



Filipa Vitória Santana Vidigal

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Arrefecimento evaporativo de ambientes e elementos construtivos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientadora: Doutora Teresa Cláudio Diaz Gonçalves,
Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de
Engenharia Civil

Coorientadora: Professora Doutora M. Paulina Faria
Rodrigues, Professora Associada, Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professor Doutor Miguel José das Neves Pires Amado
Arguente: Professor Doutor Daniel Aelenei
Vogais: Doutora Teresa Cláudio Diaz Gonçalves
Professora Doutora Maria Paulina Santos Forte Faria Rodrigues

A presente dissertação foi preparada no âmbito do Convénio existente entre o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), tendo sido realizada no LNEC.



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

FCT

Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA

Esta dissertação foi realizada no âmbito do projeto de investigação DRYMASS (ref. PTDC/ECM/100553/2008) que é financiado por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

“Copyright” Filipa Vitória Santana Vidigal, da FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“Deve-se dar mais crédito à observação do que às teorias, e a estas só até ao ponto em que são confirmadas pelos factos observados.”

Aristóteles

Agradecimentos

Desejo expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta dissertação de mestrado, em particular:

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), que me proporcionou todas as condições necessárias para que fosse possível a realização desta dissertação.

À minha orientadora, Doutora Teresa Cláudio Dias Vaz Gonçalves, pela competência científica e acompanhamento de todo o trabalho, pela disponibilidade permanente, estímulo, exigência, por todas as sugestões e correções relevantes feitas durante a orientação e ainda pela colaboração na escrita do artigo "**Evaporation from porous building materials and its cooling potential**", para o "Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)".

À minha coorientadora, Doutora Maria Paulina Santos Forte Faria Rodrigues, pela sugestão do tema da dissertação e pela preocupação no acompanhamento do trabalho.

Ao Núcleo de Betões, Pedra e Cerâmicos do Departamento de Materiais do LNEC, que me proporcionou todas as condições, em termos de meios e materiais, para a realização deste trabalho, em particular:

Ao Técnico José Costa, pela ajuda no corte dos materiais que foram alvo de estudo e na preparação do dispositivo experimental.

À Técnica Superior Etelvina Leitão pelo auxílio na fase de impermeabilização dos provetes.

À Bolseira Jéssica Musacchi pela disponibilidade e espírito de entajuda em algumas tarefas, como por exemplo, na moagem de alguns materiais.

À Engenheira Vânia Brito, que para além do companheirismo e transmissão de ideias, também mostrou sempre uma enorme disponibilidade em facultar os dados que lhe requeri, relativos às características de alguns materiais. Dados esses que já tinham sido obtidos no âmbito do projeto DRYMASS.

À Engenheira Idália Gomes, aluna de Doutoramento, pelo companheirismo e disponibilidade mostrada para ajudar sempre que foi necessário.

Ao Doutor Luís Matias e à Doutora Mar Barbero pelo facto de me terem elucidado sobre alguns aspetos relativamente à emissividade dos materiais.

Aos Investigadores, Doutor João Mimoso e Doutora Dória Costa pela simpatia, pelo apoio e ainda pela cedência de alguns dos equipamentos que foram necessários para a realização deste trabalho.

À Soporcel por ter cedido a celulose, à Promat por ter cedido o silicato de cálcio e à carpintaria do LNEC por ter cedido a serradura.

Aos meus colegas e amigos de faculdade (Ana, Rui, Tiago, entre muitos outros) que me acompanharam ao longo de todo o percurso académico, por partilharem comigo momentos de estudo, trabalho e de convívio. Quero também agradecer a todos os meus amigos de longa data, que me proporcionaram momentos de descontração, especialmente quando mais precisava.

Por último, mas não menos importante, quero agradecer à minha família, especialmente aos meus pais, Maria José e Francisco, pelo apoio incondicional, pela motivação inculcada e preocupação constante e sem os quais não teria sido possível a concretização deste trabalho. Quero também agradecer ao meu irmão, Gonçalo, pelo apoio, amizade e incentivo constantemente transmitido.

Resumo

A presente dissertação discute a capacidade dos materiais de construção porosos para promoverem o arrefecimento evaporativo de ambientes. A evaporação pode ser utilizada como meio de arrefecimento porque é endotérmica, ou seja, consome energia. Os processos evaporativos podem melhorar a eficiência energética do parque construído uma vez que se baseiam numa fonte de energia renovável e económica.

Efetou-se primeiro uma pesquisa bibliográfica sobre materiais e sistemas de arrefecimento evaporativo, bem como métodos de avaliação destes, numa perspetiva internacional, abordando soluções tradicionais e desenvolvimentos recentes.

Depois, realizou-se uma campanha experimental que assentou na medição da temperatura superficial de alguns materiais selecionados durante a sua secagem. Os materiais foram dois calcários, tijolo cerâmico, argamassa de cal aérea, silicato de cálcio, areia siliciosa com três granulometrias distintas, celulose e serradura. A medição da temperatura superficial foi efetuada por infravermelhos (IV), utilizando um pirómetro. O equipamento mede a radiação emitida pela superfície a partir da Lei de Stefan-Boltzmann, a qual depende não só da temperatura como também da emissividade. Assim sendo, o trabalho experimental passou em primeiro lugar por averiguar se existiam variações de emissividade decorrentes do facto de os materiais apresentarem tonalidades diferentes ou de se encontrarem húmidos. Depois, realizaram-se ensaios de secagem durante os quais se mediu a temperatura superficial. Realizou-se um ensaio em condições controladas, numa sala condicionada, bem como ensaios no exterior, ao sol e à sombra.

A dissertação permitiu retirar conclusões principalmente sobre: i) fiabilidade do método de medição da temperatura superficial por IV, para a gama de temperaturas registadas; ii) potencial de arrefecimento evaporativo dos materiais testados. Os resultados obtidos sugerem uma baixa repetibilidade da técnica de medição da temperatura superficial por IV e revelaram um elevado potencial de arrefecimento evaporativo dos materiais utilizados correntemente na construção.

Esta dissertação foi realizada no LNEC, no âmbito do projeto de investigação “DRYMASS” que é co-financiado pela Fundação Portuguesa para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

Palavras-chave: Arrefecimento evaporativo, materiais porosos de construção, infravermelhos, pirómetro, emissividade, secagem, temperatura superficial.

Abstract

This dissertation discusses the ability of porous building materials to promote the evaporative cooling environments. The evaporation can be used for cooling the environment because it is endothermic – it consumes energy. The evaporative processes can improve the energy efficiency of the building park, since are based on a renewable and economic energy.

A bibliography research on materials and evaporative cooling systems was made as well as a research on evaluation methods, in an international perspective, addressing traditional solutions and recent developments.

Then, an experimental campaign that was based on the measurement of the surface temperature of some selected materials during drying was performed. The materials were two limestones, ceramic brick, lime mortar, calcium silicate and silica sand with three different particle sizes, cellulose and sawdust. The measurement of the surface temperature was performed by infrared using a pyrometer. The equipment measures the radiation emitted by the surface from the Stefan-Boltzmann Law, which depends not only on temperature but also on emissivity. Therefore, this experimental work started by examining if emissivity varies because the materials have different colour or when they are moist. Afterwards drying tests were performed during which the surface temperature was measured. Tests were conducted under controlled conditions in a conditioned room, as well as outside in the sun and in the shade.

This work made it possible to conclude that: i) the reliability of the method of measuring the surface temperature infrared, for the range of recorded temperatures; ii) the potential for evaporative cooling of the tested materials. The results suggest a poor repeatability of the technique of measuring the surface temperature by infrared, and revealed the high evaporative cooling potential of some materials commonly used in construction.

This work was performed at LNEC under the research project “DRYMASS” which is co-funded by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT).

Keywords: Evaporative cooling, porous building materials, infrared, pyrometer, emissivity, drying, surface temperature.

Índice de Texto

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Âmbito, objetivos e metodologia geral da dissertação	3
1.3	Estrutura da dissertação.....	4
2	Estado-dos-conhecimentos	5
2.1	Notas históricas sobre o arrefecimento passivo.....	5
2.2	Princípios do arrefecimento evaporativo	5
2.3	Fundamentos da secagem de materiais porosos.....	7
2.4	Métodos de arrefecimento evaporativo	9
2.4.1	Paredes ventiladas constituídas por tijolo furado humedecido.....	9
2.4.2	Paredes constituídas por tubos cerâmicos	14
2.4.3	Pulverização de água no material de isolamento térmico em caixa-de-ar ventilada.....	21
2.4.4	Utilização de materiais granulares humedecidos em coberturas	27
2.4.5	Síntese do capítulo	33
3	Campanha Experimental.....	37
3.1	Introdução	37
3.2	Materiais.....	37
3.2.1	Caraterísticas	37
3.2.2	Provetes	44
3.3	Medição da temperatura superficial.....	46
3.3.1	Método	46
3.3.2	Ensaio A: Variação da emissividade devido às diferenças de cor entre materiais no estado seco e materiais no estado húmido	49
3.4	Ensaio de evaporação com monitorização da temperatura superficial	54
3.4.1	Ensaio B: Ensaio de secagem numa sala condicionada	54
3.4.2	Ensaio C: Ensaio de secagem ao ar livre	57
3.5	Resultados dos ensaios de evaporação.....	60
3.5.1	Ensaio B: Ensaio de secagem numa sala condicionada	60
3.5.2	Ensaio C: Ensaio de secagem ao ar livre	66
3.6	Discussão dos resultados dos ensaios de evaporação.....	71
3.6.1	Ensaio B: Ensaio de secagem numa sala condicionada	71
3.6.2	Ensaio C: Ensaio de secagem ao ar livre	72
4	Conclusões	75
4.1	Considerações Finais	75
4.2	Desenvolvimentos futuros	76
	Referências bibliográficas	79
	Anexos.....	83
	Anexo I – Teor de água das amostras.....	83
	Anexo II – Quantidade de água evaporada.....	86

Índice de Figuras

Figura 1.1 - Consumo energético mundial.....	2
Figura 1.2 - Consumo energético em Portugal.....	3
Figura 2.1 - As fases do processo de secagem.	8
Figura 2.2 - Curva de secagem típica de materiais porosos.....	8
Figura 2.3 - Descrição esquemática do sistema de arrefecimento em paredes de tijolo furado.	9
Figura 2.4 - Aplicação do sistema de arrefecimento num pátio.	10
Figura 2.5 - Tijolos furados testados.	11
Figura 2.6 - Descrição esquemática do protótipo utilizado em todas as paredes que constituem o edifício em estudo.	12
Figura 2.7 - Vista panorâmica do modelo de simulação utilizado.	12
Figura 2.8 - Protótipo (esquerda) e imagem obtida por termografia num dia de agosto às 12h (direita).....	13
Figura 2.9 - Temperaturas superficiais nos dois casos de estudo.	13
Figura 2.10 - Exemplos de aplicação do sistema de arrefecimento.....	15
Figura 2.11 - Seções transversais da cerâmica usada no sistema de arrefecimento.....	16
Figura 2.12 - Descrição esquemática do sistema de arrefecimento evaporativo constituído por paredes de tubos de cerâmica porosa com elevada sucção capilar.	17
Figura 2.13 - Disposição dos diferentes elementos constituintes do sistema de arrefecimento.....	17
Figura 2.14 - Disposição dos tubos cerâmicos e localização dos pontos de medição.	18
Figura 2.15 - Localização dos elementos integrantes do sistema de arrefecimento em estudo.	18
Figura 2.16 - Distribuição da temperatura superficial nos tubos cerâmicos através de uma câmara de termografia.....	20
Figura 2.17 - Teste realizado no exterior para determinar o comportamento ao frio dos tubos cerâmicos.....	20
Figura 2.18 - Modelo funcional do sistema evaporativo.	23
Figura 2.19 - Estrutura de teste.	25
Figura 2.20 - Orientação e estrutura do protótipo.	25
Figura 2.21 - Curva de absorção de água e de secagem.	26
Figura 2.22 - Materiais testados.	28
Figura 2.23 - Aparelho “túnel de vento” colocado no interior da câmara climática.	29
Figura 2.24 - Recipiente onde foram colocados os materiais.	30
Figura 2.25 - Condições impostas na câmara durante os ciclos de ensaios.	30
Figura 2.26 - Correlação entre a temperatura superficial registada e a taxa de evaporação (1 ^o Ensaio).....	31
Figura 2.27 - Correlação entre a temperatura superficial registada e a taxa de evaporação (2 ^o ensaio).	32
Figura 3.1 - Pedras naturais: calcário "Maastricht" (esquerda) e calcário bege (direita).	39
Figura 3.2 - Tijolo cerâmico.	39
Figura 3.3 - Argamassa de cal aérea.	40
Figura 3.4 - Silicato de cálcio.....	40
Figura 3.5 - Areia siliciosa de: granulometria fina (esquerda), granulometria média (centro) e granulometria grossa (direita).....	41

Figura 3.6 - Celulose.....	41
Figura 3.7 - Serradura.....	42
Figura 3.8 - Água destilada.....	42
Figura 3.9 - Curvas de porometria dos materiais coerentes: CS L500, CB, A e T, determinadas através do MIP.....	44
Figura 3.10 - Máquina de corte.....	45
Figura 3.11 - Estufa.	45
Figura 3.12 - Impermeabilização lateral dos provetes.....	45
Figura 3.13 - Pirômetro de IV da Raytek.	46
Figura 3.14 - Área de influência na medição da temperatura com recurso a um pirômetro de IV....	47
Figura 3.15 - Materiais nos estados seco e húmido e a água, respetivamente.	49
Figura 3.16 - Teste expedito de transparência aos IV de uma folha de polietileno.	49
Figura 3.17 - Termohigrógrafo.	50
Figura 3.18 – Medição da emissividade efetuada com recurso a um pirômetro de IV.	50
Figura 3.19 - Imersão total dos materiais.	51
Figura 3.20 – Materiais a serem envoltos em folha de polietileno.	51
Figura 3.21 - Teste expedito de transparência aos IV, realizado à água.....	52
Figura 3.22 - Materiais envoltos em folha de polietileno.	52
Figura 3.23 - Imersão parcial dos materiais.	55
Figura 3.24 - Selagem dos provetes.....	55
Figura 3.25 - Ensaio de secagem.....	56
Figura 3.26 - Balança digital.	56
Figura 3.27 - Dispositivo experimental envolto pela folha de polietileno e o recipiente com a água.	58
Figura 3.28 - Medição das temperaturas superficiais dos materiais, com utilização do pirômetro...	59
Figura 3.29 – Termohigrómetro.	59
Figura 3.30 - Influência do operador nas medições (sombreamento).....	59
Figura 3.31 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de CS L500 nos ensaios B1 e B2, respetivamente.	60
Figura 3.32 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de CB nos ensaios B1 e B2, respetivamente.	60
Figura 3.33 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de M nos ensaios B1 e B2, respetivamente.	61
Figura 3.34 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de T nos ensaios B1 e B2, respetivamente.	61
Figura 3.35 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de A nos ensaios B1 e B2, respetivamente.	61
Figura 3.36 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de A-V nos ensaios B1 e B2, respetivamente.	62
Figura 3.37 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de A-IV-A nos ensaios B1 e B2, respetivamente.	62
Figura 3.38 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de A-I nos ensaios B1 e B2, respetivamente.	62
Figura 3.39 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de S nos ensaios B1 e B2, respetivamente.	63

Figura 3.40 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de C nos ensaios B1 e B2, respectivamente.	63
Figura 3.41 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de AD nos ensaios B1 e B2, respectivamente.	63
Figura 3.42 - Temperaturas superficiais registadas (ensaio B1).....	64
Figura 3.43 - Temperaturas superficiais registadas (ensaio B2).....	64
Figura 3.44 - Taxa de evaporação e média das temperaturas superficiais registadas (ensaio B1).	65
Figura 3.45 - Taxa de evaporação e média das temperaturas superficiais registadas (ensaio B2).	65
Figura 3.46 - Correlação entre a taxa de evaporação e a média das temperaturas superficiais registadas (ensaio B1).	66
Figura 3.47 - Correlação entre a taxa de evaporação e a média das temperaturas superficiais registadas (ensaio B2).	66
Figura 3.48 - Registo da temperatura ambiente, da temperatura superficial dos materiais no estado húmido e da água, no ensaio realizado ao sol (ensaio C1).	67
Figura 3.49 - Humidade relativa registada no ensaio realizado ao sol (ensaio C1).....	67
Figura 3.50 - Temperaturas superficiais registadas no ensaio realizado ao sol (ensaio C1).	67
Figura 3.51 - Média das temperaturas superficiais registadas no ensaio realizado ao sol (ensaio C1).	68
Figura 3.52 - Registo da temperatura ambiente, da temperatura superficial dos materiais no estado húmido e da água, no ensaio realizado ao sol (ensaio C2).	68
Figura 3.53 - Humidade relativa registada no ensaio realizado ao sol (ensaio C2).....	68
Figura 3.54 - Temperaturas superficiais registadas no ensaio realizado ao sol (ensaio C2).	69
Figura 3.55 - Média das temperaturas superficiais registadas no ensaio realizado ao sol (ensaio C2).	69
Figura 3.56 - Registo da temperatura ambiente, da temperatura superficial dos materiais no estado húmido e da água, no ensaio realizado à sombra (ensaio C3).	69
Figura 3.57 - Humidade relativa registada no ensaio realizado à sombra (ensaio C3).	70
Figura 3.58 - Temperaturas superficiais registadas no ensaio realizado à sombra (ensaio C3).	70
Figura 3.59 - Média das temperaturas superficiais registadas no ensaio realizado à sombra (ensaio C3).	70

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Características do material cerâmico.....	11
Quadro 2.2 - Características dos tubos cerâmicos.	15
Quadro 2.3 - Características dos materiais isolantes ensaiados.	23
Quadro 2.4 - Propriedades físicas e características dos poros por análise da porometria dos materiais testados.....	29
Quadro 2.5 - Medições de temperaturas superficiais e taxas de evaporação no 1º ensaio.	31
Quadro 2.6 - Medições de temperaturas superficiais e taxas de evaporação no 2º ensaio.	32
Quadro 2.7 - Principais conclusões retiradas da bibliografia analisada.	35
Quadro 3.1 - Descrição dos materiais.	38
Quadro 3.2 - Características dos materiais coerentes.	44
Quadro 3.3 - Medição experimental da emissividade dos materiais.	53
Quadro 3.4 - Valores de emissividade dos materiais, presentes na bibliografia consultada.	53

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O arrefecimento evaporativo é um processo que permite melhorar o conforto térmico sobretudo em regiões com um clima quente e seco, havendo referência da sua utilização há milhares de anos atrás, nomeadamente no antigo Egito e na Pérsia (Cook 1989). As construções na antiga Pérsia apresentavam uma arquitetura que possibilitava a ventilação natural entre os edifícios. Junto aos canais de passagem de ar eram construídos reservatórios, para arrefecer o ar e assim reduzir a temperatura no interior dos edifícios. No caso do antigo Egito eram pendurados tapetes molhados nas portas e janelas que, por ação do vento, permitiam o arrefecimento do ar interior (Musa 2008). Mas o recurso ao arrefecimento evaporativo era também tradicional em Portugal. No Sul do país, por exemplo, era habitual no período de verão, o humedecimento dos pisos de cerâmica, com o objetivo de arrefecer o ambiente no interior das habitações.

