



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE EDIFÍCIOS
Núcleo de Revestimentos e Isolamentos

Proc. 0803/14/15139

ESTUDO DE AVALIAÇÃO DO ESTADO HIGROTÉRMICO DE UMA PAREDE DE ALVENARIA DE PEDRA UTILIZANDO SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS MINIATURA E UM HUMIDÍMETRO

Projecto FCT n.º POCTI/ECM/46323/2002

Lisboa • Abril de 2010

I&D EDIFÍCIOS

RELATÓRIO 138/2010 – DED/NRI

ESTUDO DE AVALIAÇÃO DO ESTADO HIGROTÉRMICO DE UMA PAREDE DE ALVENARIA DE PEDRA UTILIZANDO SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS MINIATURA E UM HUMIDÍMETRO

(PROJECTO FCT n.º POCTI/ECM/46323/2002)

RESUMO

No âmbito do projecto de investigação designado “Desenvolvimento de metodologias para a avaliação dos efeitos da humidade em paredes antigas” (Projecto FCT n.º POCTI/ECM/46323/2002) foram desenvolvidos diversos estudos para determinação das potencialidades de diferentes métodos de ensaio e de metodologias de intervenção para avaliação da presença, distribuição e efeitos da humidade em paredes antigas de alvenaria irregular de pedra.

O estudo que agora se apresenta refere-se aos ensaios desenvolvidos em laboratório sobre um modelo construído à escala real (3,5 m x 2,7 m x 0,50 m) de uma parede de alvenaria irregular de pedra assente com argamassa de cal.

Este modelo de parede foi instrumentado com dois tipos de sondas que, de diferentes modos, visam detectar o estado higrométrico em diversos pontos do seu interior. Os dispositivos utilizados foram: sondas miniatura que permitem a medição da temperatura e da humidade relativa no interior da parede; e sondas associadas a um humidímetro que visam determinar a variação do teor de água na argamassa constituinte da alvenaria em estudo, a partir da medição da variação da resistência eléctrica entre eléctrodos inseridos no interior da parede durante a respectiva construção.

O presente relatório descreve a monitorização efectuada com ambos os tipos de sondas aplicadas na parede de ensaio, durante um período de cerca de dezanove meses iniciado durante a respectiva fase de construção. No decorrer do período de ensaios a parede foi submetida a diversos processos de secagem e de humedificação de modo a avaliar-se a eficácia dos métodos utilizados.

Apresentam-se, ainda, os ensaios complementares realizados para melhor interpretação dos resultados obtidos com os dispositivos que foram utilizados na instrumentação da parede, nomeadamente ensaios para determinação da higroscopicidade dos materiais constituintes da parede.

ASSESSMENT OF THE HYGROTHERMIC CONDITION OF A MASONRY WALL USING MINIATURE THERMOHYGROMETRIC PROBES AND A HUMIDIMETER

SCOPE

As part of the research project "Development of methodologies to assess moisture effects in ancient walls" (FCT Project No. POCTI/ECM/46323/2002) several studies have been developed to determine the potential of different testing methods and intervention methodologies to assess the presence, distribution and effects of moisture in ancient masonry walls.

The present study refers to laboratory tests performed on a full scale model (3.5 m x 2.7 m x 0.50 m) representing a masonry wall of irregular stone and lime mortar. Two different types of devices to detect the humidification state at various points within the wall have been used.

This report describes the monitoring realized and results obtained during a nineteen months period after the model's construction. Finally, the report also includes the results of some complementary tests performed with the aim to achieve a better interpretation of the values obtained with the devices used in the instrumentation of the model.

ETUDE D'EVALUATION DE L'ETAT HYGROTHERMIQUE D'UN MUR EN MAÇONNERIE DE PIERRE AVEC DES SONDES THERMOHYGROMETRIQUES MINIATURE ET UN HUMIDIMETRE

RESUME

Dans le cadre du projet de recherche intitulé «Développement de méthodologies pour évaluer les effets de l'humidité dans les murs anciens" (Projet n.° POCTI/ECM/46323/2002 FCT), divers études ont été développés pour identifier le potentiel des différents méthodes d'essai et les méthodologies d'intervention orientées pour l'évaluation de la présence, la distribution et les effets de l'humidité dans les murs anciens en maçonnerie.

Le présent étude se réfère à des essais effectués en laboratoire sur un modèle construit à l'échelle réel (3,5 m x 2,7 m x 0,50 m) d'un mur en maçonnerie irrégulier de pierre et mortier de chaux. Deux types différents de dispositifs ont été utilisés avec l'objectif de détecter l'état d'humidification à divers endroits du mur.

Ce rapport décrit les mesures réalisées au cours d'une période de dix-neuf mois après la construction du modèle. Finalement, on présente aussi les résultats de quelques essais complémentaires réalisés pour une meilleure interprétation des valeurs obtenues avec les dispositifs utilisés dans l'instrumentation du modèle.

ESTUDO DE AVALIAÇÃO DO ESTADO HIGROTÉRMICO DE UMA PAREDE DE ALVENARIA
DE PEDRA UTILIZANDO SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS MINIATURA E UM HUMIDÍMETRO

(PROJECTO FCT n.º POCTI/ECM/46323/2002)

ÍNDICE DO TEXTO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. ESTUDO REALIZADO	2
2.1. Considerações iniciais	2
2.2. Parede de ensaio	2
2.3. Fases de desenvolvimento do estudo	3
2.4. Instrumentação	4
3. RESULTADOS OBTIDOS	8
3.1. Considerações gerais	8
3.2. Fase de secagem da água de construção	9
3.3. Fase de molhagem da parede	13
3.4. Fase de secagem natural	17
4. ENSAIOS COMPLEMENTARES	21
5. CONCLUSÕES	24
6. BIBLIOGRAFIA	27
ANEXO I – Características das sondas termohigrométricas miniatura	I.1

ESTUDO DE AVALIAÇÃO DO ESTADO HIGROTÉRMICO DE UMA PAREDE DE ALVENARIA DE PEDRA UTILIZANDO SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS MINIATURA E UM HUMIDÍMETRO

(PROJECTO FCT n.º POCTI/ECM/46323/2002)

ÍNDICE DE QUADROS

	Pág.
Quadro 1 – Humidade higroscópica dos provetes de argamassa e de pedra para diferentes humidades relativas	22

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Parede de alvenaria de pedra irregular: face revestida e face não-revestida.....	2
Figura 2 – Câmara higrotérmica utilizada nas fases de molhagem e de aquecimento artificial da parede	4
Figura 3 – Câmara higrotérmica durante a fase de aquecimento forçado da parede	4
Figura 4 – Aspecto geral da parede em estudo e localização das sondas utilizadas	5
Figura 5 – Humidímetro e sondas.....	5
Figura 6 – Parâmetros caracterizadores da capacidade de impermeabilização de uma argamassa	6
Figura 7 – Sondas do humidímetro embebidas na argamassa da parede em estudo.....	7
Figura 8 – Sonda miniatura de medição da temperatura e da humidade relativa.....	7
Figura 9 – Sondas miniatura aplicadas na parede em estudo: representação esquemática e aspecto da aplicação	8
Figura 10 – Evolução do sinal das sondas do humidímetro colocadas a 50 mm e a 250 mm da superfície da parede	9
Figura 11 – Evolução da temperatura e da humidade relativa registada pelas sondas miniatura durante a fase de secagem da água de construção: pedra e argamassa de assentamento.....	11
Figura 12 – Imagem termográfica da face não-revestida durante o aquecimento artificial da face oposta	12
Figura 13 – Evolução da temperatura e da humidade relativa registada na nave de ensaios durante a fase de secagem da água de construção	13
Figura 14 – Aspecto da face não-revestida da parede em estudo após o período de molhagem por aspersão da face oposta.....	13
Figura 15 – Evolução da tensão eléctrica nas sondas do humidímetro: sondas colocadas a 50 mm e a 250 mm da superfície da parede	14
Figura 16 – Evolução da tensão eléctrica nas sondas do humidímetro: sondas colocadas a 0,20 m (a) e a 0,60 m da base da parede.....	14
Figura 17 – Evolução da temperatura e da humidade relativa registada pelas sondas miniatura durante a fase de molhagem: pedra e argamassa de assentamento	15
Figura 18 – Pormenor da face não-revestida da parede em estudo após molhagem da face oposta.....	16

Figura 19 – Evolução da temperatura e da humidade relativa registada na nave de ensaios durante a fase de molhagem	17
Figura 20 – Evolução da tensão eléctrica nas sondas do humidímetro durante a fase de secagem final: sondas colocadas a 50 mm e a 250 mm da superfície da parede.....	18
Figura 21 – Evolução da tensão eléctrica nas sondas do humidímetro durante a fase de secagem final: sondas colocadas a 0,20 m e a 0,60 m da base da parede	18
Figura 22 – Evolução da temperatura e da humidade relativa registada pelas sondas miniatura durante a fase de secagem: pedra e argamassa de assentamento	19
Figura 23 – Evolução da temperatura e da humidade relativa registada na nave de ensaios durante a fase de secagem	20
Figura 24 – Câmara climática utilizada para o ensaio higroscópico. Aspecto dos provetes ensaiados	21
Figura 25 – Curvas de equilíbrio higroscópico da argamassa	22
Figura 26 – Curvas de equilíbrio higroscópico da pedra.....	23

ESTUDO DE AVALIAÇÃO DO ESTADO HIGROTÉRMICO DE UMA PAREDE DE ALVENARIA DE PEDRA UTILIZANDO SONDAS TERMOHIGROMÉTRICAS MINIATURA E UM HUMIDÍMETRO

(PROJECTO FCT n.º POCTI/ECM/46323/2002)

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do projecto de investigação designado “Desenvolvimento de metodologias para a avaliação dos efeitos da humidade em paredes antigas” (Projecto FCT n.º POCTI/ECM/46323/2002) [1] foram desenvolvidos diversos estudos para determinação das potencialidades de diferentes métodos de ensaio e de metodologias de intervenção para avaliação da presença, distribuição e efeitos da humidade em paredes antigas de alvenaria irregular de pedra.

Nos estudos realizados foram utilizados diferentes métodos de ensaio, quer em laboratório quer *in situ*, com ênfase nos métodos não-destrutivos e em especial na utilização de métodos termográficos de infravermelhos para a detecção de humidade (vd. 2).

O estudo que agora se apresenta refere-se aos ensaios desenvolvidos em laboratório sobre um modelo construído à escala real (3,5 m x 2,7 m x 0,50 m) de uma parede de alvenaria irregular de pedra assente com argamassa de cal.

Este modelo de parede foi instrumentado com dois tipos de dispositivos que, de diferentes modos, visam detectar o estado higrométrico em diversos pontos do interior do modelo. Os dispositivos utilizados são constituídos por:

- sondas miniatura que permitem a medição da temperatura e da humidade relativa de um espaço (de ar) confinado no interior da parede;
- sondas associadas a um humidímetro ¹ que visam determinar a variação do teor de água na argamassa constituinte da alvenaria em estudo, a partir da medição da variação da resistência eléctrica entre eléctrodos inseridos no interior da parede durante a respectiva construção.

O presente relatório descreve a monitorização efectuada com as sondas acima referidas, aplicadas na parede de ensaio, durante um período de cerca de dezanove meses, iniciado durante a respectiva fase de construção. No decorrer do período de ensaios a parede foi submetida a diversos processos de secagem e de humidificação de modo a avaliar-se a eficácia dos métodos utilizados.

