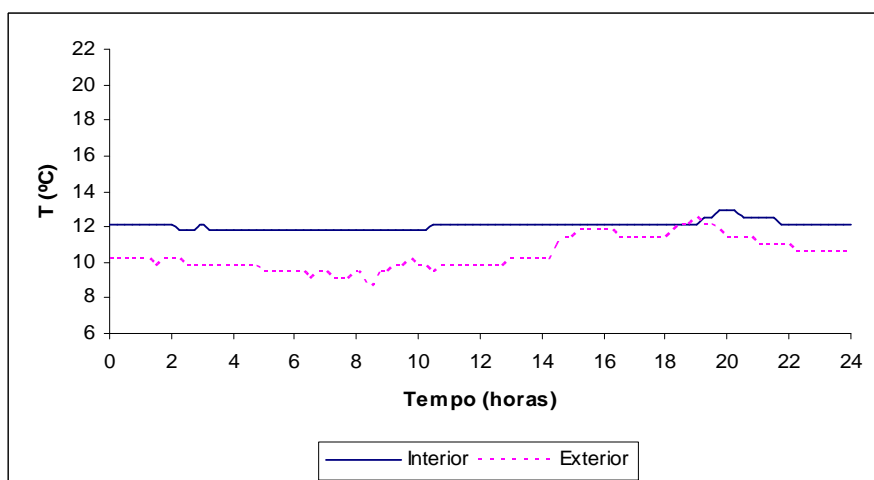


Figura 3.28 – Distribuição das temperaturas do dia 01/01/2008

3.6.2.3. Gráficos Diários de Humidades Relativas

As Figuras 3.29, 3.30, 3.31 e 3.32 apresentam os resultados das humidades relativas internas e externas de diferentes dias da semana.

Por observação da Figura 3.29, verifica-se que a humidade relativa no interior começa a aumentar por volta das 9 horas, o que se deve à entrada da humidade exterior, por consequência da abertura da igreja (início de funcionamento). Também é possível verificar que a humidade relativa no interior da igreja se vai acumulando e que por volta das 18 horas segue muito próxima a variação da humidade relativa no exterior. Este facto pode ser explicado pela ocorrência de missa a esta hora, o que leva a que as portas da igreja estejam mais tempo abertas, aproximando os valores da humidade relativa.

A Figura 3.30 apresenta um comportamento semelhante ao do gráfico anterior, mas com mais oscilações. Isto deve-se, provavelmente, ao facto de haver mais movimentação no interior da igreja, por se tratar de um Sábado.