A estratégia de arrefecimento evaporativo consiste assim em conseguir uma diminuição da temperatura devido à mudança de fase da água, quando esta passa do estado líquido para o estado de vapor, porque esta mudança de fase envolve absorção de calor. A quantidade de calor absorvido aumenta com a quantidade de água que pode ser evaporada, ou seja, com a capacidade do ar em conter vapor de água, isto é, com a diminuição da humidade relativa (HR) do ar.

O arrefecimento evaporativo pode ser direto ou indireto, consoante o método utilizado para conseguir o decréscimo da temperatura. No arrefecimento evaporativo direto há um aumento da quantidade de vapor de água no ar. Como exemplo tem-se a técnica tradicional de humedecimento dos pisos de cerâmica, referida anteriormente. No arrefecimento evaporativo indireto isto não acontece. Um exemplo é quando se promove o arrefecimento de paredes através da evaporação nas superfícies exteriores, expostas à radiação solar e ao ar quente que atravessa a parede a partir do interior. Neste caso consegue-se uma diminuição da temperatura do ar interior sem que haja um aumento da quantidade de vapor de água (Gonçalves e Graça 2004).

A escolha da técnica de arrefecimento mais apropriada depende não só das condições climatéricas do local, mas também de outros fatores como as características do edifício, no que diz respeito à ventilação dos espaços e aos padrões de ocupação, que influenciam nomeadamente a produção de vapor de água no interior. Os sistemas de arrefecimento evaporativo são adequados sobretudo em zonas de clima temperado seco e em regiões desérticas, áridas e muito secas, como por exemplo o Médio Oriente (Gonçalves e Graça 2004). Estes sistemas são interessantes face às atuais necessidades de redução do consumo energético, uma vez que se incluem nas chamadas técnicas de arrefecimento passivo, que objetivam a redução da temperatura sem recurso a fontes de energia (energia elétrica e combustíveis) extrínsecas à própria construção. Permitem pois constituir um microclima na construção utilizando essencialmente recursos naturais disponíveis (como por exemplo o vento e a água). Encontram utilização não só a nível das habitações, mas também a nível urbano. De facto, estes sistemas têm sido propostos para tentar minimizar o agravamento das

condições térmicas (sobreaquecimento) das grandes superfícies urbanas, que resulta não só pelo facto de ser gerada artificialmente uma enorme quantidade de calor pelas atividades humanas (decorrente da sobreocupação das cidades) como também da alteração da superfície terrestre (He e Hoyano 2010). Nas cidades, esta superfície é composta por materiais com elevada capacidade de retenção térmica (como por exemplo o alcatrão e o betão), que contribuem para o aumento da sua temperatura superficial e conseqüente aumento da temperatura ambiente.

Esta dissertação desenvolve-se no âmbito da atual necessidade de construir edifícios assentes em tecnologias que permitam economizar energia, contrariando o elevado consumo energético global. Na figura 1.1 é possível observar em termos percentuais que o consumo energético mundial destinado ao arrefecimento de edifícios atinge cerca de 12% do consumo energético global, valor elevado que é assim desejável reduzir.

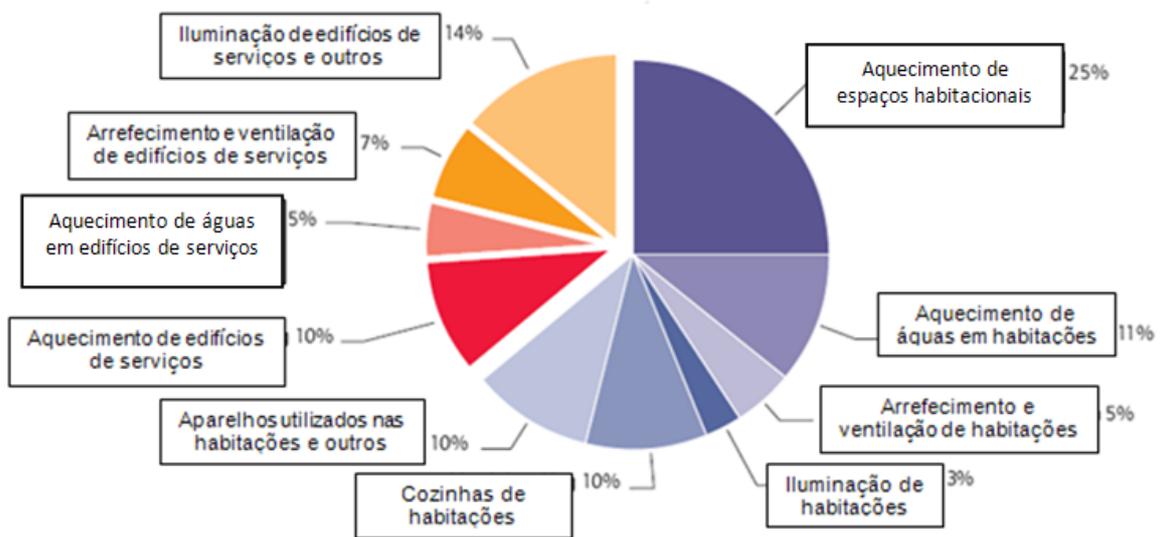


Figura 1.1 - Consumo energético mundial (IEA 2011).

Relativamente a Portugal, verifica-se que o consumo energético para arrefecimento de ambientes assume, em termos percentuais, valores mais baixos, cerca de 1.6% (figura 1.2). As razões desta diferença requereriam análise específica, sendo provavelmente uma delas o facto de na zona litoral do país, a amplitude térmica de verão ser acentuada, o que permite o arrefecimento noturno, dispensando (ou reduzindo) as necessidades de arrefecimento. No entanto, este valor poderá ainda ser reduzido através da adoção de sistemas de arrefecimento passivo que foram durante muito tempo tradicionais no país.

O interesse dos processos de arrefecimento evaporativo foi já alvo de reconhecimento pelo Banco Mundial (Xuan et al. 2012, citando Bom et al. 1999). Como exemplos de algumas das suas vantagens tem-se: a melhoria da qualidade do ar devida à redução das emissões de dióxido de carbono, a redução de custos e a simplicidade de muitos dos variados métodos disponíveis. É por estas razões que estes métodos de arrefecimento têm vindo a ganhar importância e são cada vez mais incorporados em soluções arquitetónicas modernas.

Com a realização desta dissertação pretende-se contribuir para avaliar a viabilidade do arrefecimento evaporativo. Pretende-se complementar a informação já publicada sobre o método de

arrefecimento evaporativo em paredes analisando o comportamento de outros materiais de construção, para além dos materiais cerâmicos que são os mais correntes (por exemplo, He e Hoyano 2010).

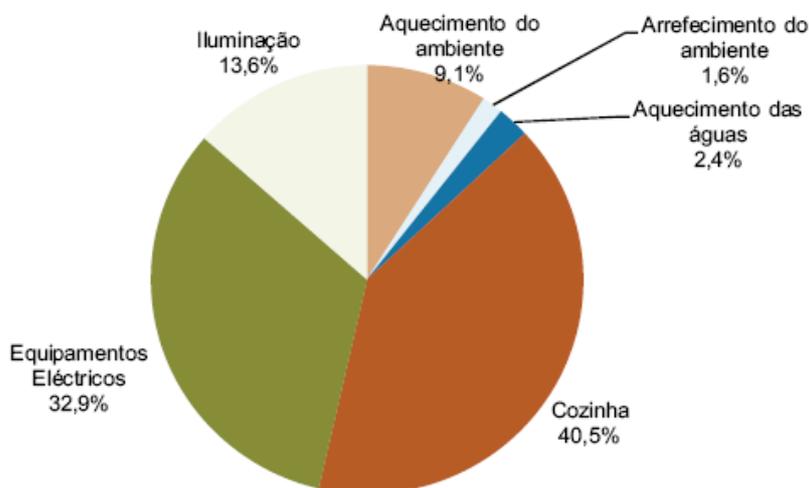


Figura 1.2 - Consumo energético em Portugal (INE/DGEG 2011).

O trabalho ganha particular relevância após a recente publicação do Decreto-Lei nº118/2013 que visa assegurar e promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios através do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE). Este Decreto-Lei promove a implementação de sistemas passivos que melhorem o desempenho energético dos edifícios. Considera-se que a dissertação será um contributo relativamente à seleção dos materiais a utilizar na execução dos elementos construtivos. Nela, estuda-se o arrefecimento evaporativo produzido por vários materiais de construção, quando sujeitos a condições específicas de temperatura e HR, visando determinar quais deles poderão ser um meio viável de reduzir as necessidades energéticas dos edifícios.

1.2 Âmbito, objetivos e metodologia geral da dissertação

A presente dissertação visa avaliar materiais que suportem uma estratégia de arrefecimento de ambientes no período de verão.

A realização deste trabalho tem como principais objetivos:

- Identificar, descrever e discutir criticamente técnicas (tradicional e modernas) de arrefecimento evaporativo de ambientes.
- Avaliar por meio de ensaios o potencial de arrefecimento evaporativo de vários materiais porosos, em condições seleccionadas.
- Testar a viabilidade de efetuar esta avaliação a partir da medição da temperatura superficial por IV.

O trabalho foi realizado com base num levantamento bibliográfico e posterior análise crítica da informação recolhida, seguido de uma campanha experimental e correspondente tratamento e análise de resultados. Desenvolveu-se no âmbito do projeto de investigação DRYMASS (ref^a

PTDC/ECM/100553/2008) que é co-financiado pela FCT e pelo LNEC. No âmbito desta dissertação foi também escrito um artigo científico denominado “Evaporation from porous building materials and its cooling potential” que irá ser publicado na revista “Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)”.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em quatro capítulos e dois anexos. O primeiro capítulo é o presente capítulo introdutório, onde se apresenta o enquadramento, os objetivos e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo foca o estado-da-arte. Tem como principal objetivo dar a conhecer as técnicas de arrefecimento evaporativo tradicionais e atuais. Para tal, foi necessário realizar uma intensa pesquisa bibliográfica e análise de numerosas publicações técnicas e científicas. Esta pesquisa serviu para enquadramento do trabalho e justificação dos seus objetivos, bem como de base à posterior interpretação dos resultados obtidos experimentalmente. No capítulo, são apresentadas notas históricas e os princípios do arrefecimento evaporativo. É também efetuada a descrição de técnicas atuais de arrefecimento evaporativo, já desenvolvidas, em fase de avaliação ou, em alguns casos, já aplicadas. No fim do capítulo é efetuada uma síntese em que são apresentadas as principais conclusões de todos os estudos científicos analisados.

No terceiro capítulo é apresentada a campanha experimental realizada, que se baseou em ensaios de secagem evaporativa durante os quais se avaliou a temperatura superficial dos materiais por IV. Primeiramente são descritos os materiais utilizados e são também apresentados alguns parâmetros fundamentais que definem cada material, obtidos a partir de ensaios realizados sobretudo no âmbito do projeto DRYMASS. Posteriormente é descrito o método utilizado num ensaio preliminar que, em conjunto com a bibliografia consultada, permitiu definir o valor de emissividade depois utilizado para determinação da temperatura por IV nos ensaios de secagem, os quais foram realizados numa sala condicionada e no exterior. Para cada ensaio são apresentados os resultados obtidos e uma breve análise desses resultados. No fim, discutem-se globalmente, à luz dos objetivos da dissertação, todos os resultados obtidos no trabalho experimental.

No quarto e último capítulo é apresentada uma síntese final, com as conclusões gerais deste trabalho, e propostas para o desenvolvimento de estudos futuros.

Relativamente aos anexos, o anexo I diz respeito aos gráficos obtidos na determinação do teor de água (%) de cada material nos ensaios de secagem realizados numa sala condicionada e o anexo II corresponde aos gráficos referentes à quantidade de água evaporada (g/m^2) por cada material, também durante o ensaio de secagem realizado numa sala condicionada.

2 Estado-dos-conhecimentos

2.1 Notas históricas sobre o arrefecimento passivo

O arrefecimento passivo é uma estratégia de arrefecimento que não recorre a meios de climatização que envolvam consumo de energia. Alguns outros exemplos de técnicas de arrefecimento passivo são: o sombreamento, a ventilação natural, o arrefecimento radiativo, o arrefecimento pelo solo e a evapotranspiração. O arrefecimento evaporativo, objeto desta dissertação, surge tradicionalmente associado a outras técnicas, como o sombreamento e a ventilação natural.

Os sistemas de arrefecimento evaporativo têm uma tradição longa em muitos locais do globo, especialmente em climas quentes e áridos. Note-se que somente em meados do século XIX se verificou o aparecimento dos sistemas mecânicos de arrefecimento e os quais sofreram um maior desenvolvimento em inícios do Século XX (Santamouris *et al.* 1996).

Leonardo da Vinci foi o pioneiro com a utilização de um equipamento mecânico de arrefecimento evaporativo, que consistia numa roda de água vazada, que possuía uma passagem de ar, sendo o ar arrefecido através da sua passagem pela água e conseqüente evaporação, durante a movimentação da roda (Oliveira 2012). Panos molhados pendurados nas janelas na direção do vento e chafarizes em pátios fechados são alguns dos recursos utilizados desde há milhares de anos para criar um microclima agradável, ou seja, proporcionar condições de conforto térmico durante a época quente. No que se refere aos materiais de construção, é de salientar o reconhecimento, desde sempre, do elevado potencial de arrefecimento dos materiais cerâmicos. No antigo Egito (2500 a.C.), por exemplo, eram utilizados jarros de barro cozido (muito porosos) com água, em que uma parte da água armazenada evaporava através da parede do jarro, arrefecendo o líquido remanescente, sendo este tipo de utilização ainda tradicional em muitos locais, nomeadamente nos países mediterrânicos. Nesta dissertação procurou-se também determinar o potencial de arrefecimento de outros materiais porosos, correntes ou com potencial para serem utilizados na construção.

Ao longo dos tempos várias outras técnicas (simples) de arrefecimento evaporativo foram sendo desenvolvidas, baseadas sobretudo no conhecimento empírico, e são hoje correntemente aplicadas em edifícios. A construção de piscinas e lagoas na periferia dos edifícios é um exemplo típico (Santamouris *et al.* 1996). A colocação de vegetação em torno dos edifícios é outro. A vegetação influencia o microclima, não só por fornecer o sombreamento, como devido ao fenómeno de evapotranspiração das plantas. Outro tipo de aplicação interessante, utilizado atualmente em grandes superfícies comerciais e hospitais, é a utilização de elementos de vidro revestidos por uma fina camada de água que visa evitar o sobreaquecimento do espaço interior (Vissers 2011).

2.2 Princípios do arrefecimento evaporativo

O arrefecimento evaporativo ocorre devido à diminuição da temperatura que está associada à passagem da água do estado líquido para o estado gasoso. Este processo de arrefecimento do ar

pode ser explicado de forma simplificada, do seguinte modo. O ar circula ao longo da superfície húmida; se a pressão parcial do vapor no ar for menor que a pressão parcial do vapor junto à superfície, haverá uma transferência de vapor da superfície para o ar, por difusão. Esta transferência de “massa” determina o arrefecimento da superfície húmida, uma vez que a mudança de fase (evaporação) da água consome calor. A evaporação consome calor sensível (calor que não causa uma mudança de estado físico, apenas de temperatura) e transforma-o em calor latente (calor que causa a mudança de estado físico). Enquanto a temperatura da superfície húmida for menor que a temperatura do ar haverá transferência de calor do ar para a superfície (absorção de calor sensível que posteriormente é convertido em calor latente), permitindo o prosseguimento do fenómeno de arrefecimento evaporativo. Trata-se de um processo adiabático, não requerendo nenhuma fonte de calor externa. Ao longo deste processo, a HR do ar aumenta (com a transferência de vapor da superfície para o ambiente) e a sua temperatura diminui (com a transferência de calor do ambiente para a superfície húmida).

Há duas formas de arrefecimento evaporativo (Givoni 1994). O arrefecimento evaporativo direto implica o aumento da HR do ambiente, seja por meio de equipamentos mecanizados, seja através de processos naturais. Este aumento por vezes não é desejável, pois uma elevada HR exterior prejudica significativamente a capacidade de arrefecimento, uma vez que a absorção de água por parte do ar é limitada, contribuindo para o reduzido decréscimo da temperatura do ar (Oliveira 2012). O arrefecimento evaporativo indireto promove a evaporação de água fora do ambiente. Isto acontece, por exemplo, no caso em que é deitada água sobre elementos construtivos como a cobertura de um edifício. A água, ao evaporar, diminui a temperatura da superfície do elemento construtivo e indiretamente a temperatura do ambiente no interior do edifício. Este sistema permite a redução de ganhos de calor por parte do ambiente, sendo assim uma forma indireta de arrefecimento. Importa referir que existem também sistemas de arrefecimento evaporativo combinados, isto é, que são compostos por ambos os arrefecimentos (direto e indireto). Nestes sistemas, numa primeira fase o ar é inicialmente arrefecido por meio de um permutador de calor, sem qualquer adição de humidade, e numa fase seguinte o ar é de novo arrefecido (atingindo por vezes uma temperatura inferior à temperatura de bolbo seco), resultando numa eficácia global deste tipo de sistemas superior a 100% (Fernstrom 2004).

O desempenho dos sistemas de arrefecimento evaporativo pode ser determinado com base nos valores de temperatura registados, através da equação 2.1 (He e Hoyano 2010).

$$\beta = \frac{T_a - T_o}{T_a - T_w} \quad \text{(Equação 2.1)}$$

Nesta equação 2.1, β representa a eficiência de arrefecimento, T_a corresponde à temperatura de bolbo seco do ar, T_o corresponde à temperatura superficial e por fim T_w representa a temperatura de bolbo húmido do ar.