¹ - O protótipo do humidímetro utilizado foi projectado e construído no Centro de Instrumentação Científica do LNEC. A sua concepção e modo de funcionamento são detalhadamente apresentados no relatório n.º 56/95-GEET do LNEC [4]. A aplicação prática do ensaio a revestimentos de paredes foi efectuada no âmbito de uma dissertação de mestrado [5].

Apresentam-se, ainda, os ensaios complementares realizados para melhor interpretação dos resultados obtidos com os dispositivos que foram utilizados na instrumentação da parede, nomeadamente ensaios para determinação da higroscopicidade dos materiais constituintes da parede (vd. 4).

2. ESTUDO REALIZADO

2.1. Considerações iniciais

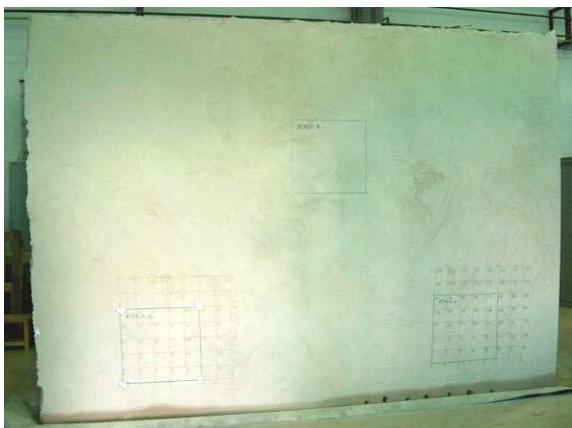
Tal como referido anteriormente, o presente estudo enquadrou-se no âmbito de um projecto de investigação mais vasto [1] e pretendeu focar, de uma forma mais específica e controlada, a verificação do efeito da humidade em paredes antigas, nomeadamente, tempos de humedecimento e de secagem, utilizando para tal métodos de ensaio não-destrutivos. Estes métodos visaram ainda permitir verificar a distribuição da humidade no interior da parede.

Nos pontos seguinte são descritos o modelo executado, o faseamento do estudo e os equipamentos utilizados.

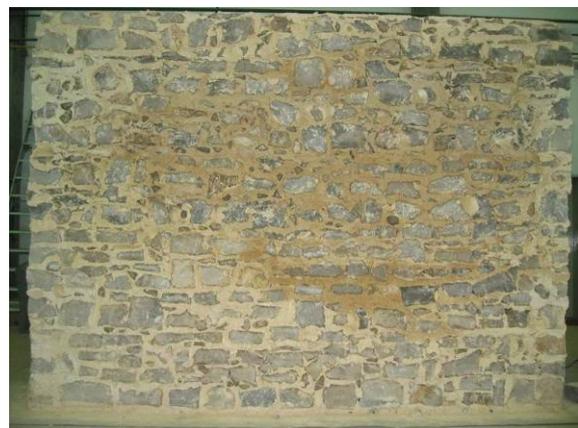
2.2. Parede de ensaio

Para a realização deste estudo procedeu-se à construção de um modelo de uma parede de alvenaria irregular de pedra calcária (semi-rijo de Leiria) e de argamassa de cal aérea e areia siliciosa (traço 1:3). O modelo, à escala real (Figura 1), tinha dimensões faciais de 3,50 m × 2,70 m e 0,50 m de espessura.

Uma das faces da parede foi revestida com uma argamassa semelhante à utilizada para o assentamento da pedra (Figura 1a), tendo sido deixada a outra face sem revestimento (Figura 1b). Desta forma foi possível observar o desempenho diferenciado dos elementos constituintes da parede (pedra e argamassa de assentamento) bem como a influência do revestimento.



a)



b)

Figura 1 – Parede de alvenaria de pedra irregular: face revestida (a) e face não-revestida (b)

O revestimento foi aplicado em duas camadas, com traços semelhantes, não tendo sido apertado após o início de presa, e apresentando uma espessura final média de cerca de 40 mm.

2.3. Fases de desenvolvimento do estudo

O estudo realizado envolveu a realização de diversas acções com as quais se pretendeu alterar, de forma mais ou menos significativa, o estado higrotérmico da parede de modo a avaliar a resposta e a sensibilidade dos diversos equipamentos utilizados. Estas acções podem ser sintetizadas nos seguintes pontos:

- *construção e instrumentação da parede* (2005-12-05 a 2005-12-17) – durante esta fase, para além da execução física da parede, foram incorporadas na argamassa de assentamento várias sondas do humidímetro, distribuídas na parede a diferentes profundidades (50 mm e 250 mm) e a diferentes alturas (vd. 2.4, Figura 4);
- *secagem natural durante um período inicial de 4 meses* (2005-12-17 a 2006-03-16) – durante este período a parede esteve sujeita apenas ao ambiente interior da nave de ensaios onde se encontrava, desenvolvendo-se o seu processo de secagem natural. Durante este período deu-se início à medição e ao registo dos sinais das sondas do humidímetro (2006-01-24), à instalação das sondas miniatura de medição da temperatura e da humidade relativa no interior da pedra e da argamassa de assentamento (a uma profundidade de 50 mm) e, ainda, à instalação de uma sonda de medição da temperatura e da humidade relativa do ar ambiente junto do modelo em ensaio (2006-03-15);
- *aquecimento artificial de uma das faces da parede* (2006-03-16 a 2006-03-24): o aquecimento artificial da parede de ensaio, por um período de 8 dias consecutivos, teve como objectivo acelerar a respectiva secagem, através da incidência de um fluxo de calor na sua face revestida, utilizando para o efeito uma câmara climática (vd. 2.4).
- *secagem natural da parede* (2006-03-24 a 2006-10-30): durante este período a parede esteve apenas exposta às condições ambientes da nave de ensaio, registando-se uma secagem natural;
- *molhagem da parede* (2006-10-30 a 2006-11-02): foi realizada a molhagem da parede através de aspersão de água sobre a face revestida (vd. 2.4);
- *secagem natural da parede* (2006-11-02 a 2007-10-14): durante este período de cerca de 11 meses procedeu-se ao registo das condições higrotérmicas no interior da parede enquanto se processava a secagem e estabilização dos teores de água interiores, tendo sido dado por concluído o registo a 2007-10-14.

Tal como mencionado anteriormente, o aquecimento artificial e a molhagem por aspersão da parede em estudo foram realizados com uma câmara higrotérmica (Figura 2) colocada em contacto directo com o paramento

revestido (Figura 3). O aquecimento artificial da parede foi realizado durante aproximadamente uma semana com o intuito de acelerar o processo de secagem da água de construção. Durante esse período, a temperatura interior da câmara foi mantida a cerca de 35 °C, sendo o ar aquecido sujeito a uma recirculação forçada.

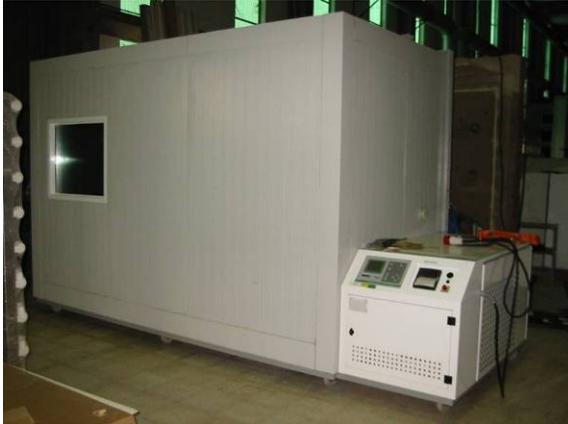


Figura 2 – Câmara higrotérmica utilizada nas fases de molhagem e de aquecimento artificial da parede



Figura 3 – Câmara higrotérmica durante a fase de aquecimento forçado da parede

2.4. Instrumentação

a) Considerações iniciais

De modo a avaliar a presença e a distribuição de humidade no interior da parede em estudo foram utilizados dois tipos de dispositivos:

- *humidímetro e respectivas sondas*: foi instalado um humidímetro com catorze sondas embebidas na argamassa de assentamento da parede que permitiram avaliar o estado de humidificação dessa argamassa.
- *sondas termohigrométricas miniatura*: foi colocado um conjunto de dez sondas, ligadas a um sistema de aquisição automática de dados, que permitiram medir a temperatura e a humidade relativa no interior de pequenos furos praticados nos elementos constituintes da parede (pedra e argamassa de assentamento);

Na Figura 4 apresenta-se a localização, na parede, das dez sondas miniatura inseridas em furos praticados na pedra (*Sp1 a Sp4*) e na argamassa de assentamento (*Sa1 a Sa6*), e das catorze sondas do humidímetro (H1 a H14). É possível observar ainda as cotas a que as diferentes sondas estavam localizadas (0,20 m, 0,60 m e 1,15 m da base da parede), e a localização da sonda de medição da temperatura e da humidade relativa da nave de ensaios (*Samb*), que se encontrava suspensa a cerca de 30 mm da face não-revestida da parede.

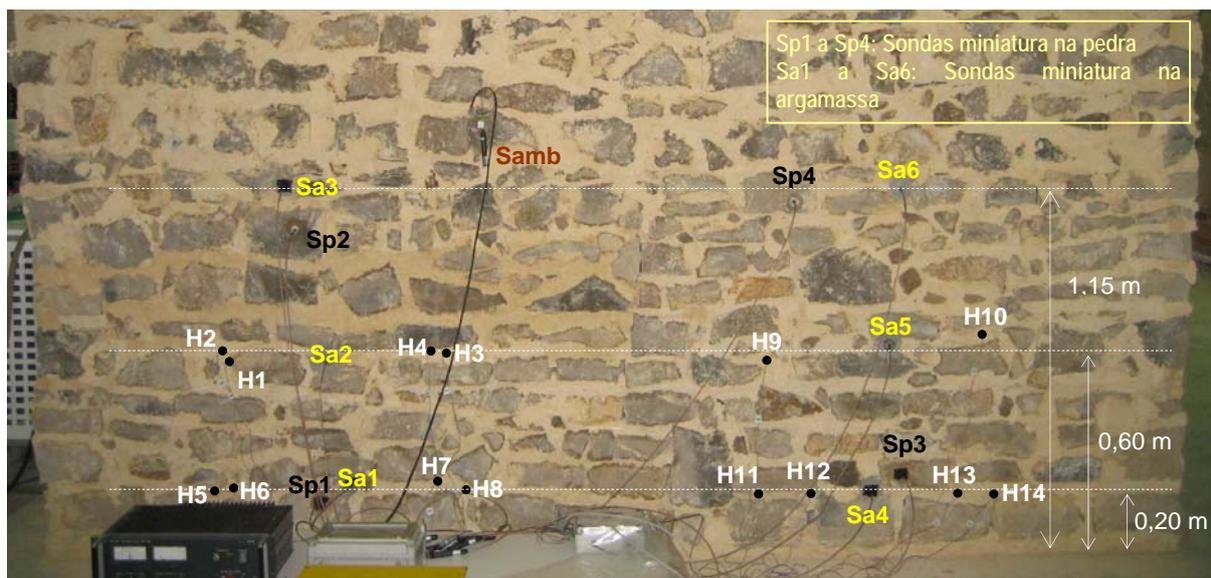


Figura 4 – Aspecto geral da parede em estudo e localização das sondas utilizadas

b) Humidímetro

O humidímetro e as respectivas sondas (Figura 5) permitem avaliar o estado de humedecimento e de secagem de argamassas, com base no método resistivo. Assim, as leituras fornecidas pelo humidímetro traduzem os valores da resistência eléctrica existente entre os dois eléctrodos de cada sonda, a qual depende do teor de água da argamassa da respectiva zona de influência. Por conveniência de leitura os sinais do humidímetro são lidos e registados em tensão eléctrica (mV).