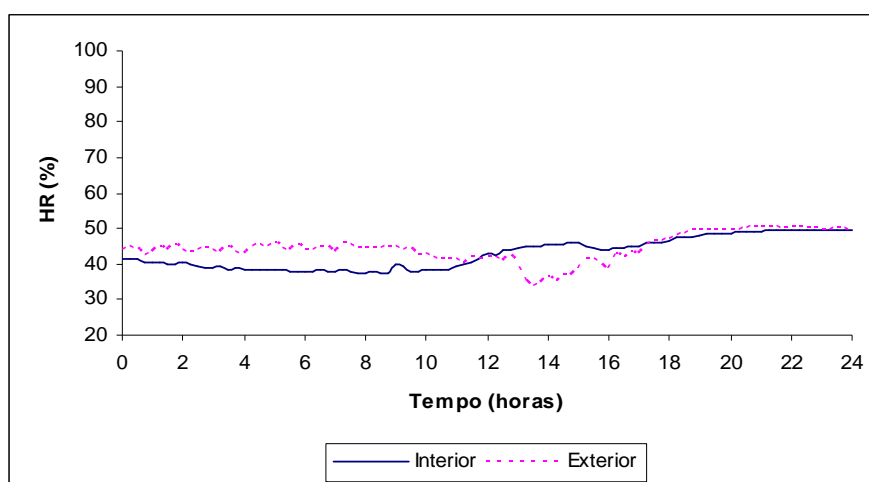


Figura 3.29 – Distribuição das humidades relativas do dia 08/11/2007

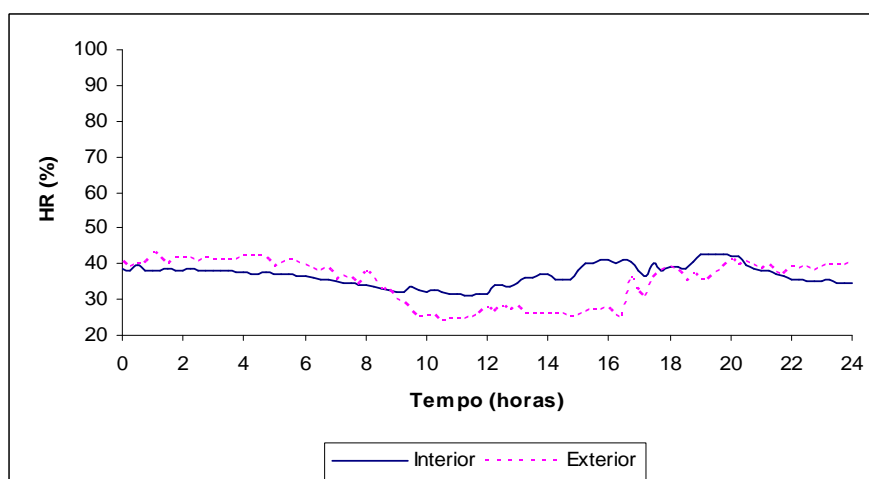


Figura 3.30 – Distribuição das humidades relativas do dia 10/11/2007

As Figuras 3.31 e 3.32 já revelam valores de humidade relativa superiores aos dos gráficos anteriores, pois correspondem a períodos mais frios e chuvosos.

Verifica-se ainda na Figura 3.32, que a humidade relativa fica armazenada dentro da igreja, sendo a humidade relativa exterior superior. Este comportamento deve-se, provavelmente, ao facto de nestes dias a igreja permanecer menos tempo com as portas abertas, diminuindo assim a entrada da humidade exterior, bem como, a saída da humidade existente no interior da igreja.