2.3 Fundamentos da secagem de materiais porosos

A secagem é um processo de transferência de massa que, em termos gerais, consiste na remoção de água (ou outro solvente) de um material poroso através de evaporação. Em termos macroscópicos a secagem engloba três fases distintas. Considerando um provete saturado (figura 2.1), ou seja, em que os poros se encontram totalmente preenchidos por água, e selado em todas as faces, exceto numa (de forma a que o fluxo de humidade seja unidirecional), estas fases são as seguintes:

- **1ª Fase**

Verifica-se a continuidade da fase líquida na rede porosa do material. Esta água é transportada até à superfície exterior do material através de forças de capilaridade. A evaporação ocorre à superfície, onde se localiza, portanto, a frente de secagem. O teor de água diminui linearmente com o decorrer do tempo, o que corresponde a uma taxa de secagem constante. A distribuição de água na espessura do material é uniforme.

- **2ª Fase**

O teor de água do material diminui e, portanto, o fluxo capilar vai decrescendo até que se torna insuficiente para compensar a evaporação, o que implica que a água (líquida) já não atinge a superfície. Este teor de água do material chama-se o teor de água crítico. A partir deste ponto, a frente de secagem começa a recuar para o interior do material, dando-se início à 2ª fase da secagem. Nesta fase, o transporte de água até à frente de secagem ocorre por capilaridade e posteriormente por difusão de vapor até à superfície. Dado o progressivo recuo da frente de secagem, o percurso da difusão de vapor também aumenta e, conseqüentemente, há uma diminuição da taxa de secagem do material.

- **3ª Fase**

Dada a diminuição do teor de água do material, verifica-se numa determinada altura a quebra na continuidade líquida que ainda existe na rede porosa atrás da frente de evaporação, dando-se início à 3ª fase do processo de secagem. Uma vez que deixa de existir continuidade líquida nos poros, o transporte de humidade dá-se predominantemente por difusão de vapor em todo o material. Trata-se de uma fase que se caracteriza por apresentar uma taxa de secagem que diminui até atingir o teor de água de equilíbrio higroscópico. Esta última fase é bastante lenta.

Arrefecimento evaporativo de ambientes e elementos construtivos

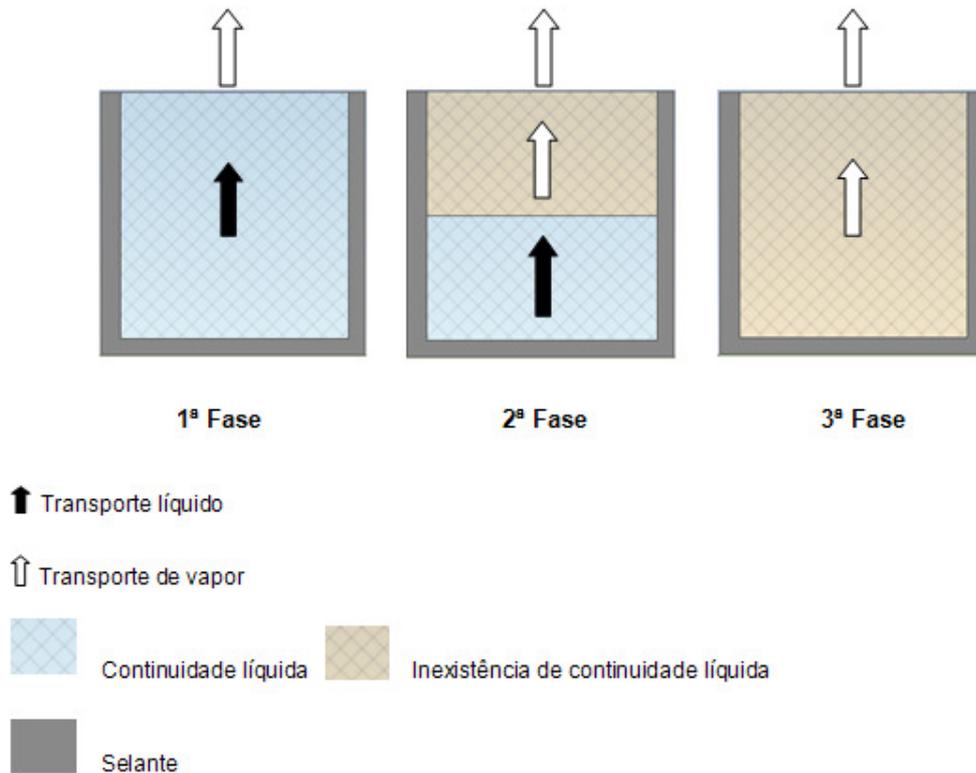


Figura 2.1 - As fases do processo de secagem (Gonçalves 2007).

Note-se que o processo de secagem é complexo, pois depende de fatores externos, nomeadamente das condições ambientais, e de fatores internos, como o teor e a distribuição inicial de água, o teor de água crítico do material e ainda das suas propriedades de transporte de água, que podem diferir com o teor de água. É possível avaliar a secagem dos materiais em condições controladas através do procedimento II.5 da RILEM (1980), o qual permite determinar a curva de secagem, como apresentado na figura 2.2. A curva de secagem expressa o teor de água da amostra, dado em percentagem ponderal da massa seca, como função do tempo. A taxa de secagem corresponde ao declive do segmento de reta.

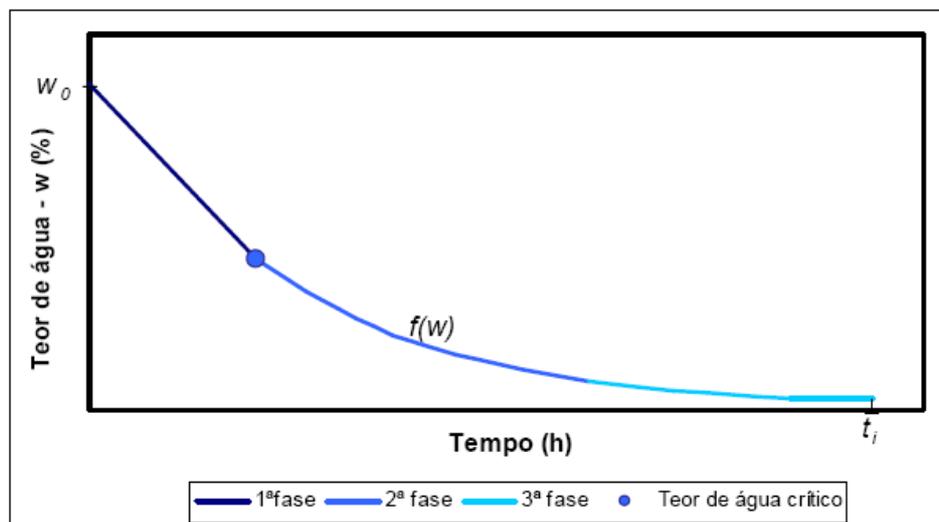


Figura 2.2 - Curva de secagem típica de materiais porosos (Brito 2009).

No gráfico é possível diferenciar as duas primeiras fases do processo. A 1ª fase corresponde a um troço reto, que corresponde a uma diminuição linear do teor de água, traduzindo-se numa taxa de secagem praticamente constante. Na 2ª fase a taxa de secagem deixa de ter um comportamento constante, passando a decrescer. O teor de água crítico corresponde ao ponto onde se verifica a transição entre a 1ª e 2ª fases. Já a transição entre a 2ª e 3ª fases é normalmente difícil de definir.

A forma das curvas de secagem depende de vários fatores, como por exemplo: propriedades dos materiais, condições ambientais, forma das amostras, teor de água inicial e também do facto da evaporação ser uni ou multidirecional.

Para a realização deste trabalho, no qual se está a estudar o potencial de arrefecimento evaporativo de vários materiais, foi avaliada apenas a primeira fase de secagem, pois trata-se da fase em que a taxa de evaporação toma valores superiores.

2.4 Métodos de arrefecimento evaporativo

Neste capítulo são abordados quatro sistemas atuais de arrefecimento evaporativo com aplicação no âmbito da engenharia civil. Estes sistemas foram identificados com base na pesquisa bibliográfica efetuada, apresentando-se seguidamente as suas vantagens e limitações em termos de desempenho energético e outros aspetos relevantes. Trata-se de técnicas desenvolvidas recentemente e algumas já com aplicações práticas. São discutidas primeiro individualmente, nas secções 2.4.1 a 2.4.4 e depois em conjunto, na secção 2.4.5.

2.4.1 Paredes ventiladas constituídas por tijolo furado humedecido

SUMÁRIO

Descrição: Sistema de arrefecimento passivo que consiste numa parede em tijolo furado, com capacidade para absorver água e permitir a penetração do vento, a qual é humedecida de forma a reduzir a temperatura superficial por meio de evaporação da água retida nos tijolos (figura 2.3).

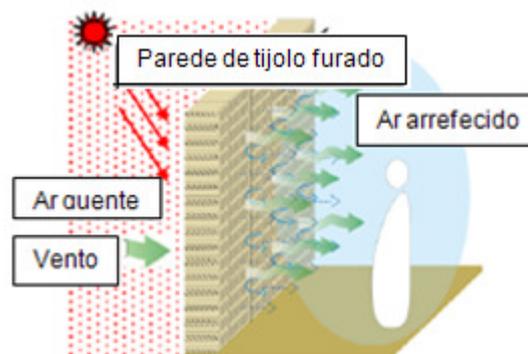


Figura 2.3 - Descrição esquemática do sistema de arrefecimento em paredes de tijolo furado (He e Hoyano 2009).

Autoria: Técnica desenvolvida e avaliada por Jiang He e Akira Hoyano, do Instituto de tecnologia de Tokyo no Japão (He e Hoyano 2009).

Vantagem:

- Comparativamente com as paredes de tijolo furado secas, este sistema permite, em dias de calor, uma redução da temperatura na superfície da parede que pode variar entre 2 e 4°C.

Desvantagem:

- Aumento da humidade absoluta.

Aplicações: Técnica aplicável em parques, pátios residenciais, zonas pedestres (figura 2.4).



Figura 2.4 - Aplicação do sistema de arrefecimento num pátio (He e Hoyano 2009).

- **Objetivos do estudo desenvolvido**

Numa primeira fase, He e Hoyano (2009) procuraram perceber qual o efeito de arrefecimento decorrente da utilização de dois tipos de tijolos cerâmicos com características diferentes.

Posteriormente, através de ensaios realizados no exterior analisaram o potencial de arrefecimento deste tipo de sistema, por comparação com paredes não evaporativas.

Por fim, os autores utilizaram também um método de simulação numérica para confirmar o potencial de arrefecimento do sistema, para um caso de estudo em particular.

- **Materiais e métodos**

Os dois tipos de tijolo furado utilizados nos ensaios foram os seguintes: tijolo com três aberturas, que designaram do “tipo aberto”, e tijolo com 11 aberturas que designaram do “tipo fenda” (figura 2.5). As características do material cerâmico são apresentadas no quadro 2.1.

Para determinar a eficiência de arrefecimento de ambos os tipos de tijolos foram realizados ensaios em laboratório sob condições de temperatura e HR do ar constantes, de 32°C e 40%,

respetivamente. Foi utilizado um tijolo de cada tipo, limitado superior e inferiormente por isolamento térmico e sujeito à ação unidirecional do vento. Neste ensaio foram medidas a temperatura ambiente e a HR, bem como a temperatura superficial do material à entrada e à saída do tijolo, ou seja, a barlavento e a sotavento. O equipamento utilizado para a medição da temperatura não é referido por He e Hoyano (2009). A velocidade do vento foi controlada. No caso do tijolo do tipo fenda era de 2.1m/s e no tijolo do tipo aberto era de 2.2m/s.

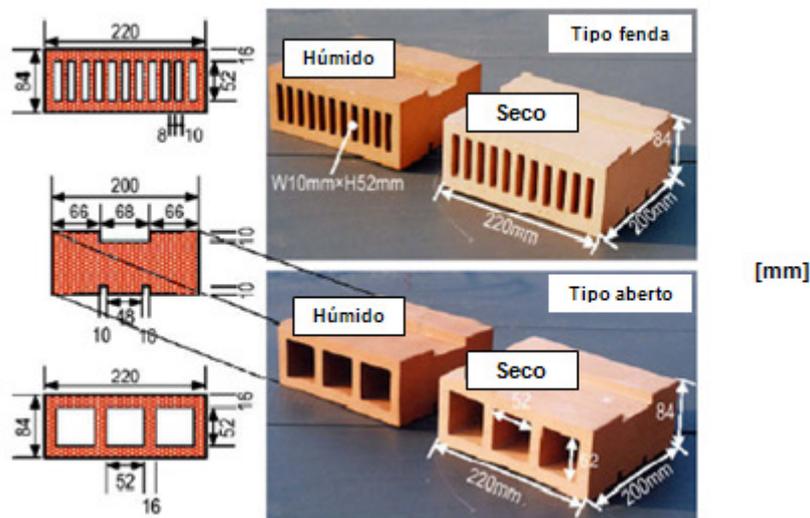


Figura 2.5 - Tijolos furados testados por He e Hoyano (2009).

Quadro 2.1 - Características do material cerâmico (He e Hoyano 2009).

Temperatura de cozedura (°C)	1000
Massa volúmica do material no estado seco (kg/m³)	1750.55
Massa volúmica do material saturado em água (kg/m³)	2012.60
Máximo teor de água absorvido (%)	14.9
Emissividade (-)	0.3
Condutibilidade térmica (W/(m.K))	0.8
Calor específico (kJ/(kg.K))	840

Relativamente ao dispositivo experimental utilizado no exterior (figura 2.6), o abastecimento de água aos tijolos (furados do “tipo aberto”) era efetuado através de uma conduta vertical que se encontrava ligada a perfis de aço em forma de U, sobre os quais estava assente a parte inferior dos tijolos, estando estes em contacto com a água que circulava através dos perfis.

Para este ensaio no exterior foi construído um protótipo do sistema de arrefecimento (figura 2.8 à esquerda), procedendo-se de seguida à medição das temperaturas superficiais da parede com recurso a um equipamento de termografia. O ensaio foi realizado num dia de sol de verão (mês de agosto), em que a temperatura do ar variou sensivelmente entre 26 e 33°C e a radiação solar atingiu um pico de 500W/m² às 12h. O valor da temperatura do ar foi medido com recurso a termopares. O registo das temperaturas superficiais teve início quando as paredes se encontravam totalmente

humedecidas e foi efetuado de forma contínua durante um período de 24h.

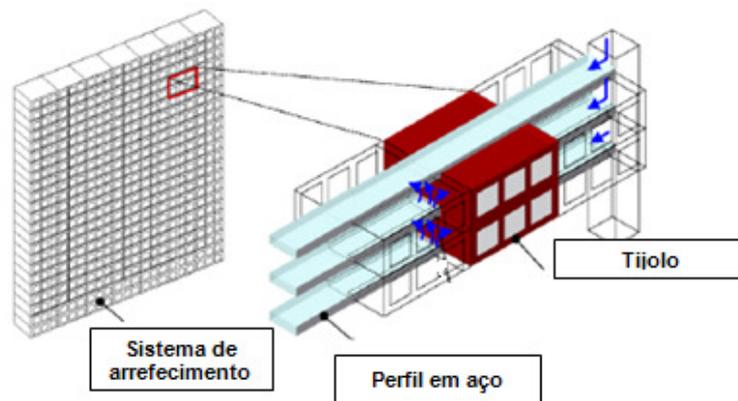


Figura 2.6 - Descrição esquemática do protótipo utilizado em todas as paredes que constituem o edifício em estudo (He e Hoyano 2009).

Posteriormente He e Hoyano (2009) adotaram um método de simulação numérica usando a ferramenta de simulação baseada em 3D-CAD com o objetivo de avaliar o conforto térmico proporcionado pela instalação deste tipo de sistema em edifícios. Recorrendo a este método de simulação, os autores analisaram o caso particular de um pátio numa habitação em Tóquio, rodeado por paredes compostas por este sistema de arrefecimento (figura 2.7). Simularam duas situações: uma em que o sistema era constituído por tijolos secos e outra por tijolos húmidos. As simulações foram realizadas utilizando dados meteorológicos referentes a um dia de sol de verão em Tóquio. A escolha do dia teve por base a temperatura do ar elevada, baixa velocidade do vento, elevada intensidade da radiação solar e o facto de nesse dia o céu se encontrar nublado à noite, não havendo praticamente arrefecimento por radiação durante a noite, o que corresponde ao caso mais desfavorável em termos de conforto de verão. Inicialmente tiveram de ser introduzidos dados sobre as características dos materiais que compõem a parede, tais como: dimensão da secção, condutibilidade térmica, calor específico, entre outros. O tijolo utilizado na simulação era do tipo aberto.

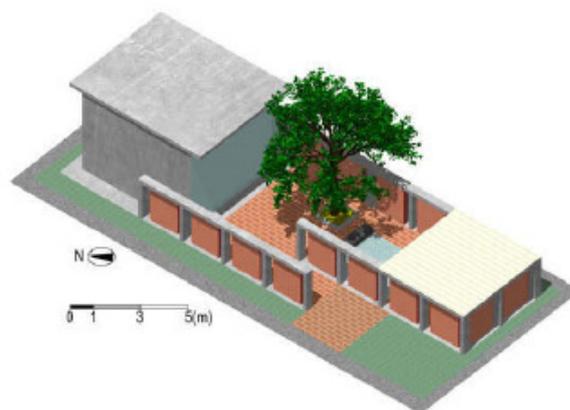


Figura 2.7 - Vista panorâmica do modelo de simulação utilizado (He e Hoyano 2009).

- **Resultados e discussão de resultados**

Com os ensaios que tinham como objetivo avaliar a eficiência de arrefecimento de ambos os tipos de tijolos, os autores verificaram uma redução da temperatura de 3°C e 1°C para os tijolos furados “tipo fenda” e “tipo aberto”, respetivamente. Note-se que, muito embora, de acordo com estes resultados, seja mais vantajosa a utilização do tijolo do tipo fenda, não é depois explicado por parte de He e Hoyano (2009) por que razão não foi este o tipo de tijolo adotado nos ensaios realizados no exterior e para a análise de simulação numérica.

Relativamente ao ensaio realizado no exterior, os valores registados às 12h são apresentados na figura 2.8 à direita. Verificou-se que na parede a sul, a qual está exposta durante um maior período de tempo à exposição solar, a temperatura superficial era inferior (cerca de 3 a 4°C) comparativamente com a temperatura superficial das paredes não evaporativas.