Figura 5 – Humidímetro e sondas

Em termos gerais, numa argamassa húmida (nomeadamente, logo após o seu fabrico e aplicação ou após a sua molhagem) a tensão inicial medida pelo humidímetro é igual 0 mV, o que traduz o facto de a água líquida existente nos poros da argamassa reduzir, significativamente, a correspondente resistência eléctrica. À medida que se processa a secagem a resistência eléctrica da argamassa aumenta, e, naturalmente, o mesmo ocorre com o valor da tensão eléctrica registado pelo humidímetro. No limite da capacidade de leitura do equipamento

utilizado a tensão máxima atinge valores próximos dos 1000 mV, o que corresponde a uma argamassa “seca”⁽²⁾. Os registos efectuados pelo humidímetro permitem uma análise qualitativa dos resultados.

No caso de revestimentos exteriores de paredes, com base numa representação gráfica dos resultados, é possível ainda a determinação de diversos parâmetros caracterizadores da *capacidade de impermeabilização* daquelas argamassas [6] que, de uma forma quantitativa, permitem avaliar o comportamento dos revestimentos à água. Estes parâmetros, representados na Figura 6, são os seguintes:

- *atraso na molhagem* [h] – período de tempo entre o instante em que se inicia a molhagem de uma parede (“seca”) e o instante em que a água começa a ser detectada pelo humidímetro (tensão eléctrica < 95% da tensão inicial). Convencionou-se que este é o instante em que a água atinge a zona das sondas;
- *tempo de secagem* [h] – período de tempo que vai desde o instante em que se inicia a queda da tensão eléctrica por efeito da molhagem e aquele em que ela estabiliza novamente num valor elevado (tensão eléctrica ≥ 95% da tensão inicial).
- *intensidade de molhagem* [mV x h] – é a integração da curva de variação da tensão eléctrica durante o tempo de secagem, dando uma medida da quantidade de água que permanece na argamassa junto à sonda durante aquele período.

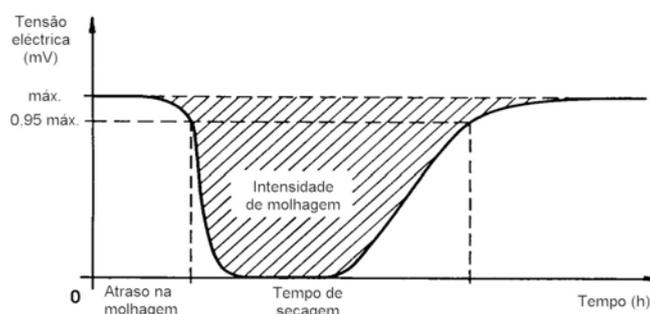


Figura 6 – Parâmetros caracterizadores da capacidade de impermeabilização de uma argamassa [5 e 6]

No presente estudo não se pretendeu avaliar a capacidade de impermeabilização das argamassas de revestimento ou de assentamento da parede, mas detectar a ocorrência de fenómenos de secagem e de humedificação no seu interior, após, quer a execução da parede quer a respectiva molhagem intencional (por capilaridade ou por aspersão). Para tal as sondas do humidímetro, tal como mencionado anteriormente, foram inseridas em diversos pontos da argamassa fresca de assentamento durante a construção da parede de ensaio.

As diversas sondas do humidímetro foram posicionadas e alinhadas a diferentes profundidades (50 mm e 250 mm) a partir da superfície da face não-revestida da parede, e dispostas horizontalmente às cotas de 0,20 m e de 0,60 m medidas a partir da base da parede (Figura 4). A medição dos valores correspondentes a cada uma

² - Por argamassa “seca” deverá admitir-se que o teor de água da argamassa corresponde ao domínio higroscópico, em equilíbrio com o ambiente envolvente.

das sondas utilizadas foi efectuada a intervalos de tempo definidos e registados através do aparelho de aquisição de dados (humidímetro).

Figura 7 – Sondas do humidímetro embebidas na argamassa da parede em estudo



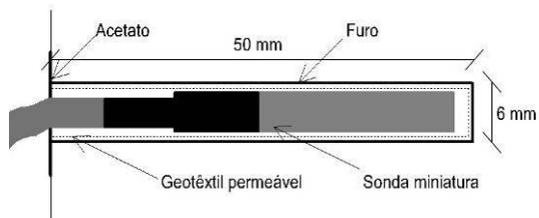
c) Sondas termohigrométricas miniatura

As sondas miniatura de medição de temperatura e de humidade relativa (Figura 8) foram instaladas em furos abertos no interior de pedras e da argamassa de assentamento que constituem a parede em estudo.

Figura 8 – Sonda miniatura de medição da temperatura e da humidade relativa



Cada sonda, cujas principais características se indicam no Anexo I, foi colocada num furo horizontal com um diâmetro de cerca de 6 mm e uma profundidade de 50 mm. As paredes do furo foram revestidas com um geotêxtil permeável ao ar e ao vapor de água de modo a proteger o sensor da sonda (Figura 9a). Após a introdução da sonda a respectiva abertura foi selada por colagem de um disco circular de folha de acetato sobre a superfície da parede (Figura 9b).



a)



b)

Figura 9 – Sondas miniatura aplicadas na parede em estudo: representação esquemática (a) e aspecto da aplicação (b)

Face ao reduzido volume de ar dos furos e à baixa capacidade térmica e higríca das sondas, pode admitir-se que os valores da temperatura (T) e da humidade relativa (HR) medidos no interior dos furos correspondem aos valores de equilíbrio do ar com as condições higrotérmicas existentes no material (argamassa ou pedra). Naturalmente que a partir do valor do teor de água de equilíbrio higroscópico num ambiente saturado ($\cong 100\%$ HR), as leituras da humidade relativa (HR) serão sempre iguais a cerca de 100%. Se a argamassa ou a pedra apresentarem teores de água mais elevados (quantidades de água significativas introduzidas na fase de construção ou por molhagem), as leituras registadas no interior dos furos manter-se-ão sempre naquele valor limite, independentemente da quantidade de água retida ou absorvida.

Os valores de T e de HR medidos nos elementos constituintes da parede (argamassa e pedra) e no ar ambiente foram registados a intervalos de 30 minutos com um sistema automático de aquisição de dados.

3. RESULTADOS OBTIDOS

3.1. Considerações gerais

Tal como apresentado em 2.3, o estudo teve uma duração de cerca de 19 meses, durante os quais foram medidas e registadas, de uma forma contínua, a temperatura e a humidade relativa no interior dos vários furos praticados nos elementos constituintes da parede de pedra irregular (Figura 4), e o sinal obtido a partir das sondas do humidímetro localizadas em diversos pontos da argamassa de assentamento.

Seguidamente apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos, com especial atenção às fases de secagem da água de construção, de molhagem e da posterior secagem natural da parede em estudo.

3.2. Fase de secagem da água de construção

a) Registos efectuados com o humidímetro

Tal como referido anteriormente, o humidímetro registou os valores medidos pelas várias sondas que haviam sido inseridas na argamassa de assentamento em diversos pontos da parede (Figura 4).

As sondas do humidímetro foram inseridas na argamassa de assentamento da parede de alvenaria à medida que se procedia à respectiva construção o que permitiu dispor de registos que traduziram a evolução da secagem da água introduzida desde a fase de construção. Assinala-se no entanto que, durante esta fase de secagem, houve um período de cerca de um mês (de Abril de 2006 a Maio de 2006) em que a leitura dos dados das sondas do humidímetro não foi efectuada devido a problemas técnicos. Na Figura 10 apresenta-se a evolução da tensão eléctrica correspondente a essas sondas, tendo sido criadas representações separadas para as sondas colocadas em diferentes profundidades (50 mm e 250 mm) da espessura da parede em estudo.

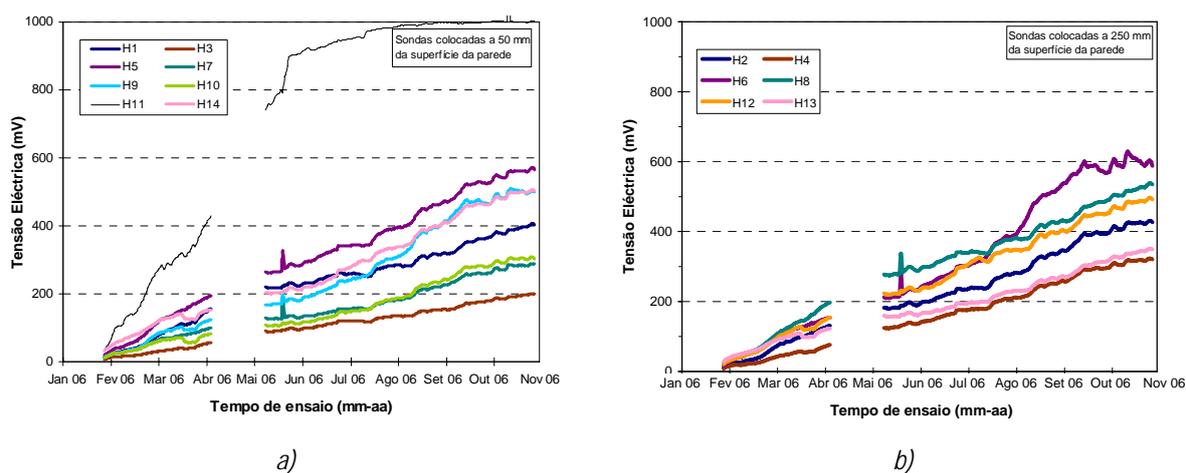


Figura 10 – Evolução do sinal das sondas do humidímetro colocadas a 50 mm (a) e a 250 mm (b) da superfície da parede

Os valores medidos pelas sondas do humidímetro permitem constatar um aumento gradual dos valores da tensão eléctrica, aproximadamente constante ao longo do período de secagem – 24 de Janeiro a 30 de Outubro de 2006 –, facto que indicia a ocorrência de uma secagem bastante lenta da argamassa. Este aumento é semelhante em quase todas as sondas do humidímetro, independentemente da cota e da profundidade em que estão localizadas. A única excepção detectada refere-se à sonda H11, localizada à cota de 0,20 m e à profundidade de 50 mm, que apresenta uma evolução da secagem muito mais rápida (Figura 10a), o que pode indicar a ocorrência, quer de uma secagem localizada diferenciada das restantes zonas monitorizadas quer de uma eventual anomalia nas medições efectuadas com essa sonda. De salientar que na parede em estudo, após este período inicial de secagem (cerca de 9 meses), as sondas não apresentavam ainda valores estabilizados (com excepção da referida sonda H11).

O aquecimento com ventilação forçada a que o paramento revestido da parede foi submetido³, entre 16 e 24 de Março de 2006, com o objectivo de acelerar a velocidade de secagem (de certo modo traduzindo o efeito da insolação e da acção do vento que ocorrem nas situações reais), não se traduziu em alterações da tendência de aumento da tensão eléctrica registada com o humidímetro, o que indicou a manutenção da velocidade de secagem da parede.