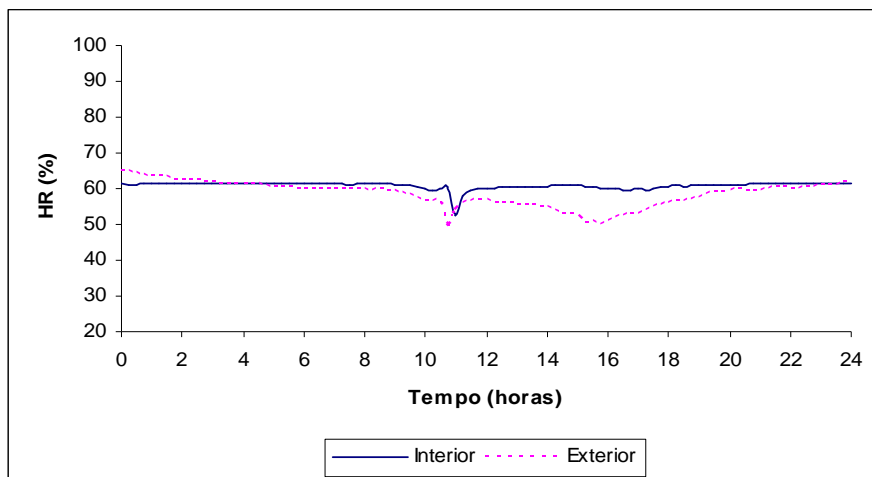


Figura 3.31 – Distribuição das humidades relativas do dia 21/12/2007

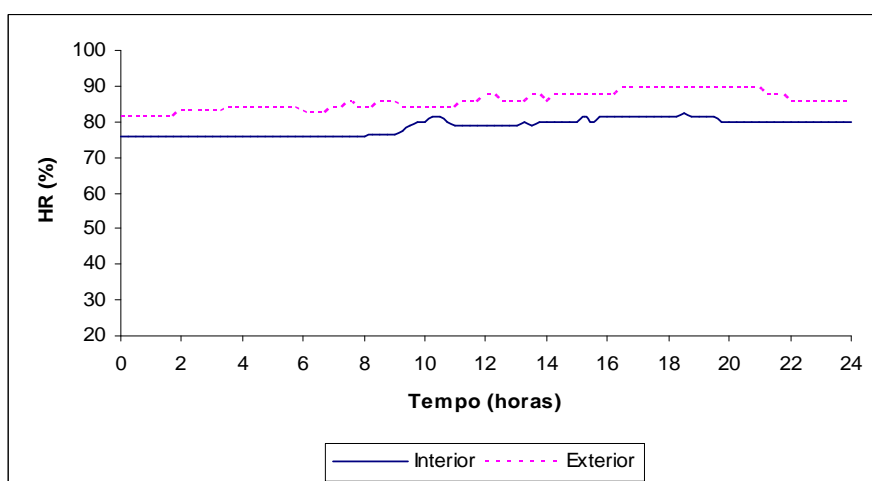


Figura 3.32 – Distribuição das humidades relativas do dia 15/01/2008

3.6.2.4. Gráficos Diários de Pressões Parciais de Vapor de Água

De seguida apresentam-se os gráficos de pressões parciais de vapor exterior e interior à igreja, para diferentes dias da semana.

A observação da Figura 3.33 revela que a pressão de vapor é máxima por volta das 19 horas, o que se explica pelo facto de haver missa a essa hora, uma vez que se trata de um Sábado. Com efeito, durante os períodos de missa há uma grande produção de vapor de água, que se vai acumulando no interior da igreja até ser extraído para o exterior.

Na Figura 3.34, que corresponde a um Domingo, também se verificam alturas de maior pressão parcial de vapor. Por volta das 10 horas este parâmetro começa a aumentar, atingindo o seu máximo perto das 11 horas, vindo depois a diminuir. Perto das 12 horas, dá-se novamente o aumento deste parâmetro, ficando acumulado o vapor de água no interior. Ao chegar às 18 horas, a pressão de vapor volta a diminuir e pouco depois aumenta novamente. Tal como no gráfico da Figura 3.33, também na Figura 3.34 estas alturas de maior pressão parcial de vapor interna correspondem aos períodos de missa. Por sua vez, as suas diminuições no gráfico devem-se a alturas de ventilação da igreja, levando à extracção do vapor de água acumulado no seu interior.