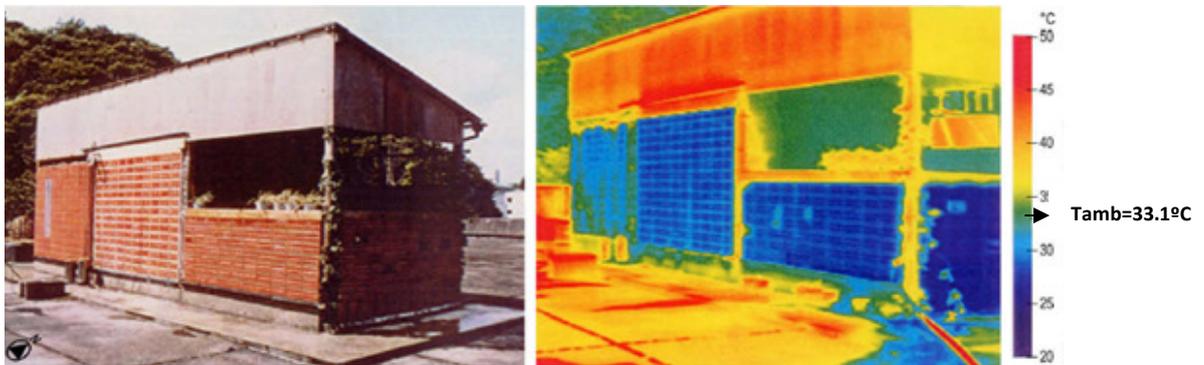


Figura 2.8 - Protótipo (esquerda) e imagem obtida por termografia num dia de agosto às 12h (direita) (He e Hoyano 2009).

Relativamente ao caso de estudo são apresentados na figura 2.9 os resultados obtidos para a situação em que a temperatura exterior tomou o valor de 32.3°C. Deste modo, ficou demonstrado que a temperatura ambiente no caso 1 diferiu cerca de 2°C comparativamente ao caso 2.

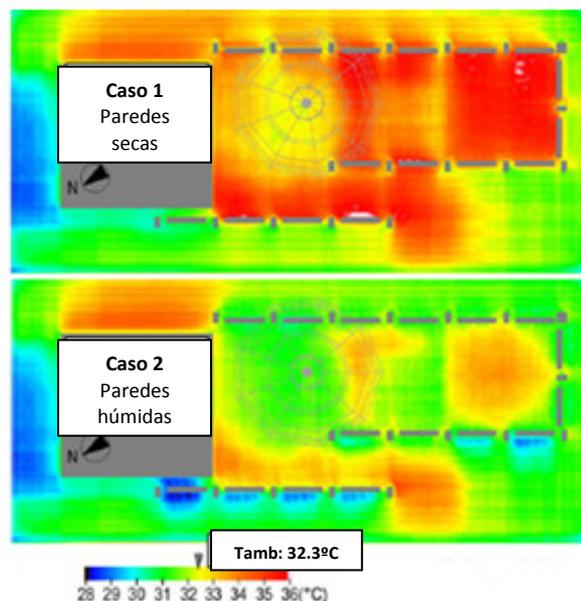


Figura 2.9 - Temperaturas superficiais nos dois casos de estudo (He e Hoyano 2009).

- **Conclusões**

Concluiu-se que este sistema evaporativo pode ser de facto eficiente, contribuindo para uma diminuição da temperatura entre 2 a 4°C comparativamente com as paredes compostas por elementos secos.

He e Hoyano (2009) concluíram também que o modelo de simulação numérica adotado poderá ser utilizado durante a fase de conceção para avaliar o potencial de arrefecimento deste tipo de sistema em ambientes urbanos.

2.4.2 Paredes constituídas por tubos cerâmicos

SUMÁRIO

Descrição: Paredes de tubos de cerâmica porosa que favorecem a absorção de água e permitem a penetração do vento. A elevada área de superfície exposta destes tubos cerâmicos, que são esbeltos e vazados, contribui para um rápido processo de evaporação, promovendo assim o arrefecimento evaporativo do ambiente circundante.

Autoria: Técnica desenvolvida pelos investigadores Jiang He da Universidade de Guangxi na China e Akira Hoyano do Instituto de Tecnologia de Tokyo no Japão (He e Hoyano 2010, He e Hoyano 2011).

Vantagens:

- Contribui para o conforto térmico de espaços exteriores, criando condições favoráveis à sua utilização durante a época quente, por exemplo, para atividades desportivas.
- Permite a reutilização da água da chuva, como água destinada à evaporação.
- Facilidade de instalação e manutenção.

Desvantagens:

- Aumento da humidade absoluta.
- A altura atingida pela água é limitada pela sucção capilar, o que resulta numa superfície de contacto limitada.

Aplicações: Aplicável, por exemplo, em espaços urbanos (em pátios, varandas, periferia de prédios e outras zonas pedestres), como é possível observar na figura 2.10. Estes são locais críticos, onde se verifica o fenómeno de “ilha de calor” decorrente da presença de edificações e das alterações constantes da paisagem. Este fenómeno ocorre sobretudo em áreas urbanas e consiste na presença de temperaturas superficiais relativamente superiores comparativamente com as registadas fora das cidades (zonas rurais ou periféricas com predominância de vegetação).



Figura 2.10 - Exemplos de aplicação do sistema de arrefecimento (He e Hoyano 2010).

- **Objetivos dos estudos desenvolvidos**

O estudo levado a cabo por He e Hoyano (2010) e He e Hoyano (2011) teve como principal objetivo investigar os efeitos da técnica de arrefecimento evaporativo, na tentativa de compreender se vale a pena utilizar tubos cerâmicos com maior capacidade de retenção de água. Como tal foram testados dois tipos de tubos. Para este fim, os autores analisaram a quantidade de água evaporada através do material cerâmico com e sem proteção solar, a ascensão capilar da água nos tubos cerâmicos, a taxa de evaporação, bem como as variações diurnas da temperatura da superfície nos tubos cerâmicos do sistema. Tudo isto foi efetuado mediante experiências conduzidas em laboratório e no exterior utilizando um protótipo com o objetivo de analisar o desempenho do sistema em termos de arrefecimento do ambiente circundante. Este estudo também permitiu averiguar a capacidade dos tubos cerâmicos resistirem a condições adversas, nomeadamente ciclos sucessivos de gelo/degelo.

- **Materiais e métodos**

Na primeira investigação experimental (He e Hoyano 2010) foram utilizados tubos de cerâmica com as características apresentadas no quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Características dos tubos cerâmicos(He e Hoyano 2010).

CARATERÍSTICAS DOS TUBOS CERÂMICOS	
Reação Química	$MgCO_3 + AL_2SiO_5(OH)_4 + SiO_2 \rightarrow Mg_2Al_4Si_5O_{18}$
Temperatura de cozedura (°C)	1250
Diâmetro interior (mm)	28
Diâmetro exterior (mm)	48
Altura (m)	1.2
Área superficial exterior (m ²)	0.18
Massa volúmica do material no estado seco (kg/m ³)	1290
Porosidade aberta (%)	47
Diâmetro dos poros (µm)	5-50
Resistência à compressão (N/mm ²)	23
Teor máximo de água absorvido, em massa (%)	30
Cor	Castanho

De acordo com He e Hoyano (2010) os poros da cerâmica constituinte destes tubos são cilíndricos e extremamente finos, com um diâmetro que varia entre 5 e 50 μm (figura 2.11). De acordo com Toya *et al.* (2007) e Okada *et al.* (2008), citado por He e Hoyano (2010), os poros são preparados de forma a estarem dispostos em paralelo. No entanto, importa salientar dois aspetos: a dimensão dos poros referida pelos autores, não corresponde à escala apresentada pelos mesmos (figura 2.11) e não é referido se estas imagens são uma representação ou correspondem a resultados obtidos por microscopia ou outra técnica.

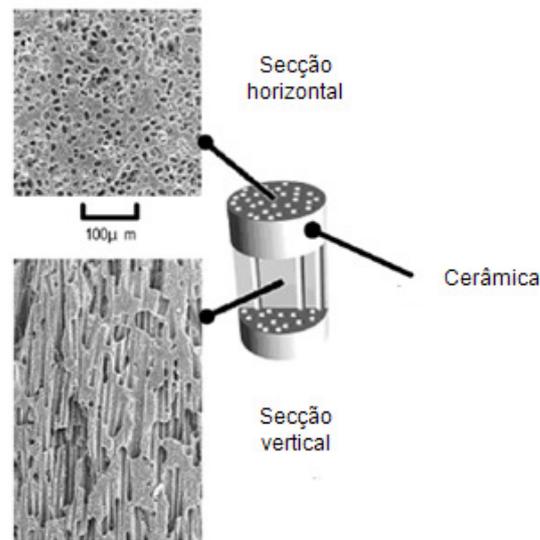


Figura 2.11 - Seções transversais da cerâmica usada no sistema de arrefecimento (He e Hoyano 2010).

Segundo He e Hoyano (2010), a seleção do material cerâmico para a realização dos ensaios teve por base a sua elevada absorção capilar. Quando os tubos cerâmicos foram expostos à radiação solar e a sua extremidade inferior foi colocada em contacto com a água, verificou-se haver uma absorção de água até uma altura superior a 100cm, enquanto que a altura máxima de absorção de água para um tubo semelhante sujeito às mesmas condições mas feito de outro tipo de material poroso, apenas atinge os 30-40 cm. Importa referir que os autores não citam que tipos de materiais porosos servem de comparação. Também se notou a falta de dados sobre o coeficiente de capilaridade do material determinado em condições controladas.

A estratégia de arrefecimento assenta na construção de paredes com estes tubos de cerâmica porosa de elevada sucção capilar. O funcionamento do sistema é esquematizado na figura 2.12. Relativamente a esta figura, existe contudo um aspeto que é pouco claro: a direção do vento e a direção dos raios solares estão a ser consideradas iguais, o que corresponde à situação mais favorável em termos de arrefecimento evaporativo, situação que é impossível de garantir que seja sempre a mesma ao longo do tempo.

O protótipo utilizado é composto por oito filas de tubos de cerâmica, cada fila constituída por 11 tubos, perfazendo um total de 88 tubos de cerâmica. Cada tubo cerâmico está assente sobre uma estrutura de aço. Os tubos foram dispostos de forma a estarem desalinhados em relação à fila precedente e à subsequente, permitindo o efeito de ventilação. O sistema foi projetado de forma a ser uma estrutura móvel, com o objetivo de se poder estudar o seu desempenho quando sujeito à

atuação do vento em diferentes direções. No caso do estudo efetuado no exterior, no topo da parede foi colocado isolamento térmico, para impedir a penetração do calor resultante da atuação direta do sol. A extremidade inferior de cada tubo cerâmico foi ligada a uma união em forma de tê (em policloreto de vinilo – PVC). A água era fornecida automaticamente através da rede de abastecimento de água e o seu nível em contacto com a parte inferior dos tubos foi mantido entre 2 e 5 cm. A figura 2.13 ilustra a disposição dos diferentes elementos no protótipo móvel utilizado e a localização dos dois pontos de medição onde foram efetuadas as leituras de temperatura e HR. O modo como foi feito o controlo da altura da água nos tubos não é descrito por He e Hoyano, assim como não está indicada na figura 2.13, a presença de isolamento térmico.

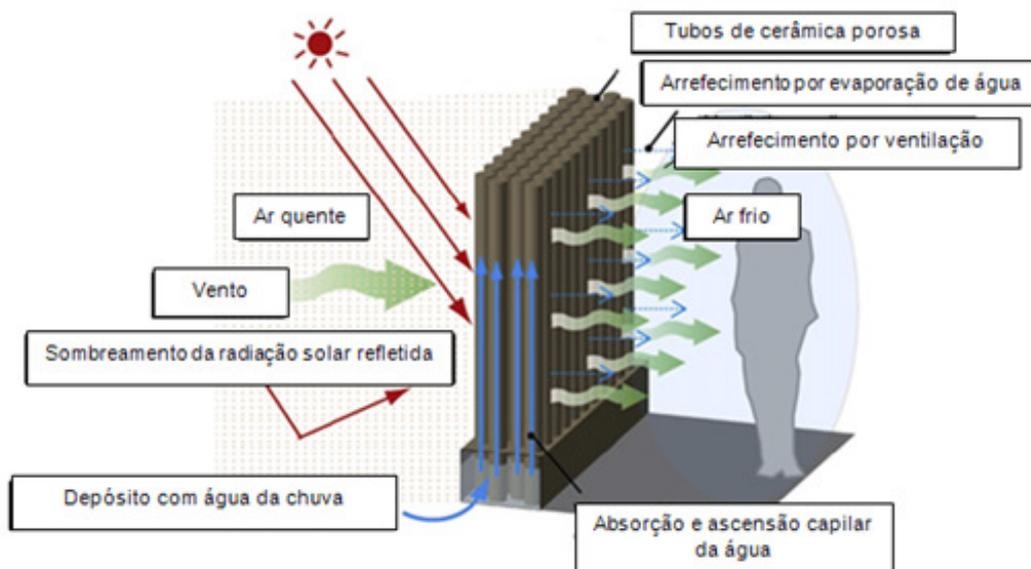


Figura 2.12 - Descrição esquemática do sistema de arrefecimento evaporativo constituído por paredes de tubos de cerâmica porosa com elevada sucção capilar (He e Hoyano 2010).

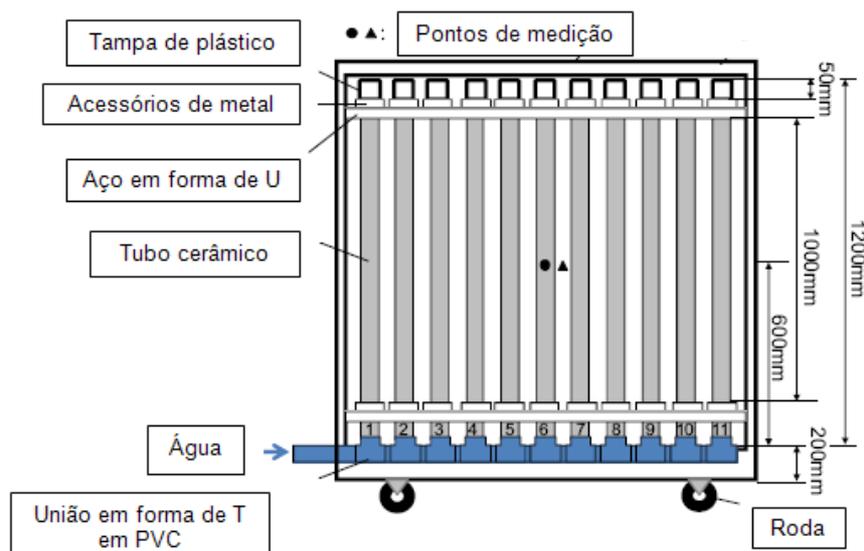


Figura 2.13 - Disposição dos diferentes elementos constituintes do sistema de arrefecimento (He e Hoyano 2010).

O estudo experimental, realizado no exterior num dia de sol de agosto, consistiu na instalação de um protótipo no telhado de um edifício de dois andares situado no Instituto de Tecnologia de Tokyo em Yokohama, no Japão, em cuja proximidade não existe nenhum edifício mais alto. Após construído o sistema, He e Hoyano (2010) efetuaram algumas medições (figura 2.14): a temperatura do ar entre b e l, a temperatura superficial em cinco pontos (s1 a s5) e a velocidade do fluxo de ar e a HR em três pontos (b, e, i), recorrendo a sondas de vento e sensores de humidade. Durante os ensaios foi efetuada a medição da temperatura do ar, assim como a temperatura superficial, a meia altura dos tubos cerâmicos (zona definida na figura 2.13 como pontos de medição). Para a obtenção das temperaturas superficiais recorreu-se à utilização de uma câmara de IV. Para a medição da velocidade e direção do vento recorreu-se ao uso de um anemómetro, o qual permite medições com elevada frequência (várias medições por segundo) das três componentes da velocidade do vento. Para a determinação dos dados meteorológicos do local onde se realizou o ensaio foram utilizados termopares, sensores de humidade e um piranómetro, para medir a intensidade da radiação solar. Durante o ensaio, os sensores de humidade efetuavam registos automaticamente a cada 60 segundos. As medições da temperatura superficial foram efetuadas de hora a hora em dias de sol. A monitorização de dados durou cerca de 5 meses. Na figura 2.15 é possível observar a localização dos vários constituintes de todo o dispositivo experimental (incluindo a localização dos equipamentos de medição).

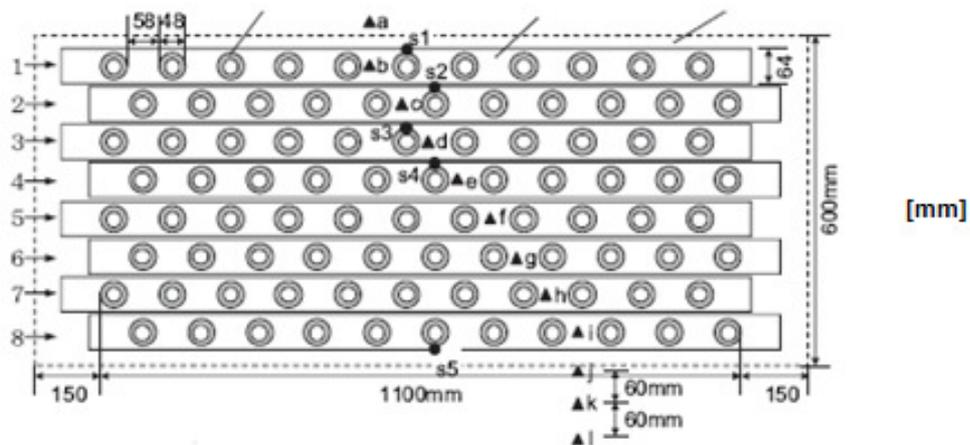


Figura 2.14 - Disposição dos tubos cerâmicos e localização dos pontos de medição (He e Hoyano 2010).



Figura 2.15 - Localização dos elementos integrantes do sistema de arrefecimento em estudo (He e Hoyano 2010).

He e Hoyano (2010) analisaram também a ascensão capilar da água através de tubos

cerâmicos sujeitos a três ambientes distintos, durante um período de 24 horas. Um tubo cerâmico foi assim colocado em três locais distintos: numa sala em que não se verificava qualquer circulação de ar, com temperatura e HR constante ($T=22^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR}=69\%$), num local bem ventilado com proteção solar e por último num local sem qualquer proteção solar. Estes ensaios foram efetuados num dia quente do mês de agosto e com sol, com ventos de baixa velocidade. A altura de penetração da água foi determinada com recurso a um equipamento de IV (“aquameter”).

Posteriormente procederam à determinação da quantidade de água evaporada através do material cerâmico. Para tal, um tubo foi imerso em água (cerca de 10 cm) numa caixa de plástico ao ar livre, durante 24 horas, num dia de verão com sol, em setembro. A extremidade superior do tubo foi coberta por uma tampa de plástico. A quantidade de água evaporada foi estimada através de pesagens do elemento, com recurso a uma balança eletrónica. As temperaturas máxima e mínima do ar verificadas durante esse dia foram de 30°C e 19°C , respetivamente. A HR média foi de 62% e a velocidade média do vento de 0.5 m/s.