Em termos gerais, no final do período de secagem da água de construção os valores da tensão eléctrica medidos, sensivelmente, a meio da espessura da parede foram mais elevados – 260 a 600 mV – do que os valores observados nas sondas colocadas mais próximo da superfície (50 mm) não-revestida da parede – 200 a 580 mV – (Figura 10). Esta diferença, embora pequena, indicia, contrariamente ao expectável, que o teor de humidade era mais elevado junto da face da parede. Assinale-se ainda que, em qualquer das localizações, existe uma diferença sensível entre os valores extremos dos registos disponíveis apontando no sentido de uma secagem muito heterogénea da argamassa de assentamento.

b) Registos efectuados com as sondas termohigrométricas miniatura

O registo com as sondas termohigrométricas miniatura da fase de secagem da água de construção da parede em estudo decorreu durante cerca de 7 meses, com início a 16 de Março de 2006 (cerca de 3 meses após a conclusão da construção da parede) e finalização a 30 de Outubro do mesmo ano (vd. 2.3). Refira-se que o início do registo dos dados das sondas miniatura coincidiu com o início do período de oito dias de aquecimento forçado da parede com a imposição de um fluxo de calor na face rebocada.

Na Figura 11 apresenta-se a evolução da temperatura e da humidade relativa, respectivamente, no interior da pedra e da argamassa de assentamento constituintes da parede. A análise destes gráficos permite observar valores iniciais de humidade relativa muito elevados, superiores a 98%; estes valores indiciam ainda a presença de uma quantidade significativa de água de construção 3 meses após a conclusão da construção da parede.

Verifica-se em seguida a existência de uma tendência de redução linear dos valores de humidade relativa em ambos os materiais ao longo de todo o período de secagem, indiciando uma velocidade de secagem quase constante. Os valores atingem algum grau de estabilização perto do final do período considerado de secagem (sensivelmente a partir de Setembro de 2006). Comparando a variação da humidade relativa no interior dos furos realizados na argamassa e na pedra verifica-se que a redução registada foi maior no caso da argamassa (Figura 11).

³ - Na face oposta à da instalação das sondas do humidímetro e termohigrométricas (vd. 2.3).

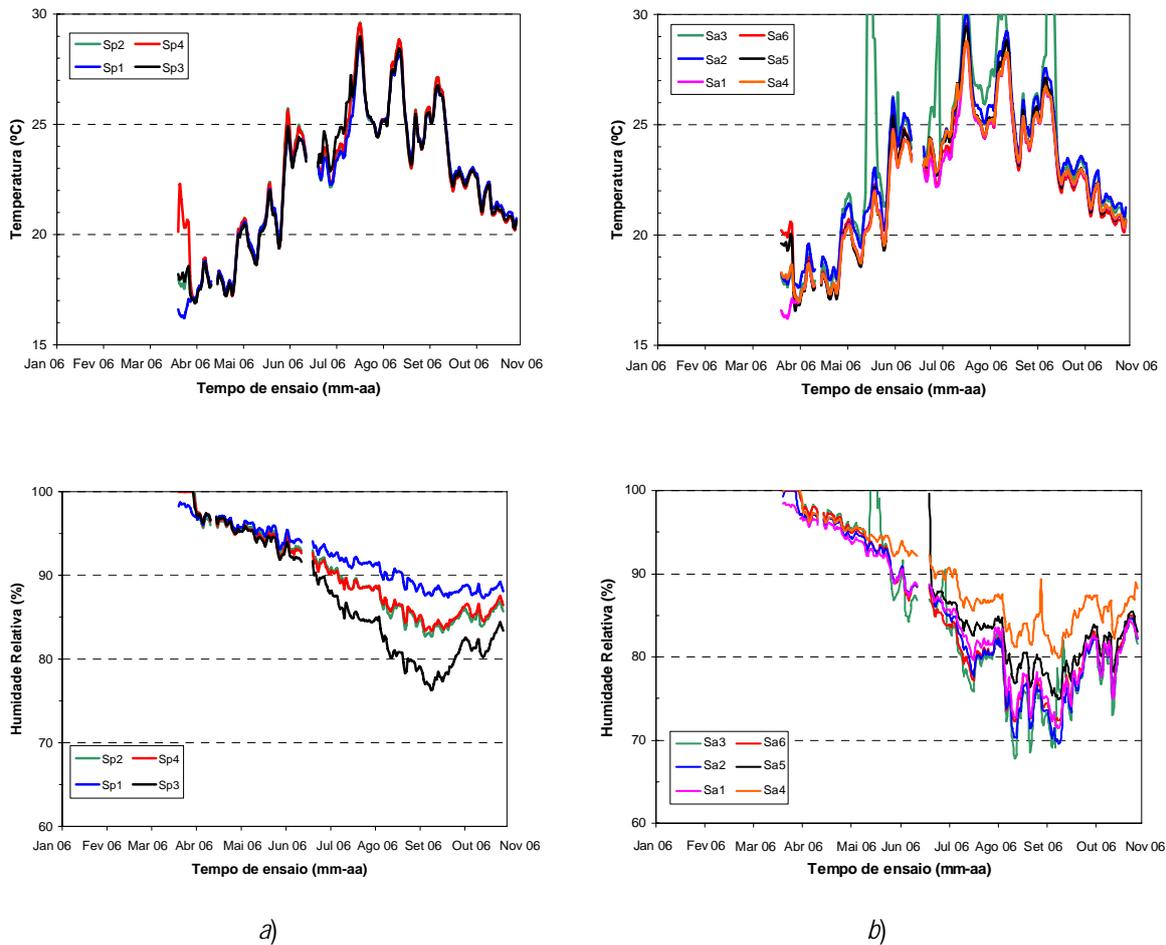


Figura 11 – Evolução da temperatura e da humidade relativa registada pelas sondas miniatura durante a fase de secagem da água de construção: pedra (a) e argamassa de assentamento (b)

A diminuição da humidade relativa nos furos, registada pelas sondas, coincide com a tendência demonstrada pelos valores medidos nas sondas do humidímetro embebidas na argamassa (Figura 10), o que traduz em ambos os casos uma redução do teor de água. Apesar de se utilizar um princípio de medição diferente em cada um dos métodos, não deixa de ser interessante, e de merecer um estudo futuro mais específico, o facto de se atingir uma aparente estabilização dos valores da humidade relativa (a partir de Setembro) e não do sinal eléctrico das sondas do humidímetro⁴.

Em termos gerais, no final do período de secagem, os valores da humidade relativa medidos nos furos realizados na pedra foram mais elevados (83-88%) do que os obtidos na argamassa (80-85%). Saliencia-se

⁴ - Merece referência o facto de a humidade relativa indicada pelas sondas se situar entre 80 a 90% (Figura 11) e os valores da tensão eléctrica lidos pelo humidímetro estarem entre 200 e 600 mV (Figura 10), ambos revelando a existência de teores de humidade elevados.

também o facto dos valores da humidade estabilizarem mais rapidamente no caso da argamassa (Julho) do que na pedra (Setembro).

Relativamente aos dados referentes à temperatura é possível verificar que durante o período em que a parede foi sujeita ao aquecimento artificial (16 a 24 de Março de 2006), registou-se um aumento significativo da temperatura nos elementos constituintes da parede sem que isso tenha correspondido a variações na velocidade de redução dos valores da humidade relativa (Figura 11). Assinale-se que durante este período inicial de secagem forçada se observaram variações significativas nos valores obtidos entre diferentes pontos de medida, independentemente da localização das sonda ser na argamassa ou na pedra. Esta diferença justifica-se pelo facto do fluxo de calor imposto pela ventilação forçada no interior da câmara higratérmica não permitir um aquecimento uniforme de toda a parede, como facilmente se pode comprovar na imagem termográfica ⁵ da face não-aquecida (Figura 12).

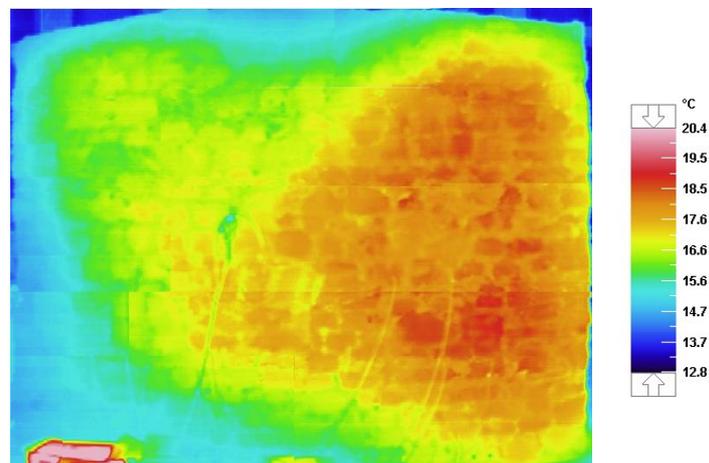


Figura 12 – Imagem termográfica da face não-revestida durante o aquecimento artificial da face oposta

No entanto, constata-se que durante toda a a fase de secagem (16 de Março a 30 de Outubro) posterior ao aquecimento artificial a evolução que os valores individuais da temperatura que as diferentes sondas registaram foi muito semelhante, independentemente do material em que estavam inseridas. Esta evolução é, ainda, semelhante à registada na temperatura ambiente da nave de ensaios (T_{amb}) onde a parede se encontrava localizada (Figura 13).

⁵ - A imagem termográfica apresenta a distribuição das temperaturas superficiais da parede.

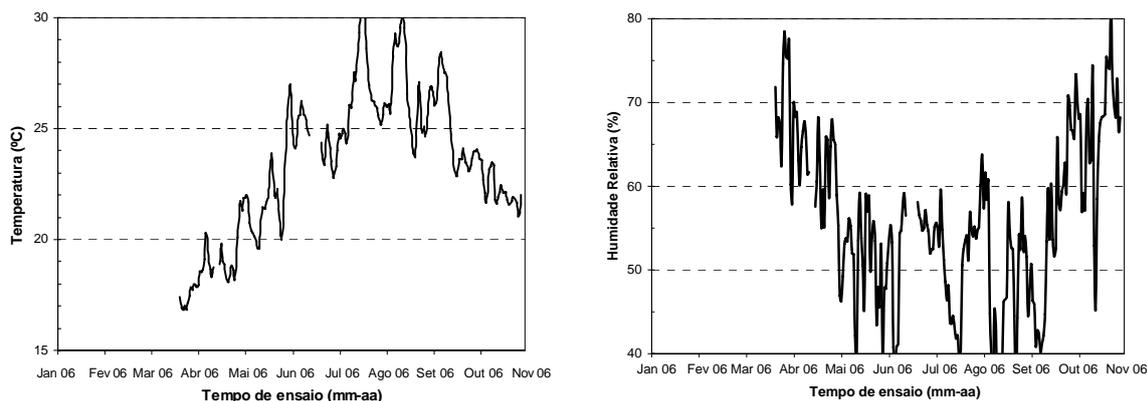


Figura 13 – Evolução da temperatura (T_{amb}) e da humidade relativa (HR_{amb}) registada na nave de ensaios durante a fase de secagem da água de construção

3.3. Fase de molhagem da parede

Durante um período de três dias (de 30 de Outubro a 2 de Novembro de 2006) a face revestida da parede em estudo foi molhada por aspersão mediante a utilização de um dispositivo adequado existente na câmara higrotérmica. Findo esse período a água tinha humedecido a parede em toda a sua espessura, sendo visível uma grande área molhada na face de tardoiz não-revestida que abrangia a zona onde estavam colocadas, quer as sondas do humidímetro, quer as sondas termohigrométricas (Figura 14).