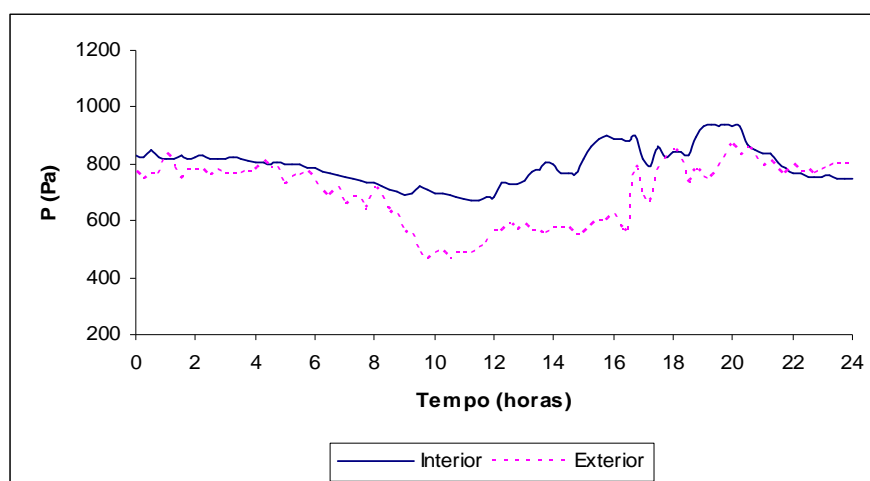


Figura 3.33 – Pressões parciais de vapor de água do dia 10/11/2007

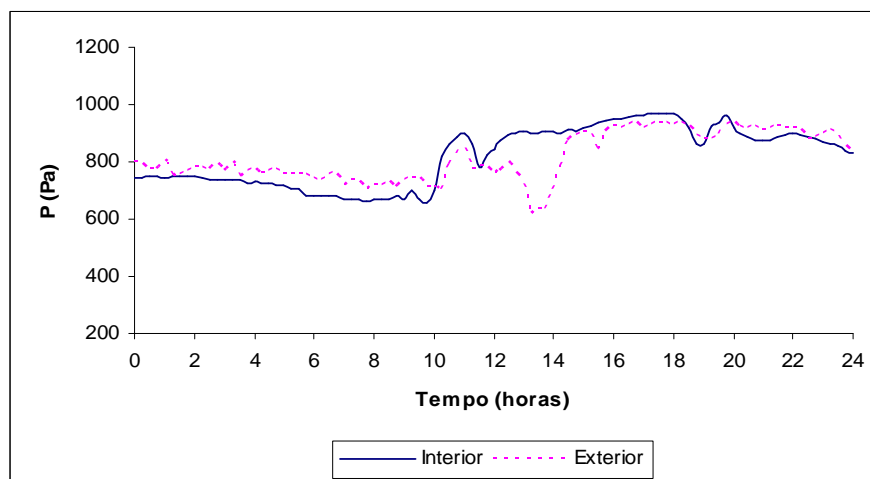


Figura 3.34 – Pressões parciais de vapor de água do dia 11/11/2007

As Figuras 3.35 e 3.36 mostram as variações das pressões de vapor ocorridas em diferentes dias da semana, e como tal, a altura de maior produção de vapor de água é por volta das 18h (hora de missa). As alturas do dia em que se verificam oscilações nos valores da pressão de vapor exterior e a pressão de vapor interior se mantém constante, ou pouco se altera, revelam uma má ventilação da igreja.