Noutro estudo realizado pelos mesmos autores e no mesmo local (He e Hoyano 2011) foi adotado um sistema idêntico, apenas efetuando algumas alterações na cerâmica adotada (constituintes, menor dimensão dos poros, menores diâmetros internos e externos, e maior altura dos tubos cerâmicos) com o objetivo de determinar a sua capacidade de retenção de água. Procederam à construção de duas unidades do novo sistema (Unidades A e B). A unidade A era abastecida por água da chuva e a unidade B era abastecida por água proveniente da rede de distribuição de água. Foi também implantado no local um protótipo do sistema anteriormente utilizado (He e Hoyano 2010) que serviu como referência comparativa. He e Hoyano (2011) procederam à determinação da quantidade de água absorvida pelo tubo cerâmico. Os ensaios duraram cerca de 4 meses, tendo sido realizados entre julho e novembro. No entanto, apenas foram utilizados os dados referentes aos meses de julho, agosto e setembro. Note-se que não foi justificado pelos autores esta opção.

Neste estudo (He e Hoyano 2011) foi também analisada a capacidade resistente dos tubos cerâmicos a condições climáticas adversas, ou seja foi avaliada a possibilidade de ocorrência de alterações visíveis na sua superfície, quando estes são sujeitos a 100 ciclos de gelo/degelo (80 minutos num ambiente a -20°C /20 minutos imersos em água a 30°C) através do método de ensaio JIS A 1435 citado por He e Hoyano (2011). Para isso foram utilizados 5 tubos com as seguintes dimensões: um comprimento de 300mm, um diâmetro interno de 20mm e um diâmetro externo de 46mm. Além disso, foi também realizado um ensaio no exterior, tendo sido colocados três tubos numa caixa de plástico, imersos em água cerca de 15 a 20 cm. Estes ensaios foram efetuados numa cidade tipicamente fria do Japão (Kooriyama) entre dezembro e fevereiro.

Em ambos os estudos (He e Hoyano 2010 e He e Hoyano 2011), os autores avaliaram a eficiência de arrefecimento dos sistemas implementados, através da equação 2.1.

- **Resultados e discussão de resultados**

No primeiro estudo efetuado, He e Hoyano (2010) verificaram que o tempo necessário para o nível da água atingir os 100cm, para as três condições referidas anteriormente, foi de 18 horas, 28 horas e 32 horas, respetivamente. No caso da taxa de evaporação referente ao tubo cerâmico

Arrefecimento evaporativo de ambientes e elementos construtivos

colocado numa caixa em contacto com água, o máximo atingido foi de 932 g/dia. Já no caso do protótipo, a taxa máxima de evaporação registada foi de 2.1 kg/h e a taxa diária de evaporação foi de 20,7 kg/dia. A temperatura superficial baixou cerca de 2°C, em relação à temperatura do ar ambiente ($T=30,2^{\circ}\text{C}$). Foi também possível verificar que, para uma velocidade do vento inferior a 1m/s, a eficiência de arrefecimento atingiu o valor de 0,7.

No outro estudo efetuado por He e Hoyano (2011) foi observado que o nível de água nos tubos cerâmicos que compõem a unidade A não foi mantido constante (variando com a quantidade de precipitação), contrariamente à unidade B, que foi mantido constante, com uma altura de 200mm. Relativamente ao ensaio de ascensão capilar verificaram que a altura atingida pela água dada a capilaridade na cerâmica tomou valores superiores, cerca de 130 cm. As temperaturas superficiais registadas por He e Hoyano (2011) através dos vários sistemas instalados são apresentados na figura 2.16.

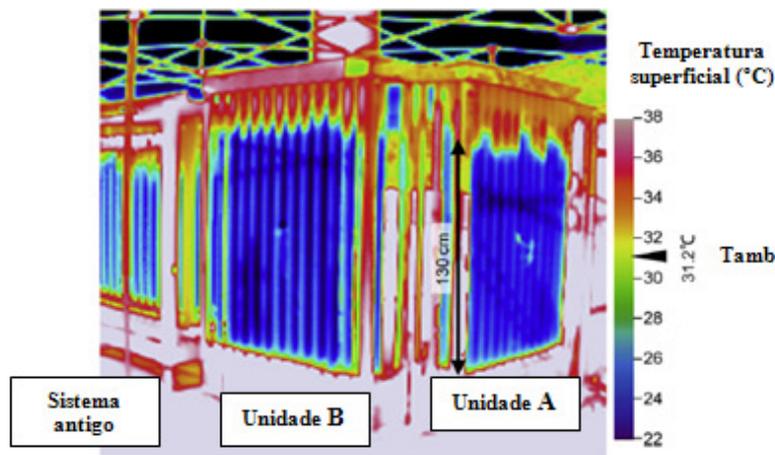


Figura 2.16 - Distribuição da temperatura superficial nos tubos cerâmicos através de uma câmara de termografia (He e Hoyano 2011).

Os resultados obtidos por He e Hoyano (2011) no ensaio realizado no exterior que tinha como objetivo avaliar a capacidade resistente dos tubos cerâmicos a condições climáticas adversas são apresentados na figura 2.17.

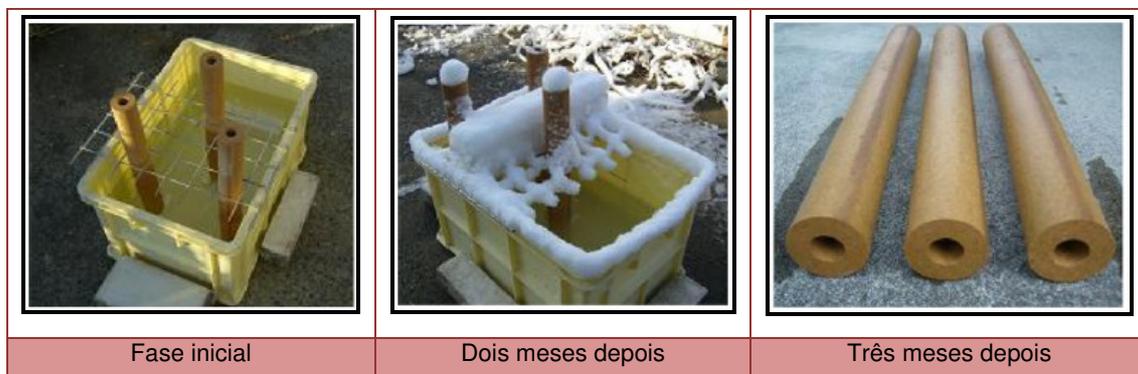


Figura 2.17 - Teste realizado no exterior para determinar o comportamento ao frio dos tubos cerâmicos (He e Hoyano 2011).

- **Conclusões**

Após a análise dos resultados, He e Hoyano (2010) concluíram que aplicando este sistema, a temperatura superficial dos tubos cerâmicos, em dias sucessivos de sol, se mantém abaixo da temperatura do ar. Foi também possível concluir que a taxa de evaporação obtida foi superior na situação em que o tubo cerâmico foi colocado num local sem proteção solar. Houve assim um aumento da evaporação em resultado tanto do aumento da radiação solar, como da velocidade média do vento. A radiação solar foi o fator que maior influência teve na taxa de evaporação, sendo que o efeito do vento variou com a sua velocidade e direção. De acordo com esta informação importa agora também estudar o comportamento em relação ao arrefecimento evaporativo de outros materiais porosos sujeitos ou não à ação do sol, através da medição da temperatura superficial e da determinação da taxa de evaporação.

Os autores puderam também concluir que, no caso em que foi utilizada a água da chuva como fonte de água para a evaporação na experiência, a superfície dos tubos cerâmicos sofreu algumas alterações estéticas devido à contaminação pela poluição atmosférica. He e Hoyano (2011) concluíram também que no estudo do comportamento ao frio, dos tubos cerâmicos a água tinha congelado mas, no entanto, os tubos cerâmicos não sofreram qualquer alteração visível. Por último os autores concluíram que o valor da eficácia de arrefecimento (equação 2.1) obtido no último estudo (He e Hoyano 2011) foi inferior, tomando o valor de 0.17, comparativamente com o estudo efetuado anteriormente, em que o valor obtido foi de 0.7 (He e Hoyano 2010), não sendo assim justificáveis as alterações, quer ao nível das dimensões dos tubos cerâmicos, quer ao nível dos constituintes da cerâmica utilizada.

2.4.3 Pulverização de água no material de isolamento térmico em caixa-de-ar ventilada

SUMÁRIO

Descrição: Fachadas ventiladas para edifícios, com inserção de um sistema de pulverização de água e uma camada de isolamento térmico adequado na caixa-de-ar ventilada. O isolamento térmico atua não só como material isolante, mas também como superfície porosa capaz de armazenar a água pulverizada pelo sistema e libertá-la sempre que seja necessário para o arrefecimento.

Autoria: Técnica desenvolvida e avaliada por B. Naticchia, M. D’Orazio, A. Carbonari e I. Persico da Universidade Politécnica de Marche em Itália (Naticchia *et al.* 2010).

Vantagens:

- Sistema capaz de reduzir os ganhos de calor por condução através das paredes, reduzindo a temperatura das mesmas e, conseqüentemente, do ambiente circundante.
- Permite economizar cerca de 40% de energia comparativamente com fachadas sem ventilação (Ciampi *et al.* 2002).

Desvantagem:

- Durabilidade limitada da camada absorvente que incorpora o sistema (ex. celulose).

Aplicações: Trata-se de uma técnica já utilizada em edifícios e que poderá ser eventualmente aplicada em telhados. No entanto, não é feita por parte dos autores qualquer referência aos locais onde já tenha sido instalado este tipo de sistema. A descrição esquemática do funcionamento do sistema é apresentada na figura 2.18.

- **Objetivos do estudo desenvolvido**

Naticchia et al. (2010) procuraram, com a realização deste trabalho, criar e avaliar um sistema capaz de reduzir os ganhos de calor por condução através das paredes, diminuindo assim a temperatura no ambiente interior.

Esta técnica foi avaliada através de ensaios laboratoriais, análise numérica e posteriormente testes (com sucesso) ao ar livre. Nos ensaios realizados, os autores procuraram estudar o comportamento de alguns materiais porosos a fim de perceber se as características isolantes e mecânicas eram mantidas, mesmo quando sujeitos a um elevado teor de água. Pretendeu-se também analisar a sua capacidade de absorção, sendo que o material isolante devia possuir a capacidade de absorver água num curto período de tempo e velocidade de evaporação.

- **Materiais e métodos**

Este tipo de sistema baseia-se em paredes duplas compostas, além dos elementos estruturais, por um revestimento impermeável aplicado no paramento interno do pano externo para evitar a absorção de água, uma caixa-de-ar ventilada equipada com sistema de pulverização de água, bem como uma camada de isolamento, de material absorvente e poroso, fixa a uma camada de regularização. Importa salientar que a localização atribuída, por parte dos autores, para a camada de impermeabilização, irá favorecer a concentração de vapor de água no interior da parede, contribuindo para a ocorrência de determinadas anomalias. Relativamente ao sistema de pulverização, este fica inativo durante a época fria e durante a época quente é programado de modo a garantir que a camada porosa está permanentemente húmida, funcionando como material evaporativo.

Foram ensaiados vários materiais porosos de isolamento, nomeadamente: painéis compostos por duas placas de lã de madeira, com lã mineral entre elas (WW+MW); painéis compostos por duas placas de lã de madeira com poliestireno expandido entre elas (WW+EPS); placas de silicato de cálcio (CS1 e CS2) de duas massas volúmicas diferentes; painéis de isolamento constituídos por celulose com duas espessuras diferentes (C1 e C2); placas de poliestireno extrudido (XPS); placas de poliestireno expandido (EPS); lã de madeira (WW) e ainda lã de fibra mineral (MF). As amostras utilizadas possuíam as características apresentadas no quadro 2.3.

Os autores optaram por utilizar materiais que reunissem condições que pudessem favorecer o arrefecimento evaporativo, nomeadamente a elevada capacidade de armazenamento de água,

elevada capilaridade e elevada permeabilidade ao vapor de água e que mantivessem, ao mesmo tempo, boa capacidade de isolamento térmico. Como tal, os autores procuraram, através da conjugação de vários materiais com diferentes características, criar sistemas compostos, a fim de avaliar o potencial de arrefecimento dos mesmos.

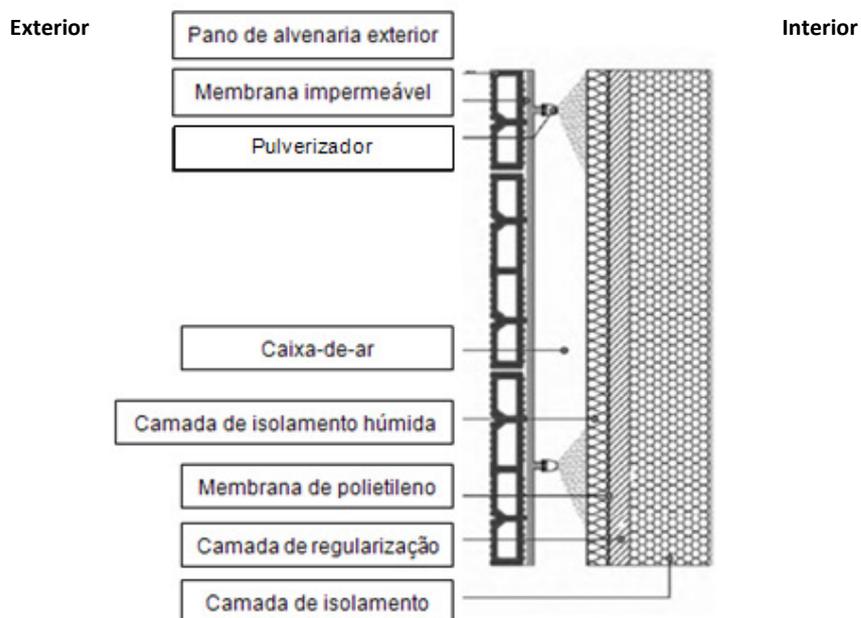


Figura 2.18 - Modelo funcional do sistema evaporativo (Naticchia et al. 2010).

Quadro 2.3 - Características dos materiais isolantes ensaiados (Naticchia et al. 2010).

Amostra	Condutibilidade Térmica (W/(m.K))	Calor específico (J/kg.K)	Coefficiente de resistência à difusão de vapor	Massa volúmica (Kg/m ³)	Espessura (m)
XPS	0.035	1300	200-90	30	0.040
CS1	0.13	1100	3/4	500	0.020
CS2	0.17	1100	3/4	875	0.013
EPS	0.03	1300	150	30	0.040
C1	*	*	4.9	*	0.030
C2	*	*	4.9	*	0.015
WW	0.078	1550	5	370	0.035
WW+MW	0.09	1550	5	370	0.035
WW+EPS	0.09	1550	5	370	0.035
MF	0.052/0.057	840	1	30	0.015

* ND- não definido

Numa primeira fase foi determinado o coeficiente de absorção de água relativamente a cada amostra. Para isso, várias amostras com as dimensões faciais de 50x50mm foram mantidas em contacto com a água e sujeitas às seguintes condições: temperatura constante de 25°C e HR constante de 50%. Estas condições foram garantidas através da utilização de uma câmara climática.

A massa foi medida em intervalos de tempo regulares (10, 20, 30, 60 minutos, 2, 4, 6 e 24 horas), com o objetivo de conhecer o valor da variação de massa (g/cm^2), de acordo com a equação 2.2.

$$W = \frac{M_f - M_i}{S} \quad \text{(Equação 2.2)}$$

Nesta equação 2.2, W corresponde à variação de massa, M_f (g) corresponde à massa final, M_i (g) representa a massa inicial e por último S (cm^2) corresponde à área de contacto da amostra com a água.

De seguida, os autores procederam à determinação do coeficiente de absorção capilar dos materiais, o qual foi determinado por aplicação da equação 2.3.

$$A_w = \frac{m_{30} - m_i}{t_{30}^{\frac{1}{2}}} \quad \text{(Equação 2.3)}$$

Na equação 2.3, m_{30} corresponde à massa (g) após 30 minutos de contacto com a água, m_i representa a massa inicial (g) e por último t_{30} corresponde ao tempo, que tomará o valor de 30 minutos.

Após o ensaio de absorção, seguiu-se a realização de um ensaio de secagem das amostras num ambiente condicionado, com temperatura a 20°C , durante 20 horas, com o objetivo de determinar a variação da massa em função do tempo.

Os resultados obtidos relativamente ao coeficiente de absorção de água foram posteriormente utilizados em simulações numéricas. Em relação à análise numérica, Naticchia et al. (2010) utilizaram o programa de Software Delphin4TM para simular e estimar o comportamento, a longo prazo, de paredes ventiladas, quando a camada isolante é submetida à pulverização cíclica de água e sujeita a determinadas condições de temperatura, HR, chuva, vento (variando a velocidade e direção) e ainda variando a intensidade da radiação, comparando o desempenho dos diferentes materiais de isolamento. Foram estudados vários tipos de isolamento térmico, sujeitos a ciclos de pulverização de água. As condições interiores a que estavam sujeitas eram 50% de HR e 24°C , e as condições exteriores eram 32% de HR e 48°C .

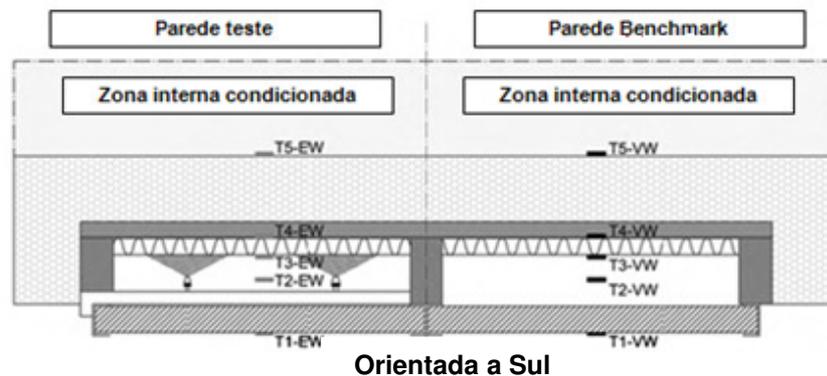
Para a investigação experimental no exterior, foram construídos dois protótipos de parede (figura 2.19), que diferiam apenas no facto de uma das paredes não ter incorporado o sistema de pulverização de água ("Parede Benchmark"). Para isso utilizou-se uma estrutura de teste constituída por (figura 2.20): uma camada de revestimento exterior composta por ladrilhos de argila extrudida (de dimensões $490 \times 240 \times 40$ mm), uma caixa-de-ar ventilada (com 75mm de espessura), uma camada que funciona como camada evaporativa no verão e isolamento no inverno, feita de silicato de cálcio (com 250mm de espessura), uma placa de madeira (com 250mm de espessura), uma estrutura de aço, uma barreira pára-vapor (folha de polietileno) e uma camada de isolamento térmico feita de poliestireno expandido (com 100mm de espessura). Note-se que sobre a parte interna da camada de revestimento exterior foi aplicado uma pintura betuminosa, com a função de impermeabilização à água. No total as paredes possuem uma espessura de 720mm. A experiência decorreu no período de

verão, durante 42 dias, em Itália. Foram assim efetuadas medições da temperatura na superfície dos diferentes materiais constituintes do protótipo de parede (figura 2.20), com recurso a termopares tipo T. No entanto, não parece muito consistente o facto de os autores terem optado por condicionar o interior, uma vez que o sistema se destina a melhorar o conforto térmico no interior. Faria mais sentido condicionar o ambiente exterior das paredes e depois ver o que acontece no interior.