Figura 14 – Aspecto da face não-revestida da parede em estudo após o período de molhagem por aspersão da face oposta

Nas alíneas seguintes são apresentados os aspectos que se salientam do estudo, neste período, relativamente aos dados obtidos por cada um dos métodos.

a) Registos efectuados com o humidímetro

Durante o período de molhagem as sondas do humidímetro registaram uma rápida diminuição da tensão eléctrica (Figura 15 e Figura 16) e, ao fim de cerca de 2,5 dias após o início da aspersão, todas as sondas mediam uma tensão eléctrica nula, o que indica que a argamassa estava humedecida nos pontos de medida.

Verifica-se, de um modo geral, que as sondas colocadas no meio da parede, a 250 mm de profundidade, e mais perto (0,20 m) da base da parede, são atingidas pela água mais rapidamente que as restantes, cerca de 1 dia após o início da aspersão (Figura 15b e Figura 16a). Por outro lado, as sondas colocadas mais perto da superfície oposta à câmara (50 mm) e a maior altura (0,60 m) são as últimas a saturar: apenas 2,5 dias depois do início da aspersão (Figura 15a e Figura 16b).

Registe-se uma excepção ao referido anteriormente, constituída pelos dados obtidos na sonda H14 que embora se encontre a pouca profundidade (0,05 m) no interior da parede apresenta uma variação da tensão eléctrica semelhante às das sondas que se encontram no meio da parede.

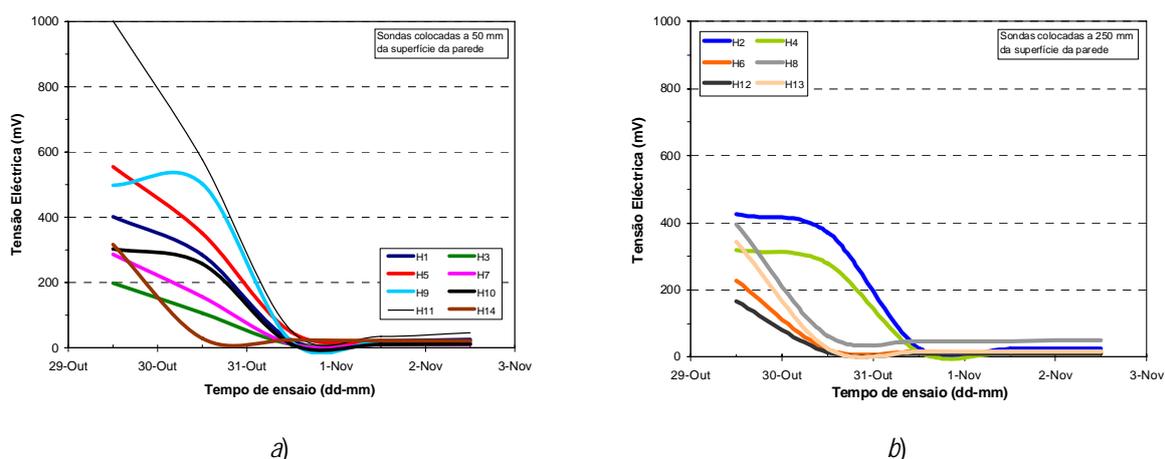


Figura 15 – Evolução da tensão eléctrica nas sondas do humidímetro: sondas colocadas a 50 mm (a) e a 250 mm (b) da superfície da parede

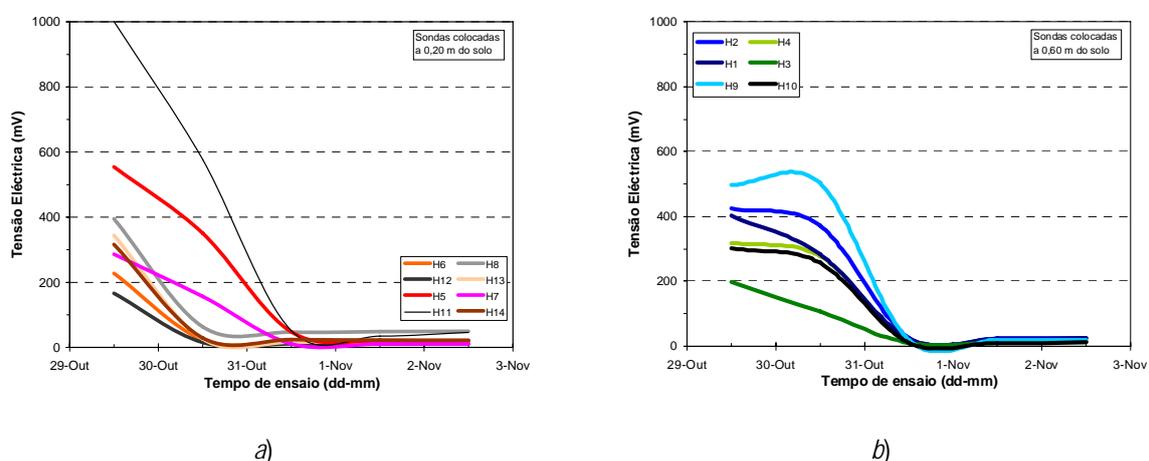


Figura 16 – Evolução da tensão eléctrica nas sondas do humidímetro: sondas colocadas a 0,20 m (a) e a 0,60 m (b) da base da parede

A observação dos dados recolhidos permite concluir que as paredes antigas semelhantes à estudada durante no presente ensaio apresentam baixa estanquidade e velocidades de molhagem muito rápidas, mesmo em situações em que o tosco se encontra revestido por argamassas simples de ligante aéreo.

b) Registos efectuados com as sondas termohigrométricas miniatura

Durante a fase de molhagem a variação dos valores da humidade relativa registados pelas diversas sondas termohigrométricas apresentou comportamentos diferentes consoante as sondas ⁶ se encontravam em furos realizados em pedras ou na argamassa de assentamento.

No caso das sondas colocadas em furos nas pedras (Sp1 a Sp4), a primeira sonda onde se registou uma variação significativa da humidade relativa foi a sonda Sp3 (Figura 17a), aproximadamente 35 horas após o início da molhagem. Algumas horas depois a sonda Sp4 registou também um aumento significativo do valor da humidade relativa. É relevante referir que estas sondas, embora instaladas a cotas diferentes na parede, se encontravam no mesmo alinhamento vertical (Figura 4).

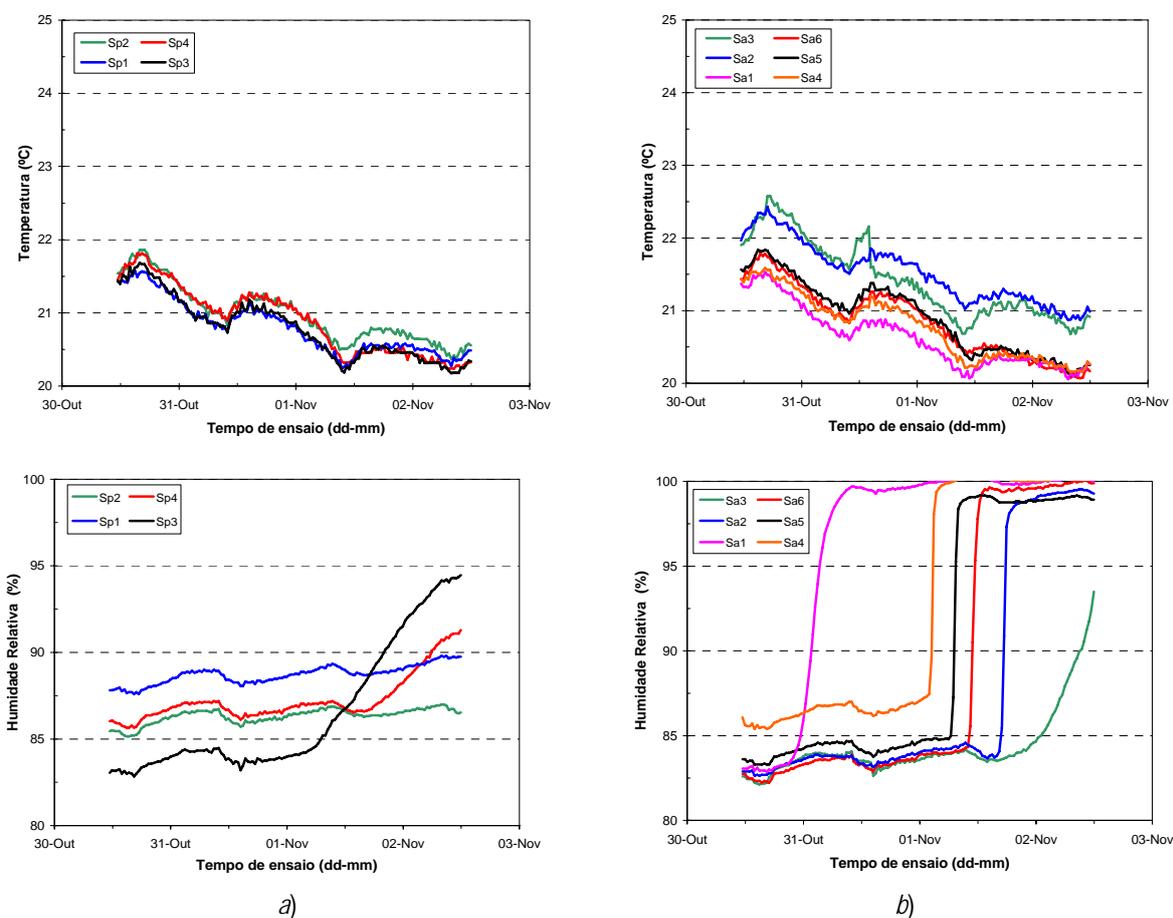


Figura 17 – Evolução da temperatura e da humidade relativa registada pelas sondas miniatura durante a fase de molhagem: pedra (a) e argamassa de assentamento (b)

A humidade relativa medida nas duas outras sondas colocadas em pedra (Sp1 e Sp2) manteve-se aproximadamente estável, não evidenciando uma variação significativa de humidade nos pontos de medida, contrariamente ao que se poderia esperar do humedecimento observado na face de tardo da parede (Figura 18).

⁶ - Relembre-se que, ao contrário das sondas do humidímetro, estas sondas se encontravam todas à mesma profundidade na parede: 50 mm.

Figura 18 – Pormenor da face não-revestida da parede em estudo após molhagem da face oposta



Os valores máximos da humidade relativa registados pelas sondas instaladas em furos nas pedras, no final do período de molhagem, variaram entre 86 e 94%.

Refira-se ainda que no caso das sondas instaladas nos furos das pedras a primeira sonda onde se registou um aumento da humidade relativa situava-se a uma cota mais alta na parede do que as restantes (Figura 4), ao contrário do que se passou com as sondas do humidímetro em que as primeiras sondas a registarem o efeito da molhagem foram as que se encontravam mais perto da base da parede (vd. 3.3a).

Na argamassa de assentamento a molhagem produziu alterações da humidade relativa nos furos onde se encontravam instaladas as sondas cerca de 15 horas após o início da aspersão de água sobre a face revestida (Figura 17b).

A primeira sonda a detectar a presença de humidade, Sa1, estava localizada na zona inferior da parede (Figura 4); as restantes sondas tiveram um comportamento semelhante tendo detectado a humidade algumas horas após a sonda Sa1, verificando-se que as sondas localizadas na zona inferior da parede foram as primeiras a registarem alterações.