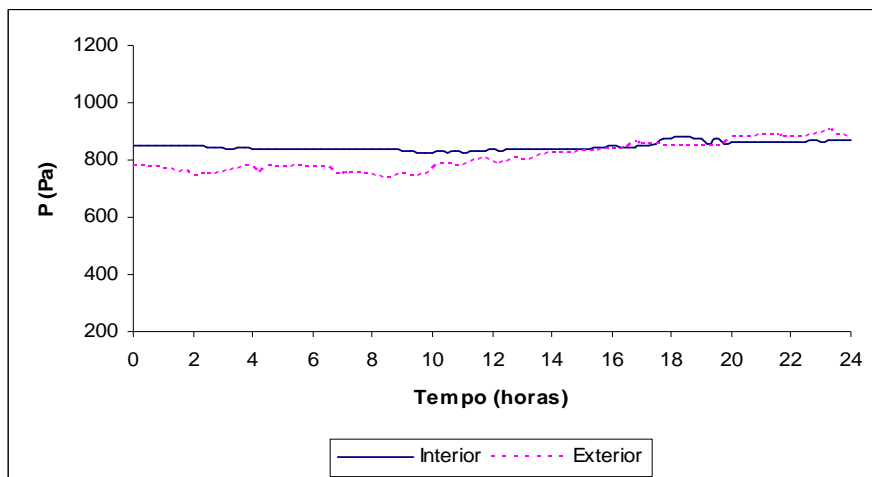


Figura 3.35 – Pressões parciais de vapor de água do dia 20/12/2008

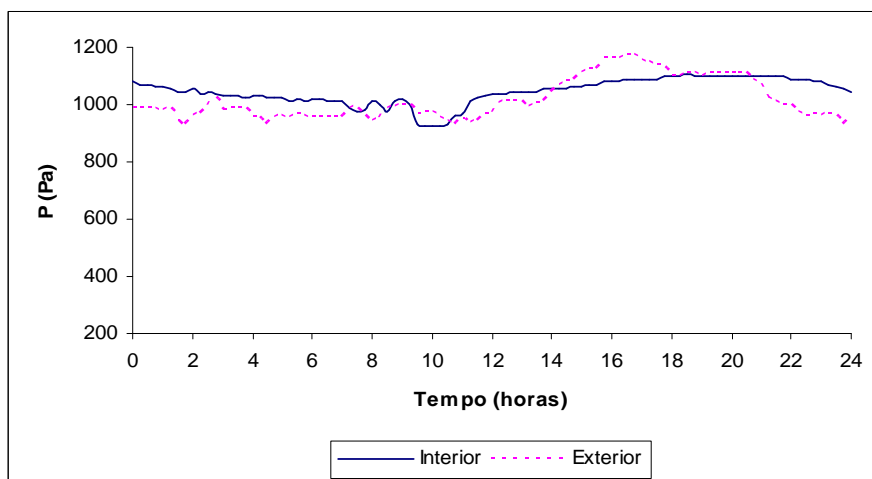


Figura 3.36 – Pressões parciais de vapor de água do dia 22/01/2008

3.7. CONCLUSÕES

O estudo realizado na Igreja de Santo Ildefonso, sobre o comportamento termo-higrométrico no seu interior, permitiu concluir que:

- A Igreja apresenta boa estabilidade térmica, revelando temperaturas estáveis, que variam lentamente em função da elevada inércia térmica da construção;
- A grande espessura das paredes em granito é responsável pela elevada inércia térmica, que causa o desfasamento entre as temperaturas interiores e exteriores;
- A humidade relativa no seu interior é elevada, sobretudo nos dias em que o Inverno é mais rigoroso, chegando por vezes a atingir níveis próximos da saturação, podendo provocar condensações;
- Quando a Igreja permanece mais tempo aberta, como por exemplo em dias de limpeza, a humidade relativa interior segue muito próxima a humidade relativa exterior;

- Por outro lado, encontrando-se a Igreja menos tempo aberta ou mesmo fechada, a humidade relativa interna é armazenada, e mesmo quando a humidade relativa no exterior diminui, a humidade interior mantém-se;
- A pressão parcial de vapor no interior é máxima nos períodos de missa, devido à grande produção de vapor de água nestas horas;
- As taxas de renovação do ar são reduzidas, o que leva à acumulação do vapor de água no interior, aumentando a humidade do ar na Igreja e tornando mais propícia a ocorrência de condensações;
- Os caudais de ar de renovação durante a noite são desprezáveis, pois a Igreja encontra-se totalmente fechada;
- As manifestações da humidade no interior da Igreja apresentam-se essencialmente sob a forma de manchas escuras nas paredes e condensações na cobertura;
- Os elevados valores de humidade no interior da Igreja são extremamente indesejáveis para a conservação do espólio artístico.

4

CONCLUSÕES

4.1. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muito embora este trabalho incida apenas sobre uma só igreja, procurou-se com este estudo experimental identificar e caracterizar o comportamento higrotérmico das construções mais antigas com o mesmo tipo de características.

Em síntese, a análise efectuada à Igreja da Santo Ildefonso permitiu concluir que esta é uma igreja com boa estabilidade térmica, o que se deve à elevada inércia térmica das suas espessas paredes em granito, é muito húmida, apresentando elevados valores de humidade relativa e não tem ventilação suficiente para realizar a extracção do vapor de água produzido no seu interior. Esta igreja apresenta ainda sinais de humidade no seu interior tais como condensações.