O sistema de pulverização consistia num conjunto de bicos pulverizadores, distanciados 500mm entre si, distribuídos em altura, e alimentados através de uma rede de abastecimento de água. Foram testados vários sistemas de pulverização, sendo adotado o que se revelou mais eficaz, que foi o “360º Micro Sprinkler” que permite cobrir uma grande parte da superfície a curta distância.



Figura 2.19 - Estrutura de teste (Naticchia et al. 2010).



- T1-EW e T1-VW – Revestimento exterior cerâmico
- T2-EW e T2-VW – Caixa-de-ar ventilada
- T3-EW e T3-VW – Superfície da camada absorvente
- T4-EW e T4-VW – Superfície da placa de madeira
- T5-EW e T5-VW – Camada interna de isolamento

Figura 2.20 - Orientação e estrutura do protótipo (Naticchia et al. 2010).

Durante o ensaio realizado no exterior procedeu-se à medição da temperatura superficial em intervalos de 2h24m, quando ativado o sistema de pulverização ou 1h48m, quando desativado o sistema de pulverização, durante 24h, com recurso a termopares do tipo T. Estes foram colocados sobre o revestimento exterior, a meio da caixa-de-ar, sobre a superfície interna e externa da camada absorvente e na superfície interna da camada de isolamento. No exterior foram também realizados breves ensaios com o intuito de conhecer alguns aspetos relativamente à pulverização do material isolante, nomeadamente: o número mais adequado de bicos pulverizadores, o número ideal de

pulverizações diárias, a duração de cada pulverização e a temperatura da água no instante da pulverização.

- **Resultados e discussão de resultados**

Os resultados obtidos relativamente ao ganho e perda de massa dos materiais durante o ensaio preliminar, para as amostras mais significativas, isto é, amostras em que as fases de absorção e de secagem foram mais prolongadas no tempo, são apresentados na figura 2.21.

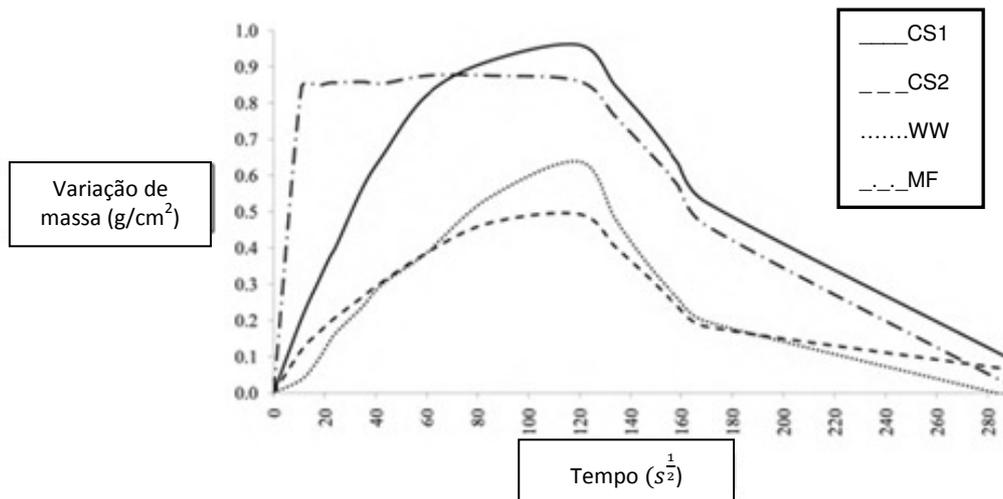


Figura 2.21 - Curva de absorção de água e de secagem (Naticchia et al. 2010).

Relativamente ao ensaio de absorção, Naticchia et al. (2010) verificaram que qualquer uma das camadas absorventes, após contacto direto com a água, apenas absorve água durante um período entre 4 a 24 horas.

Após a realização dos testes expeditos, durante o ensaio no exterior, os autores verificaram que idealmente se devem ter 3 bicos pulverizadores instalados no sistema e que estes devem ser acionados 3 vezes por dia, durante 5 minutos. A temperatura da água deve rondar os 13-15°C.

Após a análise dos resultados obtidos no ensaio no exterior, Naticchia et al. (2010) verificaram que na caixa-de-ar da parede não evaporativa a temperatura era mais elevada comparativamente com a da parede evaporativa. Tal poderia dever-se ao facto de no sistema de arrefecimento evaporativo a emissão de água no interior da caixa-de-ar minimizar o efeito da elevada radiação proveniente do exterior. Por observação dos resultados obtidos foi possível verificar também que a redução da temperatura de pico após a pulverização ronda os 5°C. No caso do silicato de cálcio atinge os 6°C.

- **Conclusões**

Naticchia et al. (2010) concluíram que a inserção de um sistema de pulverização de água contribui para uma redução significativa da temperatura das paredes, melhorando o desempenho térmico. O fluxo de ar (ascendente) que se gera no seu interior permite remover o vapor de água gerado pela mudança de fase do estado líquido para o gasoso.

A presença da camada de absorção permite que o sistema de pulverização apenas seja

ativado três vezes por dia, durante cinco minutos, pois à fase de pulverização da camada de isolamento absorvente segue-se o processo de arrefecimento evaporativo, o que garante durante mais tempo temperaturas mais baixas.

Segundo os autores, o silicato de cálcio mostrou ser um material que absorve rapidamente a água, libertando-a lentamente e ainda que, dada a baixa densidade do material, apresenta uma boa resistência à água pulverizada. A utilização deste material permitiu uma redução da temperatura de pico de 6°C. Por esta razão, foi um dos materiais selecionados para ser estudado nesta dissertação. A lã de fibra mineral, embora tenha apresentado também um elevado coeficiente de absorção de água, apresentou uma fraca resistência mecânica por ação da água da chuva, e portanto não se trata de uma solução exequível.

Por fim, Naticchia et al. (2010) reconhecem a necessidade de esclarecer algumas dúvidas que ficaram patentes, nomeadamente no sentido de perceber qual a durabilidade da camada absorvente, sujeita a condições variáveis e uma análise da qualidade do ar quando o sistema se encontra ativo (verão).

2.4.4 Utilização de materiais granulares humedecidos em coberturas

SUMÁRIO

Descrição: Utilização em coberturas planas de materiais porosos granulares (seixo, areia siliciosa, xisto silicioso e cinza vulcânica) que possuam boa capacidade de absorção de humidade e de evaporação.

Autoria: Técnica avaliada por investigadores da Universidade de Engenharia de Hokkaido no Japão, Surakha Wanphen e Katsunori Nagano (Wanphen e Nagano 2009).

Vantagens:

- Reutilização das águas pluviais.
- Comparativamente com as coberturas ajardinadas, o custo destas é menor, quer de instalação, quer de manutenção.
- Elevada durabilidade.
- A aplicação de xisto silicioso permite uma redução da temperatura média superficial até cerca de 9°C, comparativamente com materiais utilizados correntemente na construção (ex. argamassa de cimento).

Desvantagem:

- Solução construtiva a adotar apenas em locais com um clima quente e húmido.

Aplicações:

- Aplicável em coberturas planas.

- **Objetivos do estudo desenvolvido**

Wanphen e Nagano (2009) realizaram várias experiências em laboratório, com recurso a uma câmara climática, variando a temperatura, a HR e simulando a radiação solar. Tiveram como objetivo descobrir, de entre vários materiais incoerentes selecionados, qual o que permitia uma maior redução da temperatura superficial durante processos evaporativos.

- **Materiais e métodos**

Os materiais alvo de estudo foram: areia siliciosa e seixo (partículas não porosas), xisto silicioso e cinza vulcânica (partículas porosas, compostas por fragmentos de rocha). As cinzas vulcânicas e o xisto silicioso representam materiais macroporosos ($\text{Ø} \geq 50\text{nm}$) e mesoporosos ($2.0 \leq \text{Ø} < 50\text{nm}$), respetivamente. Os restantes materiais são microporosos ($\text{Ø} < 2.0\text{nm}$). Na figura 2.22 é possível observar os materiais e as suas respetivas dimensões de partícula. Note-se que não foram referidas pelos autores as dimensões das partículas de areia e de seixo.



Figura 2.22 - Materiais testados (Wanphen e Nagano 2009).

As propriedades físicas e as características dos poros que constituem os materiais são apresentadas no quadro 2.4.

Os ensaios decorreram no interior de uma câmara climática, de forma a manter uma temperatura e HR constante ($T=25^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR}=60\%$). Sujeitou-se a amostra a uma velocidade de vento de 2.5m/s para evitar o efeito de convecção vertical, a fim de manter as condições estabilizadas. Para

isso foi utilizado um “túnel de vento” como é apresentado na figura 2.23, o qual foi colocado no interior da câmara climática. A lâmpada de iodetos metálicos existente no aparelho permitiu simular a radiação solar quando necessário. O provete do material em análise era colocado numa caixa isolada termicamente, como é possível observar na figura 2.24, e posteriormente colocado sobre uma balança digital, no interior da câmara climática, que efetuava o registo do seu peso a cada minuto decorrido. Era assim testado cada provete individualmente. Os dados eram transferidos para um computador que se encontrava ligado à balança.

Quadro 2.4 - Propriedades físicas e características dos poros por análise da porometria dos materiais testados (Wanphen e Nagano 2009).

Materiais porosos	Areia siliciosa	Seixo	Cinzas vulcânicas	Xisto silicioso
Massa volúmica de partículas (kg/m ³)	2650	2800	1976	2142
Porosidade das partículas (%)	~0	0.1	81.2	60.5
Capacidade de adsorção de vapor de água (HR 60-90%) (mg/g)	~0	~0	2.0	242.4
Capacidade de absorção de água (%)	~0	~0	79.5	58.7
Diâmetro médio dos poros (nm)	~0	~0	1.8	9.4
Área superficial (m ² /g)	~0	~0	19.1	149.0
Volume de poros (cm ³ /g)	~0	~0	0.02	0.33

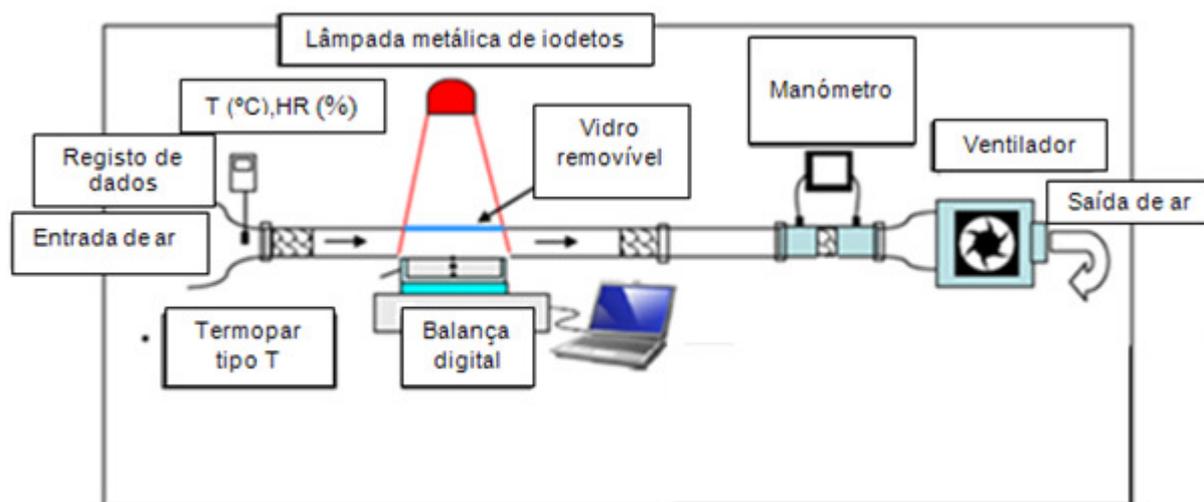


Figura 2.23 - Aparelho “túnel de vento” colocado no interior da câmara climática (Wanphen e Nagano 2009).

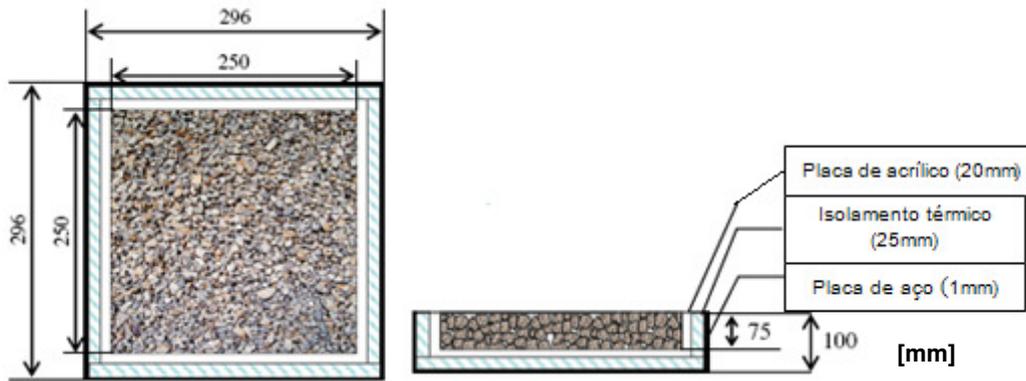


Figura 2.24 - Recipiente onde foram colocados os materiais (Wanphen e Nagano 2009).

As amostras, antes de serem colocadas no interior da câmara climática foram pulverizadas com 400g de água de forma a simular a chuva e para perceber qual a capacidade de absorção de água dos materiais. O primeiro ensaio consistiu na pesagem das amostras de 6 em 6 horas durante um período de 48 horas e na determinação da temperatura em três pontos: na superfície, no interior da amostra (a meia altura), e no fundo da amostra. As temperaturas foram medidas com recurso a termopares de tipo T (protegidos com borracha de silicone).

Seguiu-se a realização de uma nova experiência, composta por três ciclos de 24 horas (figura 2.25), perfazendo um total de 72 horas, em que houve variação da temperatura e da HR. O ensaio foi idêntico ao anterior, mas foi também simulada a ação da radiação solar, acendendo a lâmpada de iodetos existente no interior do aparelho. Antes deste segundo ensaio, as amostras foram pulverizadas com água (200g). Foi também utilizado neste ensaio argamassa de cimento, que serviu como referência porque é um material correntemente utilizado em coberturas planas.

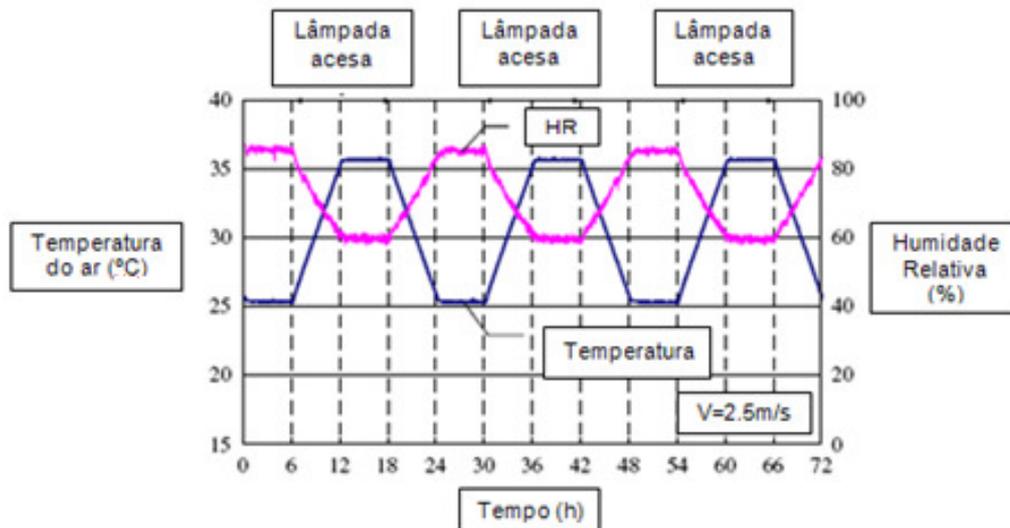


Figura 2.25 - Condições impostas na câmara durante os ciclos de ensaios (Wanphen e Nagano 2009).

- **Resultados e discussão de resultados**

Os resultados obtidos no primeiro ensaio relativamente à taxa de evaporação ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) e à média das temperaturas superficiais ($^{\circ}\text{C}$) registadas são apresentados no quadro 2.5. A correlação entre a temperatura superficial registada e a taxa de evaporação é apresentada na figura 2.26.

Quadro 2.5 – Medições de temperaturas superficiais e taxas de evaporação (Wanphen e Nagano 2009).