A velocidade de molhagem detectada por estas sondas foi significativamente diferente da registada nas sondas instaladas nos furos em pedras. Na generalidade registou-se um aumento bastante rápido da humidade relativa (Figura 17b), atingindo um ambiente saturado com valores de 100% cerca de 22 h após o início da variação da humidade relativa e, conseqüentemente, da detecção da molhagem.

Todas as sondas indicavam valores de 100% de humidade relativa antes do fim do período de molhagem (2 de Novembro), com excepção da sonda Sa3, que se encontrava no limite da zona de molhagem visível (Figura 18), e que no fim deste período registava um valor de 94% ⁷.

Salienta-se ainda que, tal como seria de esperar, tendo em conta os resultados obtidos em provetes de argamassa e de pedra idênticas às constituintes da parede em estudo [2, 3], o processo de absorção de água foi mais rápido na argamassa do que na pedra.

⁷- Foi atingida uma humidade relativa igual a 100% nesta sonda poucas horas depois de acabar o período de molhagem da parede.

Relativamente à temperatura medida quer na pedra quer na argamassa (Figura 17) verifica-se, à semelhança do registado durante a fase de secagem, que a sua evolução varia em consonância com a temperatura do ar ambiente, T_{amb} (Figura 19).

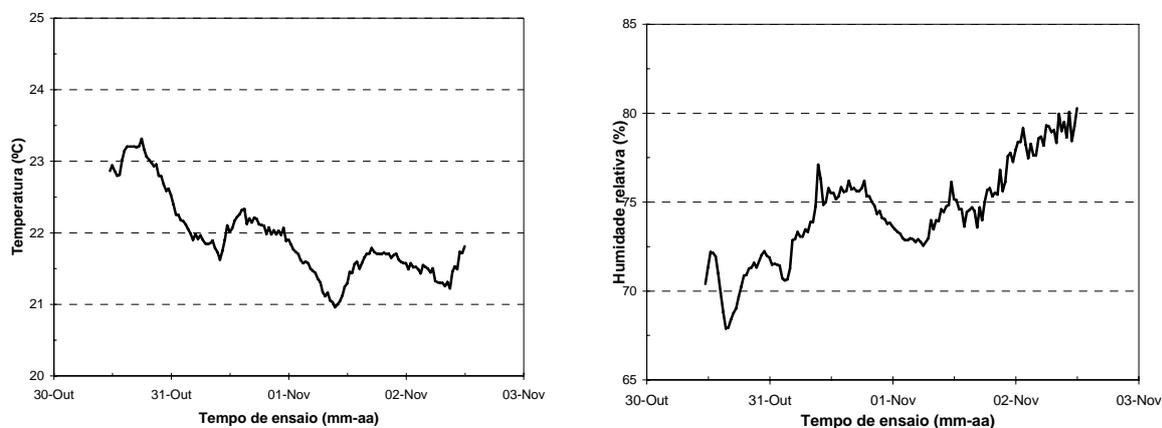


Figura 19 – Evolução da temperatura (T_{amb}) e da humidade relativa (HR_{amb}) registada na nave de ensaios durante a fase de molhagem

3.4. Fase de secagem natural

Após a fase de molhagem da parede procedeu-se, durante um período de cerca de nove meses, à secagem natural da parede, apenas exposta às condições ambientais da nave de ensaios em que se encontrava. Durante esta fase as condições termohigrométricas da parede, e da nave de ensaios, continuaram a ser monitorizadas usando a instrumentação já referida anteriormente.

Nas alíneas seguintes, à semelhança da abordagem efectuada para as fases anteriores, é apresentada uma análise dos resultados obtidos com cada tipo de sondas utilizadas.

a) Registos efectuados com o humidímetro

Durante esta fase as sondas do humidímetro registaram um aumento gradual da tensão eléctrica evidenciando a progressão da secagem da argamassa.

Verificou-se que os valores registados nas sondas instaladas no centro da parede (250 mm de profundidade) são ligeiramente superiores aos observados nas sondas instaladas à profundidade de 50 mm da superfície (Figura 20), numa tendência semelhante à já observada durante o período de secagem da água de construção.

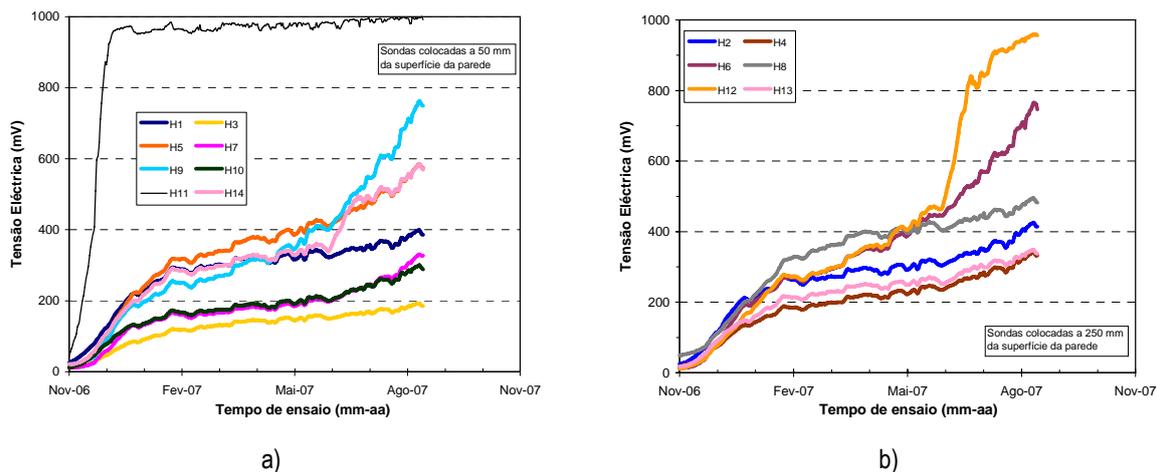


Figura 20 – Evolução da tensão eléctrica nas sondas do humidímetro durante a fase de secagem final: sondas colocadas a 50 mm (a) e a 250 mm (b) da superfície da parede

Relativamente às diferenças entre os valores registados por sondas a diferentes cotas, observa-se que as sondas instaladas a 0,20 m da base da parede apresentam uma tendência de aumento mais rápido do valor da tensão eléctrica (e portanto da secagem), do que a verificada nas sondas instaladas a 0,60 m (Figura 21). No final do período de secagem os valores de tensão eléctrica são, em geral, superiores na argamassa situada mais próximo da base da parede, podendo concluir-se que o correspondente teor de água é menos elevado.

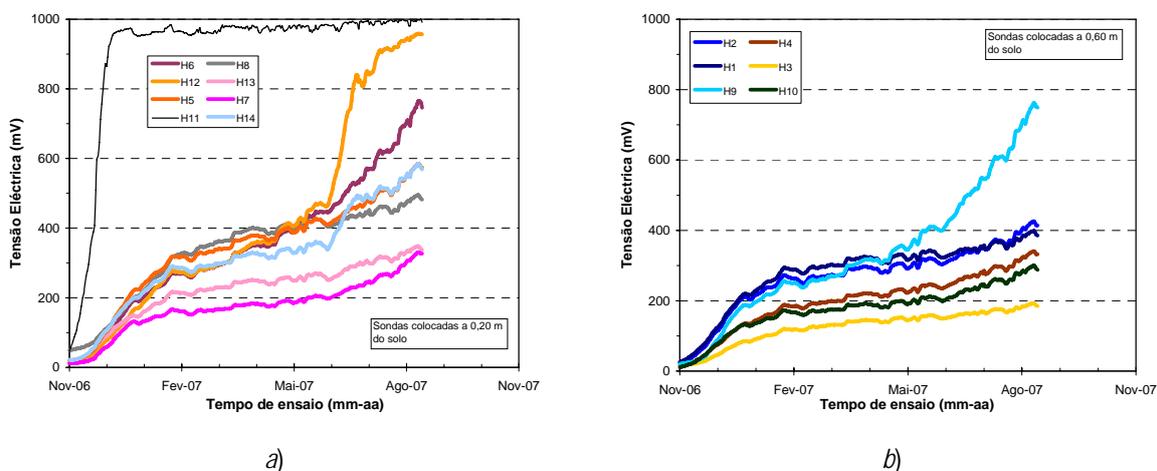


Figura 21 – Evolução da tensão eléctrica nas sondas do humidímetro durante a fase de secagem final: sondas colocadas a 0,20 m (a) e a 0,60 m (b) da base da parede

À semelhança do observado no anterior período de secagem (vd. 3.2), verifica-se que no período considerado os valores das tensões eléctricas medidas não chegam a estabilizar. Salienta-se que os valores finais observados foram semelhantes em ambos os períodos de secagem considerados (Figura 10).

b) Registos efectuados com as sondas termohigrométricas miniatura

Com o fim da molhagem e o início da fase de secagem registam-se valores de cerca de 100% de humidade relativa em todas as sondas (Figura 22), independentemente da respectiva localização, denotando uma

molhagem efectiva dos materiais constituintes da parede e a saturação do ar nos furos de instalação das sondas.

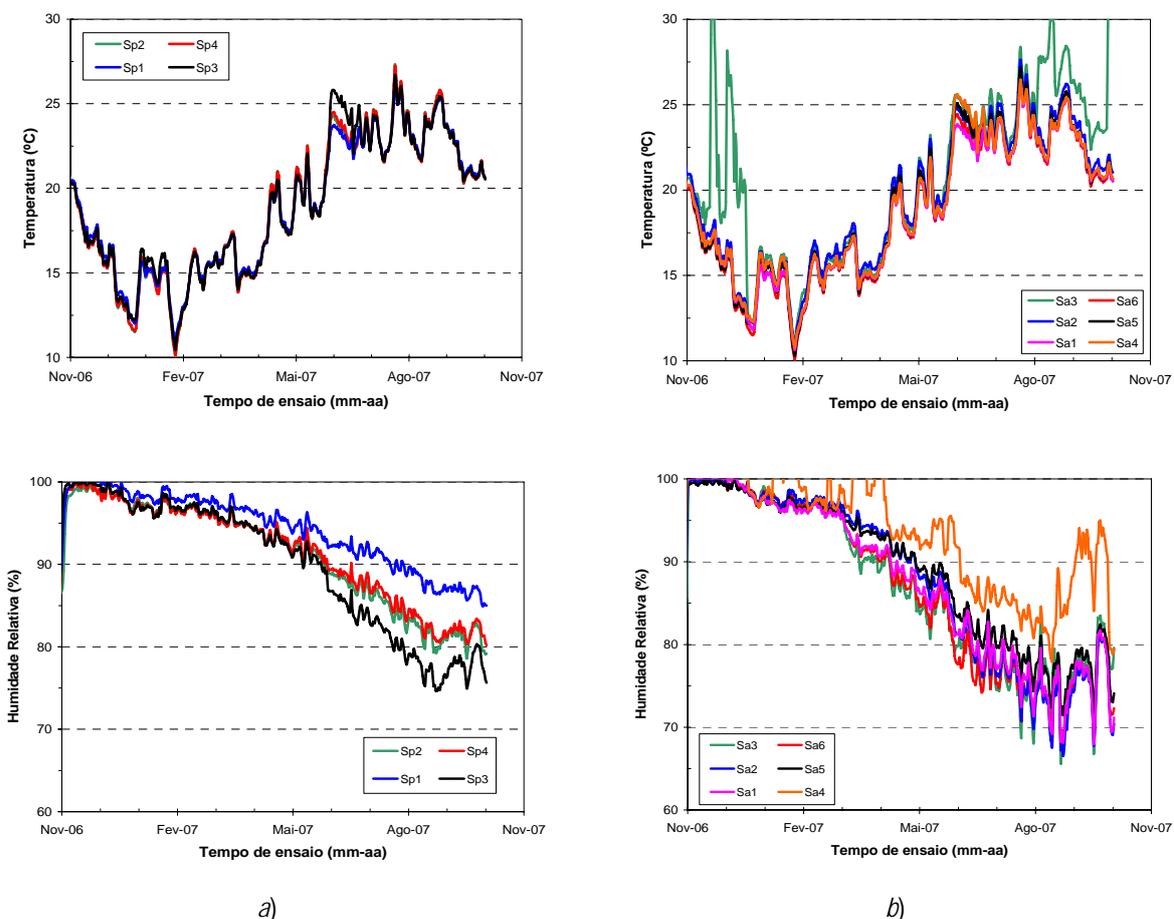


Figura 22 – Evolução da temperatura e da humidade relativa registada pelas sondas miniatura durante a fase de secagem: pedra (a) e argamassa de assentamento (b)

Com a paragem da aspersão de água na face oposta àquela onde se encontravam as sondas começa a processar-se a secagem com fluxos de humidade através de toda a espessura da parede no sentido das faces onde se processa a evaporação. Durante cerca de 1,5 meses as sondas continuaram a registar humidades relativas na ordem dos 100% devido, provavelmente, à existência de água no seu estado líquido.