Perante um comportamento destes, e visto que a ventilação da Igreja não é suficiente para fazer diminuir a humidade relativa no seu interior, poder-se-ia propor uma ventilação mais cuidada, ou seja, permitir a renovação do ar nos períodos mais quentes do dia e nos horários de missa, para assim favorecer as condições de evaporação do vapor de água no interior. Ainda no sentido de diminuir a humidade relativa no interior, sugere-se também o aquecimento da Igreja, que poderá ser efectuado através da instalação de equipamentos adequados. Outra medida a ser tomada seria a inspecção dos telhados, para verificar se não existem telhas partidas que não estejam a assegurar a estanquidade à água, devido aos sinais de humidade encontrados na cobertura.

4.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS DA INVESTIGAÇÃO NESTE DOMÍNIO

Com este trabalho pretendeu-se dar um contributo para o estudo do comportamento higrotérmico em igrejas, no entanto, existe ainda um vasto campo de investigação neste domínio.

De seguida referem-se alguns aspectos que se consideraram importantes para futuros desenvolvimentos neste domínio:

- Incluir uma análise experimental, com aparelhos que permitam medições interiores e exteriores da temperatura e da humidade relativa superficiais das paredes, para avaliar os processos de humidificação e secagem consoante a orientação das mesmas, bem como, a presença ou não, de humidade ascensional;
- Analisar a influência de sais higroscópicos na variação da humidade relativa no interior;
- Procurar estender o tipo de análise desenvolvida neste trabalho para outras igrejas ou outras edificações históricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] FREITAS, V., *Transferência de humidade em paredes de edifícios – Análise do fenómeno de interface*. Tese de doutoramento, FEUP, Porto, 1992.
- [2] FREITAS, V., *Humidade e Patologias. Últimos desenvolvimentos. 6^{as} Jornadas de Construções Civas*, pp. 31-48, FEUP, Porto, 26 de Novembro de 1998.
- [3] FREITAS, V.; PINTO, P., *Permeabilidade ao vapor de materiais de construção – Condensações Internas. Nota de Informação Técnica – NIT_002*, LFC/FEUP, Porto, 1998.
- [4] FERREIRA, T., *Sobre a utilização do sistema de isolamento térmico pelo interior em edifícios residenciais em Portugal – análise do desempenho higrotérmico*. Tese de mestrado, FEUP, Porto, Abril de 2006.
- [5] HENRIQUES, F., *Acção da Humidade em Paredes. Formas de manifestação, critérios de quantificação e análise de soluções de reparação*. LNEC, Lisboa, 1993.
- [6] HENRIQUES, F., *Formas de manifestação da humidade em paredes. 6^{as} Jornadas de Construções Civas*, pp. 49-64, FEUP, Porto, 1998.
- [7] MELO, A.; MALDONADO, E.; SOUSA, H.; LOURENÇO, P., *Estudo articulado das anomalias do edifício da Igreja – Mosteiro de S. João de Tarouca*.
- [8] PINTO, P., *Caracterização de barreiras pára-vapor e sua aplicação*. Tese de mestrado, FEUP, Porto, Abril de 2002.
- [9] TORRES, M. I. M.; FREITAS, V., *Tratamento da humidade ascensional em construções históricas*.
- [10] HENRIQUES, F., *Fenómenos de higroscopicidade devidos à presença de sais solúveis*. In “1^o Encontro Nacional Sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios”, FEUP, Porto, Março de 2003.