	Materiais					
	Areia siliciosa	Seixo	Cinzas Vulcânicas	Cinzas Vulcânicas	Xisto silicioso	Xisto silicioso
			$\varnothing < 4\text{mm}$	$\varnothing > 5\text{mm}$	$\varnothing < 4\text{mm}$	$\varnothing > 10\text{mm}$
Taxa de evaporação ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)	0.19	0.13	0.22	0.21	0.18	0.17
Média das temperaturas superficiais registadas ($^{\circ}\text{C}$)	20.1	23.8	20.6	21.6	20.6	22.3

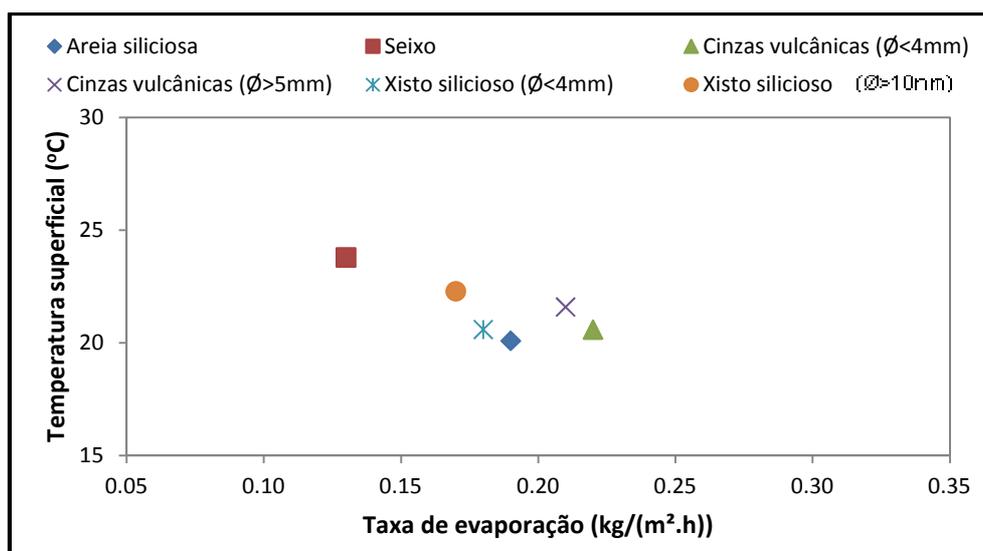


Figura 2.26 - Correlação entre a temperatura superficial registada e a taxa de evaporação (1^o Ensaio).

De acordo com os resultados obtidos, os autores verificaram que as cinzas vulcânicas apresentaram uma elevada taxa de evaporação ($0.22\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), possivelmente dada a elevada porosidade destas.

Os resultados obtidos no segundo ensaio, relativamente às temperaturas superficiais atingidas pelos materiais e às taxas de evaporação são apresentados no quadro 2.6. A correlação entre a temperatura superficial registada e a taxa de evaporação é apresentada na figura 2.27.

Quadro 2.6 - Medições de temperaturas superficiais e taxas de evaporação (Wanphen e Nagano 2009).

	Materiais						
	Areia siliciosa	Seixo	Cinzas vulcânicas Ø<4mm	Cinzas vulcânicas Ø>5mm	Xisto silicioso Ø<4mm	Xisto silicioso Ø>10mm	Argamassa de cimento
Taxa de evaporação (kg/(m ² .h))	0.28	0.25	0.28	0.30	0.23	0.29	0.11
Média das temperaturas superficiais registadas (°C)	40.5	34.8	37.7	35.4	35.0	33.2	41.7
Quantificação da redução da temperatura proporcionada comparativamente com materiais de referência (argamassa de cimento) (°C)	-1.2	-6.9	-4.0	-6.3	-6.8	-8.5	-

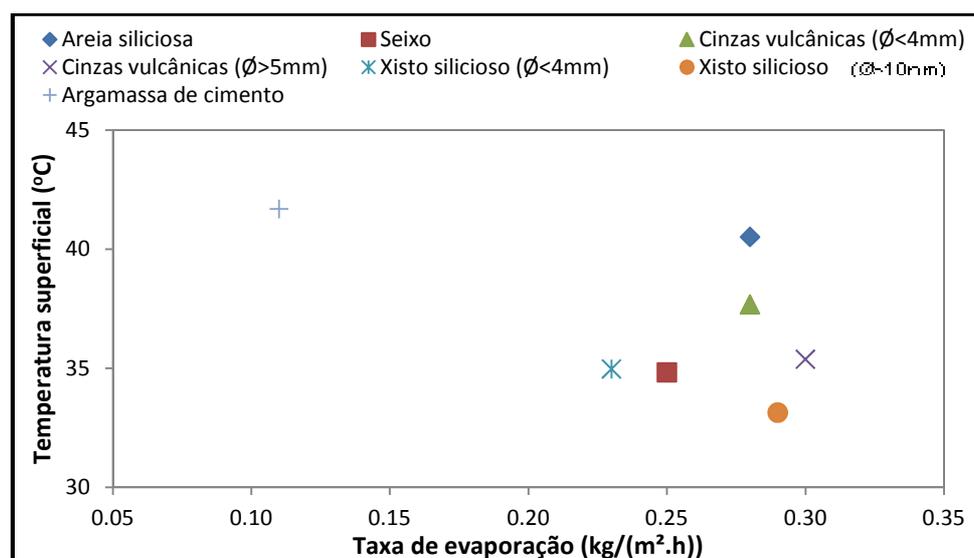


Figura 2.27 - Correlação entre a temperatura superficial registada e a taxa de evaporação (2º ensaio).

Por análise do quadro 2.6 é possível afirmar que o material que apresentou maior taxa de evaporação no 2º ensaio (0.3Kg/(m².h)) foram as cinzas vulcânicas de dimensão maior. O material que registou menor temperatura superficial (33.2°C) no 2º ensaio foi o xisto silicioso composto por partículas de maior dimensão. Por observação da figura 2.27 verifica-se que não existe qualquer correlação entre a temperatura superficial registada por um material e a sua taxa de evaporação. Também é possível verificar que qualquer dos materiais estudados permitiu obter taxas de evaporação e temperaturas superficiais inferiores comparativamente com materiais correntemente utilizados na construção, nomeadamente a argamassa de cimento. Note-se também que no caso em

que foi considerada a radiação solar (figura 2.27) obtiveram-se taxas de evaporação superiores, comparativamente com o caso em que não foi considerada a radiação solar (figura 2.26).

Wanphen e Nagano (2009) verificaram, através de uma observação visual cuidada, que embora as cinzas vulcânicas permitam armazenar uma grande quantidade de água, não são uma boa solução quando expostas à radiação solar e ao vento e quando permanecem em contacto com a água por longos períodos de tempo, pois verifica-se a degradação do material. Note-se que não foram apresentadas pelos autores quaisquer imagens que permitam comprovar tal facto.

- **Conclusões**

Wanphen e Nagano (2009) concluíram então que quanto maiores os espaços entre as partículas, maior será a penetração da radiação solar e a ventilação dos espaços, e consequentemente haverá um aceleração do processo evaporativo e uma diminuição da temperatura superficial. A cor dos revestimentos utilizados na construção também influencia a temperatura superficial, tendo os seixos (brancos) apresentado um acentuado decréscimo da temperatura. As cinzas vulcânicas (materiais macroporosos) apresentaram um bom potencial de arrefecimento, pois são capazes de absorver grandes quantidades de água, dada a elevada capilaridade e pelo facto de apresentarem também a maior taxa de evaporação. No entanto, trata-se de um material que, quando exposto à radiação solar direta, quando sujeito à ação do vento e quando está em contacto com a água por longos períodos de tempo, degrada-se facilmente. Deste modo, seria também interessante estudar o comportamento de outros materiais incoerentes, preferencialmente macroporosos, que eventualmente pudessem ser utilizados em “evaporative pads”. Em termos comparativos, nesta dissertação seria importante na campanha experimental também utilizar cinzas vulcânicas; no entanto não se dispunha deste material. A utilização de materiais porosos em coberturas é assim mais benéfica em termos de arrefecimento, comparando com materiais utilizados correntemente (como por exemplo, a argamassa de cimento por exemplo em betonilhas). O xisto silicioso apresentou um melhor comportamento, comparativamente com os outros dois materiais, que não são porosos, pois tem a capacidade de armazenar água no interior dos poros, durante um período de precipitação, a qual posteriormente evaporará, libertando calor latente para a atmosfera, nos períodos mais quentes.

2.4.5 Síntese do capítulo

A informação recolhida nesta análise bibliográfica ajudou também à escolha dos materiais e à definição dos procedimentos a utilizar no trabalho experimental desta dissertação, que tinha como objetivo avaliar o potencial de arrefecimento do ambiente de materiais porosos humedecidos.

- Os materiais alvo de estudo nos trabalhos analisados foram: vários tipos de cerâmica porosa (He e Hoyano 2009, He e Hoyano 2010, He e Hoyano 2011), areia siliciosa, seixo, xisto silicioso e cinzas vulcânicas (Wanphen e Nagano 2009). Também foram alvo de estudo do desempenho de arrefecimento, fachadas ventiladas com um sistema de pulverização

incorporado (Naticchia *et al.* 2010). Os resultados apresentados por estes autores justificam assim, juntamente com a disponibilidade de materiais, que fosse estudado na parte experimental desta dissertação o potencial de arrefecimento de materiais rígidos e granulares como o tijolo cerâmico, a areia siliciosa e o silicato de cálcio.

- Os ensaios de evaporação realizados consistiram, num caso (He e Hoyano 2010) em colocar a parte inferior da amostra em contacto com a água (cerca de 10% da altura da amostra), sendo a quantidade de água evaporada depois estimada através de pesagens. Noutro caso (Wanphen e Nagano 2009) as amostras foram pulverizadas, com uma massa de água pré-definida, procedendo-se posteriormente também a sucessivas pesagens, de modo a estimar a taxa de evaporação. Também na campanha experimental desta dissertação se irão realizar ensaios em que a taxa de evaporação será avaliada através de pesagens sucessivas dos provetes.
- Os fatores de influência avaliados (He e Hoyano 2009, He e Hoyano 2010, He e Hoyano 2011, Naticchia *et al.* 2010. e Wanphen e Nagano 2009) foram a temperatura e HR que variavam de acordo com as condições climáticas pretendidas, na tentativa de simular diversos ambientes. A radiação solar também foi um fator tido em consideração, tendo sido estudada a sua atuação através da ausência ou não de sombreamento (He e Hoyano 2010) ou simulada através de uma lâmpada de iodetos (Wanphen e Nagano 2009). Por conseguinte, para o estudo desta dissertação optou-se por avaliar o comportamento evaporativo de diversos materiais, sujeitos a condições ambientais (T e HR) controladas ou expostos a condições exteriores de verão (com ou sem incidência direta do sol sobre os materiais).
- Relativamente aos parâmetros medidos, a velocidade do vento foi controlada com recurso a anemómetros e a HR, avaliada através de sensores de humidade (He e Hoyano 2010). A temperatura superficial foi medida com recurso a termopares (He e Hoyano 2010, He e Hoyano 2011, Naticchia *et al.* e Wanphen e Nagano 2009) ou com recurso a uma câmara de IV (termografia) (He e Hoyano 2009, He e Hoyano 2010, He e Hoyano 2011 e Naticchia *et al.* 2010). No entanto, embora no estudo efetuado por Wanphen e Nagano (2009) tivessem sido utilizados termopares do tipo T em materiais incoerentes, na presente dissertação optou-se por utilizar um equipamento de IV que permite a leitura da temperatura superficial sem contacto direto.

Em suma, da bibliografia analisada foi possível retirar as conclusões principais que se apresentam no quadro 2.7.

Quadro 2.7 - Principais conclusões retiradas da bibliografia analisada.

Autores e data	Tema	Principais conclusões no presente enquadramento
He e Hoyano (2009)	Paredes ventiladas constituídas por tijolo furado humedecido	O sistema evaporativo avaliado é de facto eficiente, contribuindo para uma diminuição da temperatura superficial entre 2 a 4°C, comparativamente com as temperaturas superficiais registadas nas paredes compostas por elementos secos. Em relação à temperatura ambiente (33.1°C) permite uma redução de 4°C.
He e Hoyano (2010) He e Hoyano (2011)	Paredes constituídas por tubos cerâmicos	A temperatura superficial nos tubos cerâmicos humedecidos, em dias sucessivos de sol, mantém-se abaixo da temperatura do ar (cerca de 2°C), a qual tomou o valor de 30.2°C.
Naticchia et al. (2010)	Pulverização do material de isolamento térmico em caixa-de-ar ventilada	O silicato de cálcio mostrou ser um material que absorve rapidamente a água e liberta-a lentamente; dada a baixa massa volúmica do material apresenta uma boa resistência à água pulverizada. Este material permitiu uma redução da temperatura superficial de 2°C em relação à temperatura ambiente (22.8°C).
Wanphen e Nagano (2009)	Utilização de materiais granulares humedecidos em coberturas	Relativamente à diminuição da temperatura proporcionada pela utilização dos materiais estudados, verificou-se que em dias quentes de verão o xisto silicioso permite uma redução da temperatura superficial de cerca de 9°C e o seixo branco permite uma redução de aproximadamente 7°C comparativamente com materiais utilizados correntemente (como por exemplo a argamassa de cimento).

3 Campanha Experimental

3.1 Introdução

A campanha experimental teve como base a realização de ensaios laboratoriais em condições controladas e de ensaios no exterior, para avaliar o potencial de arrefecimento evaporativo de materiais porosos selecionados. Estes materiais são, nuns casos, usualmente utilizados em elementos horizontais (como por exemplo em coberturas planas) e, noutros casos, utilizados em elementos verticais (como por exemplo paredes). A escolha dos materiais teve, como principal critério de seleção, a elevada porosidade aberta destes. A secagem está diretamente relacionada com a porosidade aberta, uma vez que é através deste tipo de poros que o transporte de água se efetua, bem como a ligação com o exterior (Pereira 2008). Realizaram-se vários ensaios de evaporação com monitorização da temperatura superficial (secção 3.3), nomeadamente: ensaios preliminares para avaliação da emissividade devido a diferenças de cor entre materiais no estado seco e materiais no estado húmido (ensaio A), ensaios de secagem para avaliação do arrefecimento evaporativo, numa sala condicionada a 20°C e 50% de HR (ensaio B) e no exterior (ensaio C).

Neste capítulo são descritas as metodologias e procedimentos relativos à preparação dos provetes e à realização dos ensaios, e discutidos os resultados obtidos.

3.2 Materiais

3.2.1 Caraterísticas

A seleção dos materiais que foram alvo deste estudo experimental foi influenciada tanto pela informação recolhida aquando da pesquisa bibliográfica, como pelos resultados obtidos no decorrer do projeto de investigação DRYMASS.

Assim sendo, este trabalho incidiu sobre o estudo de 10 materiais distintos e sobre a água destilada, sendo 5 materiais coerentes de construção corrente (pedras naturais, tijolo cerâmico, silicato de cálcio e argamassa de cal aérea) e 5 materiais incoerentes (areia siliciosa de três granulometrias diferentes, celulose e serradura). As caraterísticas dos materiais são descritas no quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Descrição dos materiais.

Material		Designação	Descrição	
Calcário bege		CB	O calcário de cor bege é uma pedra calcária portuguesa de porosidade intermédia (Gonçalves <i>et al.</i> 2012).	
Areia siliciosa	Fina	A-V	0.08 – 0.16mm (fração V)	Areia siliciosa normalizada segundo a NP EN 196-1.
	Média	A-IV-A	0.30 – 0.50mm (fração IV-A)	
	Grossa	A-I	1.60 - 2.00mm (fração I)	
Calcário “Maastricht”		M	Pedra calcária de cor amarelada, proveniente da Holanda (Gonçalves <i>et al.</i> 2012). Trata-se de uma pedra composta por microfósseis e por compostos de carbonato microcristalino (De Clercq <i>et al.</i> 2012).	
Argamassa de cal aérea		A	A argamassa de cal aérea possui um traço de 1:3 (em volume) e a sua preparação seguiu a EN 1015-2 e a moldagem e cura a EN 1015-11 (Gonçalves <i>et al.</i> 2012).	
Tijolo cerâmico maciço		T	O tijolo cerâmico maciço de cor vermelha é fabricado em Portugal pela cerâmica de Vale de Gândara (Gonçalves <i>et al.</i> 2012).	
Silicato de cálcio		CS L500	O silicato de cálcio, material de cor branca, de referência Promatect – L500 foi cedido pela Promat.	
Celulose		C	Pasta branca de papel cedida pela Soporcel e posteriormente moída. A moagem foi efetuada por uma bolseira do projeto DRYMASS, com recurso a um moinho de cruz batidora SK100 da Retsch, com uma potência de 1100W. Procedeu-se a dois ciclos de moagem e a malha (quadrada) do moinho utilizada tinha uma dimensão de 1.5mm.	
Serradura		S	Subproduto resultante do corte da madeira, composto por partículas finas, com dimensão ≤ 1 mm. A determinação da granulometria das partículas foi efetuada por uma técnica, realizando o ensaio de peneiração, com recurso a uma série de peneiros ASTM de malha quadrada. Este material foi cedido pela carpintaria existente no LNEC.	
Água destilada		AD	-	

Em particular, teve-se em consideração os critérios de seleção dos materiais que a seguir se apresentam.

Materiais coerentes:

- **Pedras naturais**

As pedras naturais selecionadas (calcário “Maastricht” e calcário bege) distinguem-se sobretudo pelo nível distinto de porosidade que apresentam. Estudos realizados anteriormente, nomeadamente Gonçalves *et al.* (2012), mostram que a taxa de evaporação destes materiais durante

a primeira fase de secagem difere da taxa de evaporação que ocorre numa superfície livre de água. Para o calcário “Maastricht” esta taxa é mais elevada e para o calcário bege mais reduzida, respetivamente, do que a da superfície de água. Segundo De Clercq *et al.* (2012) a elevada porosidade média do calcário Maastricht, 47,5%, e as dimensões dos poros, têm um enorme contributo para a elevada taxa de evaporação apresentada por este material. Na figura 3.1 é possível observar o calcário “Maastricht” (esquerda) e o calcário bege (direita).

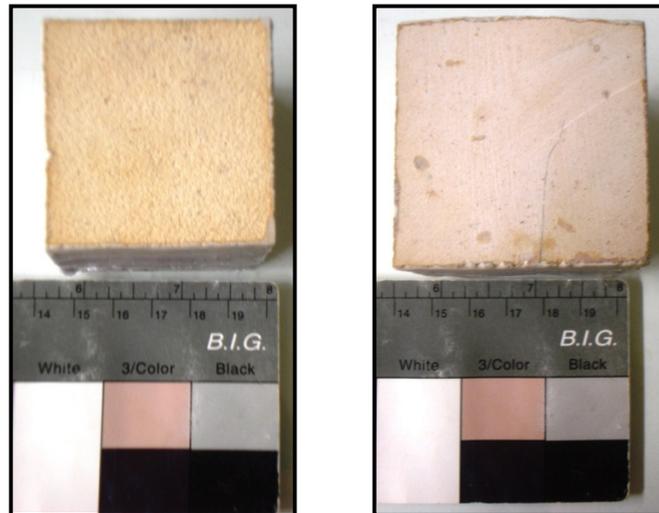


Figura 3.1 - Pedras naturais: calcário "Maastricht" (esquerda) e calcário bege (direita).