Após esse período observa-se, em ambos os materiais, uma tendência praticamente linear de diminuição dos valores da humidade relativa registados pelas sondas, embora com taxas de variação diferentes relativamente a cada material, verificando-se, tal como na molhagem, uma taxa superior no caso da argamassa de constituição.

Verifica-se ainda a influência da humidade relativa do ambiente da nave ensaios (Figura 23) no aumento ou diminuição da taxa de variação da humidade relativa consoante se verificaram diminuições ou aumentos da humidade relativa do ar.

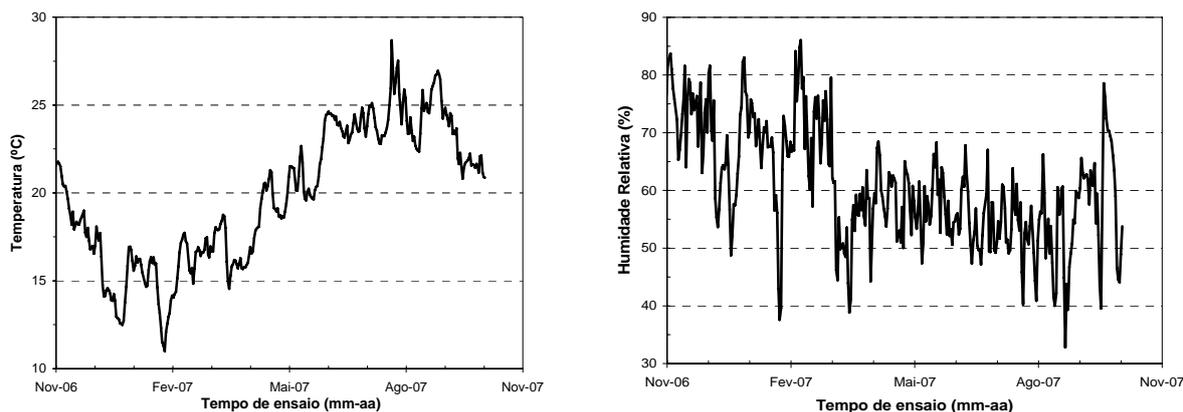


Figura 23 – Evolução da temperatura (T_{amb}) e da humidade relativa (HR_{amb}) registada na nave de ensaios durante a fase de secagem

Ao contrário do verificado nas sondas do humidímetro (Figura 21), verifica-se uma estabilização dos valores com variações derivadas das alterações de valor da humidade relativa do ar ambiente, indicando um estado de “secagem” com um teor de água em equilíbrio com o ambiente envolvente.

Relativamente as estas variações é interessante observar que as sondas instaladas na argamassa apresentam uma reacção mais rápida e mais perto dos valores de variação da HR ambiente, do que as sondas instaladas na pedra que revelam um maior atraso e um amortecimento daquelas variações.

Os valores da humidade relativa atingidos no final do período variaram, aproximadamente, entre 75% e 85% na pedra, e, entre 69% e 82% na argamassa de assentamento.

Os valores atingidos durante esta fase de secagem foram em média inferiores aos registados na primeira fase de secagem (Figura 11). Salienta-se no entanto que os valores da humidade relativa do ar ambiente no final da fase secagem de água de construção (Figura 13) foram superiores – 65% a 70% – aos observados nesta segunda fase de secagem – 45% a 65% – (Figura 23) dando origem às diferenças referidas.

Por último, tal como foi observado nas duas anteriores fases analisadas, a evolução das temperaturas medidas na pedra e na argamassa de assentamento reflectem o andamento da temperatura ambiente medida na nave de ensaios (Figura 23), sendo de registar que a temperatura do ar oscilou, neste período, entre os 10 °C (no final de Janeiro de 2007) e os 29 °C (em meados de Julho de 2007).

A influência das condições exteriores (T_{amb} e HR_{amb}) nos valores dos parâmetros correspondentes medidos pelas sondas miniaturas inseridas no interior da parede pode ser atribuída a duas causas: deficiências no isolamento dos furos face às condições exteriores, ou resposta dos elementos constituintes da parede às variações registadas nessas condições. Embora possa existir alguma falha no isolamento dos furos face ao ambiente exterior ⁸, é muito provável que a camada “superficial” da parede com cerca de 50 mm de espessura seja afectada pelas variações higrométricas e térmicas do ambiente envolvente.

⁸ - Facto que pode ser objecto de correcção através da adopção de uma solução melhorada de oclusão dos furos.

4. ENSAIOS COMPLEMENTARES

De modo permitir uma melhor interpretação do estado higrotérmico dos elementos constituintes da parede a partir dos dados obtidos pela instrumentação utilizada realizou-se um ensaio higroscópico sobre provetes de pedra e de argamassa usados na construção da parede.

A correlação entre os registos obtidos pelas sondas de temperatura e humidade relativa e os valores de teor de humidade de equilíbrio dos materiais em função da humidade relativa do ambiente a que se encontram expostos determinados no ensaio higroscópico poderá estabelecer eventuais parâmetros quantitativos que caracterizem o estado higrométrico da parede.

Para a realização do ensaio, os provetes foram inicialmente secos até massa constante em estufa ventilada a 40 °C. Posteriormente foram colocados numa câmara climática (Figura 24), e expostos a ambientes com temperaturas constantes e patamares de diferentes teores de humidade relativa que variaram gradualmente após a estabilização da massa dos provetes em cada patamar.



Figura 24 – Câmara climática utilizada para o ensaio higroscópico. Aspecto dos provetes ensaiados

A variação da humidade relativa foi realizada em ciclos sequenciais de aumento (ciclos de adsorção) e, posteriormente, de diminuição dos valores (ciclos de desadsorção) sem realização de nova secagem dos provetes; deste modo também foi possível analisar o comportamento histerético dos materiais nestas condições.

Nas alíneas seguintes são apresentados os resultados do ensaio higroscópico realizado e são tecidas algumas considerações, relativamente à eventual correlação entre os valores de humidade relativa registados pelas sondas termohigrométricas miniatura e os valores de humidade higroscópica de equilíbrio dos materiais constituintes da parede.

a) *Ensaio higroscópico*

O ensaio de determinação do teor de humidade higroscópica de equilíbrio dos materiais constituintes da parede (argamassa de cal e pedra) foi realizado com temperaturas de 30 °C, 20 °C e 10 °C e com os ciclos de humidade relativa que estão apresentados no Quadro 1.

Neste quadro são apresentados os teores de humidade de equilíbrio dos elementos constituintes da parede de alvenaria de pedra para cada um dos ambientes a que estiveram expostos.

Quadro 1 – Humidade higroscópica dos provetes de argamassa e de pedra para diferentes humidades relativas [%]

Proвете	Temperatura (°C)	Humidade Relativa									
		30%	50%	70%	90%	95%	90%	70%	50%	30%	
Argamassa	30	0,12	0,18	0,37	1,58	1,80	1,58	1,31	1,22	1,13	
Pedra		0,11	0,18	0,28	0,52	0,74	0,58	0,33	0,22	0,14	
Argamassa	20	1,14	1,20	1,28	1,53	1,79	1,61	1,32	1,23	1,14	
Pedra		0,15	0,22	0,32	0,60	0,87	0,69	0,37	0,26	0,16	
Argamassa	10	1,15	1,21	1,29	1,57	1,94	1,66	1,33	1,23	1,16	
Pedra		0,16	0,24	0,35	0,61	0,90	0,72	0,39	0,27	0,18	

No primeiro ciclo realizado (30 °C), a argamassa de cal, como material higroscópico, apresenta uma isotérmica onde se evidenciam dois declives distintos na fase de adsorção (Figura 25). No primeiro, correspondente a teores de humidade até cerca de 70%, a curva apresenta um declive muito reduzido. Nesta zona, um grande aumento da humidade relativa apenas tem como resultado o aumento ligeiro do teor de humidade na argamassa. Na segunda parte da curva, o declive é bastante superior, com a curva quase vertical, o que traduz que pequenas variações na humidade relativa do ambiente dão origem a grandes alterações da humidade higroscópica do material. Na fase de desadsorção verifica-se um fenómeno de histerese, registando-se valores do teor de humidade higroscópica bastante superiores aos verificados na fase de adsorção para os mesmos teores de humidade relativa do ar. Os declives da curva isotérmica de desadsorção são muito mais atenuados.

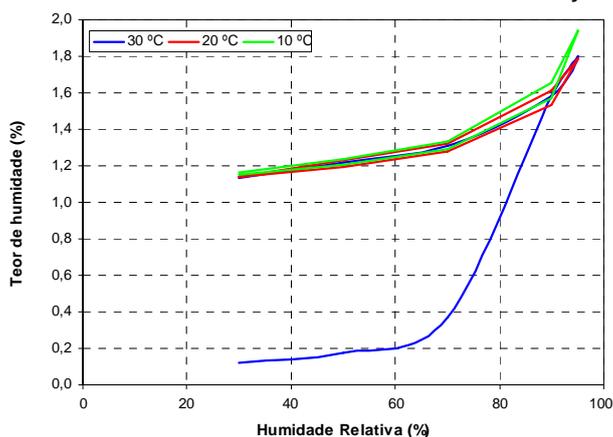


Figura 25 – Curvas de equilíbrio higroscópico da argamassa

Nos ciclos seguintes, com temperaturas sucessivas de 20 °C e de 10 °C e sem ter sido realizada a secagem prévia dos provetes, verificou-se que as curvas, quer de adsorção quer de desadsorção, apresentam declives reduzidos e semelhantes entre si tornando muito pouco perceptível a histerese, excepto nos troços das curvas com humidades relativas do ambiente superiores a 70%.

A pedra apresenta um comportamento similar ao da argamassa de cal, embora com teores de humidade higroscópica bastante menores e com evoluções das curvas de adsorção e de desadsorção muito menos acentuadas (Figura 26). Verifica-se que a pedra apresenta variações da humidade higroscópica semelhantes à argamassa de cal até humidades relativas de cerca de 70%, registando para condições de humidade relativa superiores adsorções bastante inferiores, observando-se para as condições de 95% de humidade relativa, valores da humidade higroscópica cerca três vezes inferiores aos da argamassa.