- [11] http://pt.wikipedia.org/wiki/Igreja_de_Santo_Ildefonso, acedido em 27 de Março de 2008.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- CALEJO, R., *A incidência do factor humidade na patologia de edifícios. 6^{as} Jornadas de Construções Civas*, pp. 143-158, FEUP, Porto, 1998
- COBAÇA, S., *Humidade ascensional em paredes de edifícios antigos – Processos de reabilitação e prevenção*. Construlink, Novembro de 2002.
- FERREIRA, A., *Causas e classificações de patologias em paredes de alvenaria de pedra*. Construlink, Julho de 2003.
- FREITAS, V., *Comportamento à humidade da envolvente dos edifícios. 2^{as} Jornadas de Física e Tecnologia dos Edifícios*, FEUP, Porto, Dezembro de 1986.
- FREITAS, V., *Desenvolvimentos da investigação na FEUP no domínio do comportamento higrotérmico dos edifícios*.
- FREITAS, V.; BARREIRA, E.; GONÇALVES, P., *Patologias associadas a condensações*
- FREITAS, V.; GONÇALVES, P., *Humidade na construção – Humidade ascensional*. FEUP, Porto, Outubro de 2003.
- FREITAS, V.; PINTO, P., *Humidade na construção – Humidade de condensação*. FEUP, Porto, Outubro de 2003.
- FREITAS, V.; PINTO, P., *Permeabilidade ao vapor de materiais de construção. 6^{as} Jornadas de Construções Civas*, pp. 117-124, FEUP, Porto, 1998.
- FREITAS, V.; TORRES, M. I. M.; ASCENSÃO, A.; GONÇALVES, P., *Tratamento da humidade ascensional na Igreja de Vilar de Frades*. Estudos / Património, nº3, pp. 54-62, 2002.
- FREITAS, V.; TORRES, M.I.M., *Wall base ventilation for rising damp control in historical buildings: research and practice*. Ottawa, 2005.
- HENRIQUES, F., *Humidade em paredes*. Colecção Edifícios. LNEC, 1994.
- HENRIQUES, F.; RATO, V., *Avaliação do comportamento de argamassas face a fenómenos de higroscopicidade*. LNEC, 2003.
- LANZINHA, J.; FREITAS, V., *Propriedades higrotérmicas de materiais de construção – Um catálogo. 6^{as} Jornadas de Construções Civas*, pp. 125-142, FEUP, Porto, 26 de Novembro de 1998.
- LUSO, E.; LOURENÇO, P.; ALMEIDA, M., *Centro histórico de Bragança: Caracterização do edificado, aspectos arquitectónicos e anomalias*.
- LUSO, E.; LOURENÇO, P.; ALMEIDA, M., *Tratamento de paredes de alvenaria antiga com problemas de humidade ascensional*. LNEC, 2003.
- MAGALHÃES, A.; MATIAS, L.; VILHENA, A.; VEIGA, M.; SANTOS, C., *Non-destructive testing for the assessment of moisture defects on ancient walls. Some case studies*. Comunicação apresentada à “8^a Conferência Internacional Non-destructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage”, Itália, Maio de 2005.
- PIEDADE, A., *Humidade em edifícios – Uma perspectiva exigencial. 6^{as} Jornadas de Construções Civas*, pp. 11-30, FEUP, Porto, 1998.

- PINHO, F.; BAIÃO, M.; LÚCIO, V., *Técnicas de consolidação de paredes de edifícios antigos*.
- RAMOS, N., *Modelação da variação da humidade relativa no interior dos edifícios*. Tese de mestrado, FEUP, Porto, Novembro de 2000.
- SOUSA, M., *Patologia da construção – Elaboração de um catálogo*. Tese de mestrado, FEUP, Porto, Setembro de 2004.
- TORRES, M. I. M.; FREITAS, V., *Humidades Ascensionais*. 6^{as} Jornadas de Construções Civas, pp. 83-99, FEUP, Porto, 1998.
- TORRES, M. I. M.; FREITAS, V., *Rising damp in Historical Buildings*.
- VEIGA, M., *Comportamento de rebocos para edifícios antigos: exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos*. Seminário “Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos”, LNEC, Lisboa, 14-15 de Fevereiro de 2005.