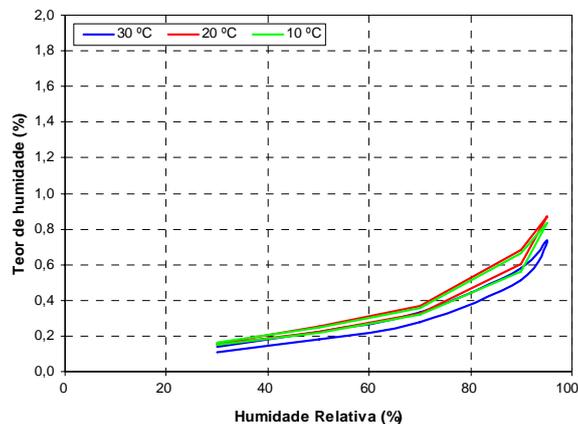


Figura 26 – Curvas de equilíbrio higroscópico da pedra

De uma forma geral, o ensaio realizado evidencia que a argamassa de cal tem uma adsorção higroscópica inicialmente lenta, mas bastante rápida a partir de 70% de humidade relativa. A desadsorção processa-se a uma taxa relativamente constante. As fases de adsorção e desadsorção da pedra decorrem de forma mais lenta que a da argamassa, como era de esperar.

b) Correlação entre os registos obtidos pelas sondas termohigrométricas e os valores de teor de humidade higroscópica dos materiais da parede

Uma das hipóteses formuladas para a utilização das sondas foi a de que o ar no interior dos furos realizados nos materiais onde se instalaram as sondas termohigrométricas estava em equilíbrio com as condições de temperatura e humidade do material envolvente.

As sondas termohigrométricas começaram a registar as condições no interior dos furos realizados quer na argamassa quer na pedra cerca de três meses após o início da secagem natural da água de construção (vd. 3.2.b). Nessa altura já não existiria água na forma líquida no interior dos materiais⁹ mas apenas água de ligação e água adsorvida, começando por se registarem valores de humidade relativa de cerca de 100% e estabilizando, no final daquele período de secagem, em humidades relativas da ordem dos 80% a 85% na pedra, e 83% a 88% na argamassa (Figura 11).

Tomando em consideração o ensaio higroscópico realizado, e os teores de humidade higroscópica de equilíbrio obtidos, poderia afirmar-se que o teor de humidade da argamassa variou, na fase referida, entre

⁹ - Este facto foi constatado durante a realização dos furos para instalação das sondas termohigrométricas miniatura.

aproximadamente 1,8% e 1,5% e que no caso da pedra a humidade variou entre 0,9% e 0,6% (Quadro 1). Estes valores são obtidos na curva descendente dos teores higroscópicos a 20 °C pois é necessário tomar em consideração o fenómeno histerético e a temperatura registada no interior da parede.

Na fase de molhagem rapidamente foram atingidos valores de 100% de humidade relativa nas sondas devido à humidificação rápida que o tipo de argamassa permite.

Na segunda fase de secagem natural verifica-se que durante cerca de mês e meio, tal como referido anteriormente, as sondas continuam a registar humidades relativas na ordem dos 100% devido à provável existência de água no estado líquido. Após esse período, e no final do período de secagem os valores detectados pelas sondas acaba por estabilizar em cerca 75% a 85% na pedra, e 70% a 80% na argamassa (Figura 22), valores similares ao que ocorreu na primeira fase de secagem, e portanto valores de humidade higroscópica semelhantes aos atrás referidos.

Em todo o caso, esta correlação apresenta diversas limitações devido ao tipo de ensaios que foi possível realizar, nomeadamente:

- o ensaio de higroscopicidade realizado apenas tomou em consideração a variação do teor de humidade dos materiais quando sujeitos a variações da humidade relativa do ar, ou seja, devido a fenómenos de adsorção e de desadsorção de vapor de água e nunca devido ao contacto de água directa no seu estado líquido;
- qualquer das fases de secagem iniciou-se com condições de humedecimento da argamassa com água no estado líquido e em alguns casos de verdadeira saturação;
- os fenómenos presentes durante a fase de humedecimento e de secagem da parede não foram apenas de difusão de vapor de água através da parede mas também gravíticos e de capilaridade de circulação de água em meios porosos.

Por último, refira-se que a secagem foi considerada finalizada quando as variações da humidade relativa registadas nas sondas termohigrométricas acompanhavam as variações da humidade relativa do ambiente, embora as sondas do humidímetro ainda registassem tensões eléctricas de cerca de 300 mV a 900 mV, nas sondas instaladas no meio da parede, e de 200 mV a 800 mV, nas sondas instaladas a 50 mm da superfície, bastante distantes dos 1000 mV, situação em que se considera a argamassa seca.

5. CONCLUSÕES

Os ensaios realizados permitiram constatar que as metodologias desenvolvidas e utilizadas no âmbito do presente projecto [1, 8] permitem de uma maneira clara a verificação do estado higrométrico dos materiais constituintes de paredes antigas.

A utilização do humidímetro permitiu de uma forma qualitativa verificar a humificação e a secagem gradual a que a argamassa esteve sujeita nas diferentes fases. A detecção da humidade realizada pelas sondas do

humidímetro refere-se à água que no estado líquido, quer por fenómenos de capilaridade quer por condensação da água adsorvida transportada por difusão de humidade no seio da argamassa, humidifica a argamassa na zona de influência das sondas. Por esse motivo verifica-se um atraso em relação à detecção de humidade realizada pelas sondas termohigrométricas miniatura. Estas medem a humidade relativa do ar existente nos furos onde estão instaladas as sondas, o qual se admite estar em equilíbrio com os teores de água dos materiais envolventes. No entanto, devido à difusão de humidade através da parede no estado de vapor não é necessário que humidade, na forma de água no estado líquido, entre em contacto com as sondas ou mesmo com os materiais envolventes.

Em qualquer dos casos verificou-se que os fenómenos de humidificação deste tipo de paredes é bastante rápido, tendo qualquer das sondas atingido valores de saturação ao fim de cerca de 2,5 dias.

Já a secagem é um fenómeno bastante mais lento, que decorre de uma forma quase linear, não se chegando a verificar uma estabilização completa dos valores devido à influência da humidade relativa do ambiente em que a parede se encontrava. É de referir ainda que, durante a secagem, não se verificou grande interferência da temperatura exterior ou do aumento da temperatura dos materiais (tal como foi possível observar durante a fase de aquecimento forçado da parede), sendo a humidade relativa do ambiente onde se encontrava a parede o factor de maior influência nas condições de secagem.

Como futuros desenvolvimentos o principal aspecto a implementar será o aprofundamento do estudo de correlação entre os valores de temperatura e humidade registados pelas sondas termohigrométricas miniatura e o teor de humidade real dos materiais onde se encontram instaladas, de modo a que a sua utilização permita ir mais além do que a análise qualitativa do estado de humidificação das paredes.

Desta forma deverá ser delineado um programa de ensaios que promova a determinação do teor de humidade dos materiais onde as sondas se encontram instaladas através de outros métodos, nomeadamente o método gravimétrico. Para tal, sugere-se a instalação de testemunhos de materiais iguais aos utilizados na construção da parede, em furos semelhantes aos realizados para a instalação das sondas e, em zonas da parede próximas das sondas, de modo a que possam ser retirados e realizadas pesagens que permitam determinar aquele teor de humidade.

Complementarmente, deve encarar-se a melhoria da solução de isolamento do ambiente interior dos furos do meio exterior de modo a que as medições efectuadas no seu interior traduzam, de forma directa, as alterações sofridas pelos materiais envolventes

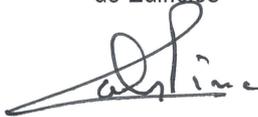
VISTOS

O Chefe do Núcleo de
Revestimentos e Isolamentos



Jorge Grandão Lopes

O Director do Departamento
de Edifícios



Carlos Alberto de Brito Pina

AUTORIA



Luís Manuel Cordeiro Matias

Fisco Tecnológico, Assistente de Investigação



Ana Cristian Magalhães

Engenheira Civil, Bolseira de Investigação



António Vilhena

Engenheira Civil, Assistente de Investigação



C. A. Pina dos Santos

Engenheiro Civil, Investigador Principal



Maria do Rosário Veiga

Engenheira Civil, Investigadora Principal com habilitação

6. BIBLIOGRAFIA

1. PINA SANTOS, C.; VEIGA, M. do Rosário; VILHENA, A.; MAGALHÃES, A; MATIAS, L. – *Desenvolvimento de metodologias para a avaliação dos efeitos da humidade em paredes antigas*. Comunicação apresentada ao Congresso CONSTRUÇÃO 2004. Porto: FEUP, Dezembro de 2004.
2. MATIAS, L.; VILHENA, A.; PINA SANTOS, C.; VEIGA, M. do Rosário – *Ensaio de capilaridade e análise termográfica para visualização da secagem de um murete de alvenaria de pedra*. Relatório n.º 22/2007-NRI. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Janeiro 2007.
3. MATIAS, L.; VILHENA, A.; PINA SANTOS, C.; VEIGA, M. do Rosário – *Análise termográfica para visualização da absorção de água salina e da secagem de um murete de alvenaria de pedra*. Relatório n.º 241/2007-NRI. Lisboa: LNEC, Julho 2007.
4. PALMA, J. – *Aparelho detector de humidade no betão, com base na variação da condutibilidade*. Relatório n.º 56/95-GEET. Lisboa: LNEC, 1995.
5. GONÇALVES, T. – *Capacidade de impermeabilização de revestimentos de paredes à base de ligantes minerais. Desenvolvimento de um método do ensaio com base na resistência eléctrica*. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Construção pela Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa: LNEC, 1997.
6. LNEC – *Revestimentos de paredes. Caracterização da capacidade de impermeabilização*. Lisboa: LNEC, Maio de 1999. Ficha de Ensaio do LNEC FE Pa 38.
7. VEIGA, M. do Rosário – *Characteristics of repair mortars for historic buildings concerning water behaviour. Quantification and requirements*. Actas do *Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*, TC RMH. Delft, RILEM, 25-28 de Janeiro de 2005.
8. MAGALHÃES, A; VEIGA, M. do Rosário; PINA SANTOS, C. – *Desenvolvimento de metodologias para a avaliação dos efeitos da humidade em paredes antigas*. Relatório n.º 115/2008-NRI. Lisboa : LNEC, Março de 2008.

ANEXO I

Características das sondas termohigrométricas miniatura

ANEXO I

Características das sondas termohigrométricas miniatura

As características das sondas termohigrométricas miniatura utilizadas na medição da temperatura e da humidade relativa são as que se indicam a seguir:

Marca: ROTRONIC

Modelo: HygroClip S-C02/05

Comprimento da sonda: 51 mm

Diâmetro da sonda: 5 mm

Sensores:

temperatura: resistência de platina Pt100 1/3 DIN

humidade relativa: sensor capacitivo ROTRONIC HIGROMETER C94

Gamas de medida:

temperatura: - 30 °C a 85 °C

humidade relativa: 0 a 100%

Exactidão de medida:

temperatura: $\pm 0,3$ °C

humidade relativa: $\pm 1,5\%$ HR

Saídas analógicas:

temperatura: 10 mV/°C (gama: - 0,3 V a 1 V)

humidade relativa: 10 mV/1% HR (gama: 0 a 1V)