- **Tijolo cerâmico**

O material cerâmico (figura 3.2) é utilizado desde há muito tempo para o arrefecimento evaporativo de espaços, como já foi referido anteriormente neste trabalho. Também estudos atuais demonstraram o grande potencial de arrefecimento evaporativo deste material, nomeadamente os de He e Hoyano (2009), He e Hoyano (2010) e He e Hoyano (2011). Considerou-se, assim, importante estudar o comportamento também do tijolo cerâmico, exemplo deste tipo de material, no âmbito do presente trabalho.



Figura 3.2 - Tijolo cerâmico.

- **Argamassa de cal aérea**

A utilização da argamassa de cal aérea (figura 3.3) neste estudo deve-se ao facto deste material apresentar não só uma elevada absorção capilar, como também uma elevada permeabilidade ao vapor de água, facilitando a evaporação de água que se encontra no seu interior (Faria 2004). Deste modo contribui para um aceleração do processo de secagem, favorecendo assim o arrefecimento evaporativo.



Figura 3.3 - Argamassa de cal aérea.

- **Silicato de cálcio**

O silicato de cálcio (figura 3.4) foi também um material alvo de estudo neste trabalho, uma vez que, segundo o artigo referido anteriormente, de Naticchia et al. (2010), este material apresenta características que favorecem o arrefecimento evaporativo.

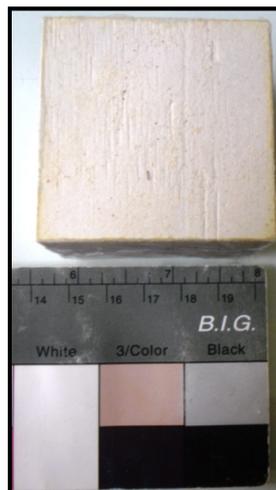


Figura 3.4 - Silicato de cálcio.

Materiais incoerentes:

- **Areia siliciosa**

Neste trabalho estudou-se também o comportamento de materiais incoerentes, nomeadamente areias siliciosas com três tipos de granulometria distintas. Anteriormente também já foram efetuados estudos que apresentam resultados satisfatórios deste tipo de material neste âmbito, tais como o de Wanphen e Nagano (2009). Na figura 3.5 é possível observar os diferentes tipos de granulometria de areia siliciosa utilizada.

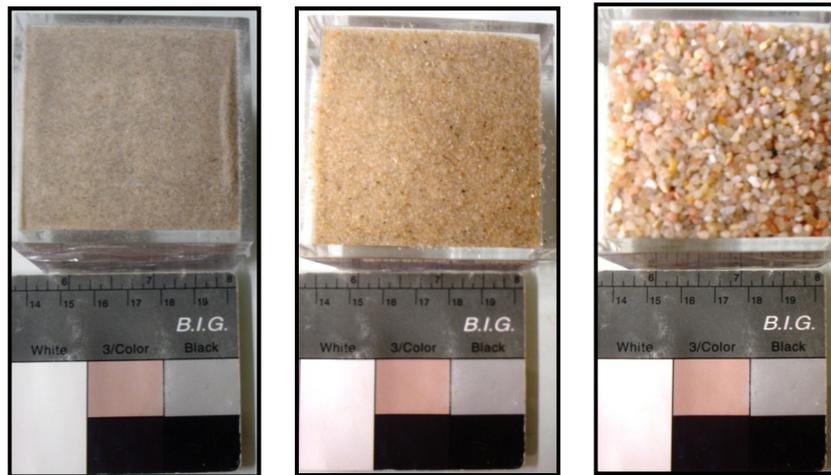


Figura 3.5 - Areia siliciosa de: granulometria fina (esquerda), granulometria média (centro) e granulometria grossa (direita).

- **Celulose**

A celulose (figura 3.6) é um material que, para além de ser capaz de absorver água e permitir a evaporação, é também um material económico, eficiente e leve (Malli 2011). Este material, constituído por fibras soltas, serve como meio de contacto com a água em dispositivos de arrefecimento por evaporação (“evaporative pads”), contribuindo para a conservação energética dos edifícios, tendo assim sido utilizado neste trabalho como elemento de referência.



Figura 3.6 - Celulose.

- **Serradura**

A serradura (figura 3.7) trata-se de um material incoerente, cujo comportamento evaporativo não é conhecido. Devido à sua natureza porosa e também ao facto de poder apresentar vantagens em termos de aproveitamento de resíduos, considerou-se interessante proceder ao seu estudo nesta dissertação.



Figura 3.7 - Serradura.

- **Água destilada**

A água destilada (figura 3.8) serviu como elemento de comparação com os restantes materiais, relativamente à capacidade de evaporação. Contrariamente ao que se pensa normalmente, há trabalhos, como por exemplo Tournier *et al.* (2000), Rousset-Tournier (2001) e Gonçalves *et al.* (2012), que mostram que a água não é garantidamente o elemento que apresenta uma maior taxa de evaporação comparativamente com os materiais porosos.



Figura 3.8 - Água destilada.

Para caracterizar a absorção de água dos vários materiais coerentes, foram utilizados os resultados obtidos no âmbito do projeto DRYMASS (Gonçalves *et al.* 2012). No entanto, esse estudo não incluía o calcário “Maastricht”. O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com o procedimento II.6 da RILEM (1980). A quantidade de água absorvida por unidade de superfície (M_w) ao fim de um determinado tempo (t), em kg/m^2 , obteve-se dividindo a diferença entre a massa do provete num determinado instante t (M), em kg, e a massa do provete no estado seco (M_0), em kg, pela área da face do provete em contacto com a água (S), em m^2 , de acordo com a equação 3.1.

$$M_w = \frac{M - M_0}{S} \quad (\text{Equação 3.1})$$

De seguida, procedeu-se ao traçado de um gráfico expressando a quantidade de água absorvida por unidade de área (kg/m^2) em função da raiz quadrada do tempo ($\text{h}^{1/2}$). A partir do primeiro troço linear reto da curva obtida, que se designa por curva de absorção capilar, obteve-se o coeficiente de absorção capilar ou coeficiente de capilaridade que corresponde à inclinação do troço. No caso do calcário Maastricht, o valor do coeficiente de absorção capilar, determinado por Slízková e Frankeová (2012) através de ensaios laboratoriais, é apresentado no quadro 3.2. No entanto, o procedimento utilizado não é conhecido.

A porosidade capilar (%) dos vários materiais também foi avaliada no âmbito do projeto DRYMASS (Gonçalves *et al.* 2012), seguindo aproximadamente o procedimento II.1 da RILEM (1980). A porosidade capilar foi estimada de acordo com a equação 3.2.

$$\text{Porosidade capilar} = \frac{V_w}{V_s} \times 100 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Em que V_w é o volume de água absorvida após 48 horas de imersão de cada material e V_s corresponde ao volume de cada amostra. Este volume foi medido com recurso a uma craveira digital.

A dimensão dos poros foi determinada através de porosimetria por intrusão de mercúrio (MIP) com o equipamento Autoscan60 da Quantachrome, numa faixa de pressão entre 0 e 320Mpa, seguindo a norma ASTM D4404-84, sendo as determinações sempre repetidas (Brito e Gonçalves 2013). Não foi possível obter a curva de porometria do calcário Maastricht, dada a enorme variabilidade da dimensão dos poros deste (De Clercq *et al.* 2013), pois não se dispunha de equipamento específico para a determinação da mesma. O ensaio consiste na aplicação de pressão sobre o mercúrio, de modo a que este penetre nos poros. A partir do volume de poros penetrado pelo mercúrio e respetiva pressão aplicada, é traçada a curva de porometria.

Assim, os materiais coerentes utilizados nesta tese apresentam as características indicadas no quadro 3.2 e na figura 3.9, que reportam a sua porosidade capilar, coeficiente de capilaridade e porometria.

Quadro 3.2 - Características dos materiais coerentes.

Material	Designação	Porosidade Capilar (% volume)	Coefficiente de Capilaridade (kg/m ² .h ^{1/2})
Calcário bege	CB	13.5 ± 0.9 ⁽¹⁾	0.043 ± 0.005 ⁽¹⁾
Calcário “Maastricht”	M	42.7 ± 1.2 ⁽²⁾	0.17 ⁽⁵⁾
Argamassa de cal aérea	A	20.8 ± 0.4 ⁽²⁾	0.13 ± 0.01 ⁽³⁾
Tijolo cerâmico	T	19.6 ± 0.2 ⁽¹⁾	0.13 ± 0.01 ⁽¹⁾
Silicato de cálcio	CS L500	81.3 ± 0.7 ⁽⁴⁾	0.6 ± 0.06 ⁽⁴⁾

(1) Gonçalves *et al.* (2012)

(2) Brito e Gonçalves (2013)

(3) Brito *et al.* (2011)

(4) Valores determinados no âmbito do projeto DRYMASS, mas que não foram ainda publicados.

(5) Slízková e Frankeová (2012)

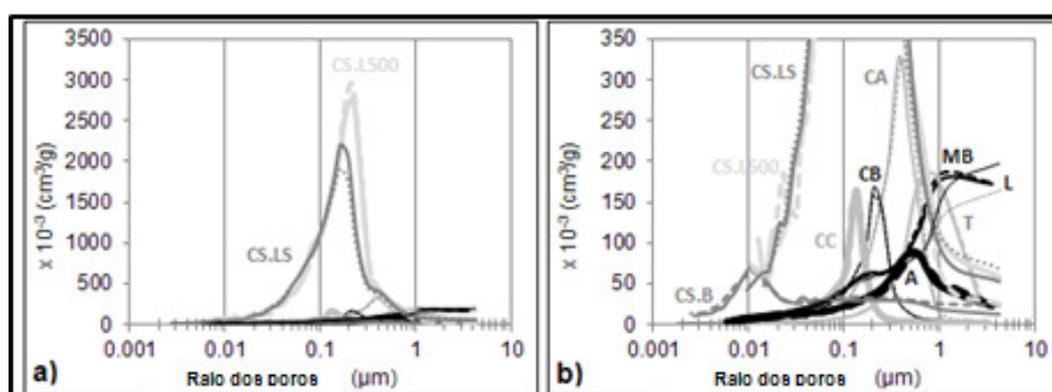


Figura 3.9 - Curvas de porometria dos materiais coerentes: CS L500, CB, A e T, determinadas através do MIP (Brito e Gonçalves 2013).

3.2.2 Provetes

As pedras naturais e o tijolo cerâmico foram cortados em provetes de duas dimensões diferentes, consoante os ensaios efetuados. Com recurso a uma máquina de corte (figura 3.10) foram cortados provetes cúbicos de CB, T e M com as dimensões de 50x50x50mm (utilizados nos ensaios de secagem) e provetes prismáticos com as dimensões de 50x50x5mm (utilizados no ensaio preliminar para determinação dos valores de emissividade dos materiais). No caso do CS L500 também se procedeu ao corte de provetes com duas dimensões diferentes, nomeadamente 50x50x35mm, uma vez que a espessura da placa original era de 35mm, não permitindo portanto obter provetes cúbicos com 50 mm de aresta, e 50x50x5mm para o ensaio preliminar. A utilização de materiais de dimensão menor no ensaio preliminar deveu-se simplesmente ao facto de assim se poder minimizar os recursos materiais utilizados, dado que os provetes de dimensões maiores estariam a ser utilizados para outros ensaios. Relativamente ao material A, utilizaram-se apenas provetes com as dimensões de 50x50x50mm, por se tratar de um material bastante frível, que não se consegue cortar.



Figura 3.10 - Máquina de corte.

Após o corte dos materiais, estes foram colocados numa estufa a 60°C (figura 3.11) durante 24h para garantir que se encontrariam secos quando se procedesse à sua impermeabilização.



Figura 3.11 - Estufa.

Cada provete foi impermeabilizado nas quatro faces laterais que possui (figura 3.12) com uma Resina Epoxi (Icosit K101 da Sika). A resina foi aplicada em duas camadas cruzadas, com um intervalo entre demãos de aproximadamente 24 horas. Optou-se pela utilização desta resina uma vez que apresentou bons resultados em trabalhos anteriores realizados no LNEC, pois é impermeável à água, não escorre durante a aplicação e não migra para o interior do provete.



Figura 3.12 - Impermeabilização lateral dos provetes.

Os materiais incoerentes (areias, serradura e celulose) e a água foram colocados em caixas de acrílico transparente com dimensões interiores de 50x50x35mm (ensaio preliminar) ou

50x50x50mm (ensaios de secagem). No caso dos materiais (à exceção da água) a base das caixas foi previamente perfurada para permitir a absorção capilar e no seu interior foi colocado um papel de filtro para evitar a perda de material através dos furos.

3.3 Medição da temperatura superficial

3.3.1 Método

Em todos os ensaios realizados procedeu-se à medição da temperatura superficial dos materiais para perceber quais os que poderão apresentar um maior potencial de arrefecimento do ambiente. Para proceder a essas medições recorreu-se ao uso de um equipamento específico, um “pirómetro de IV” (figura 3.13), também denominado “pistola de IV” ou “termómetro de IV”, o qual mede a quantidade de radiação infravermelha emitida por um objeto e posteriormente calcula a temperatura superficial do objeto. Note-se que a radiação infravermelha é caracterizada por comprimentos de onda longos e de baixa frequência. Foi utilizado o pirómetro modelo RAYMX4PG, da marca Raytek. Trata-se de um equipamento capaz de efetuar medições de temperatura num intervalo de -30°C a 900°C , podendo ser utilizado para comprimentos de onda sensivelmente entre 8 a $14\mu\text{m}$. De acordo com o manual, apresenta uma precisão de 75% do valor lido ou $\pm 1^{\circ}\text{C}$, sendo válido o maior destes valores (RAYTEK – Manual de utilização do Pirómetro MX4).



Figura 3.13 - Pirómetro de IV da Raytek.

O campo de medição dos pirómetros de IV depende da distância focal e do diâmetro da lente. O sistema ótico do aparelho capta toda a radiação dos objetos que estão no seu campo de visão, tendo sido selecionada a opção “AVG” em que o valor registado corresponde à média das temperaturas verificadas. De acordo com o manual do equipamento (RAYTEK – Manual de utilização do Pirómetro MX4), o tamanho da área de medição depende da distância entre o objeto e o pirómetro. No ponto de foco, a relação entre a distância e o diâmetro desta área (D:S) é de 60:1 [mm] (ou de 35:1 para grandes distâncias, isto é, superiores a 10m).

Nesta dissertação, as medições foram efetuadas com o equipamento posicionado na perpendicular em relação ao material, no centro da face superior do provete e a uma distância de 350mm relativamente à sua face superior. Então à distância de 350mm, a área de medição terá pois um diâmetro de 5,83mm, bastante inferior portanto à área superficial dos provetes, que é um

quadrado de 50mm de lado. Procedeu-se assim corretamente à medição da temperatura superficial dos materiais (figura 3.14 – situação definida como alínea a)).

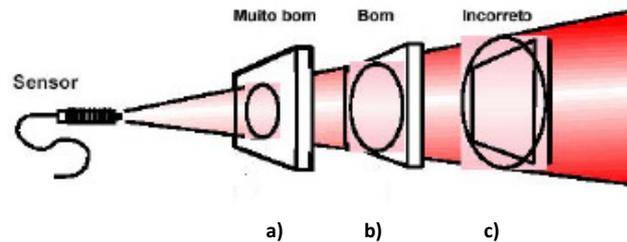


Figura 3.14 - Área de influência na medição da temperatura com recurso a um pirómetro de IV (Infratemp 2010).

A utilização do método adotado é vantajosa pois trata-se de um método não destrutivo, simples e comprovado, prático e que não necessita de contacto direto com o material. Comparativamente com a termografia é um método mais prático no caso de estarmos perante superfícies regulares, com uma área superficial relativamente reduzida e em condições uniformes de evaporação. Isto porque este método de medição permite efetuar facilmente leituras da temperatura superficial em materiais dispostos tanto em plano vertical como em plano horizontal e permite também efetuar leituras rápidas, uma vez que não exige uma pré-montagem do dispositivo de medição.

O único parâmetro que o aparelho exige que lhe seja fornecido, para que o valor da radiação infravermelha emitida pela superfície do material (E) seja convertido no valor da temperatura superficial do material, é o valor da emissividade do material. Isto porque a quantidade de energia infravermelha emitida por um objeto depende da sua emissividade e da sua temperatura. Por sua vez, a emissividade depende do material e das características da sua superfície (RAYTEK – Manual de utilização do Pirómetro MX4). Superfícies lisas ou brilhantes (refletantes) apresentam valores de emissividade inferiores, comparativamente com as superfícies rugosas e não-refletantes, que são o caso dos materiais em estudo.

Em termos teóricos, a emissividade, geralmente designada “ ϵ ”, é definida, de acordo com Henriques (2011), como a relação entre a radiância (E) de um corpo corrente e a de um corpo negro (E_0) - corpo em que toda a radiação é absorvida, não existindo qualquer radiação refletida (equação 3.3). A emissividade é pois considerada como uma medida da eficiência com que um corpo emite energia comparativamente com um corpo negro.

$$\epsilon = \frac{E}{E_0} \quad \text{(Equação 3.3)}$$

A radiância (E), também designada por poder emissivo total de um corpo (em W/m^2), é um parâmetro que permite quantificar a energia total emitida por unidade de superfície. De acordo com

Henriques (2011), a lei de Stefan-Boltzman surgiu primeiramente como a forma de determinar a radiação total emitida por um corpo real (radiância), à temperatura T (equação 3.4).

$$E = \varepsilon \times \sigma \times (T + 273.15)^4 \quad (\text{Equação 3.4})$$

Na equação 3.4, ε parâmetro adimensional, representa a emissividade do material, σ representa a constante de Stefan-Boltzmann, que toma o valor absoluto de $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, e T representa a temperatura absoluta, em °C. Esta lei é de natureza experimental e foi originalmente estabelecida com base em valores empíricos. Note-se que se trata de uma lei muito precisa apenas para corpos negros, permitindo apenas a obtenção de valores aproximados para os restantes corpos. Posteriormente surgiu a lei de Planck (equação 3.5), a qual permite determinar a radiância espectral (I) em função do comprimento de onda e da temperatura de um corpo negro. Importa referir que a lei de Stefan-Boltzman pode ser obtida por derivação (em ordem ao comprimento de onda) da lei de Planck. Há que salientar também que a emissividade é um parâmetro que pode variar consoante o comprimento de onda que está a ser considerado, tendo esse aspeto não sido menosprezado neste trabalho.

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (\text{Equação 3.5})$$

Na equação 3.5, $I(\nu, T)$ representa a radiância espectral (em $\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$), ν representa a frequência (em Hz), T representa a temperatura do corpo negro (em K), h representa a constante de Planck (em J/Hz), c representa a velocidade da luz (em m/s), e representa o número de Euler (parâmetro adimensional) e por fim k corresponde à constante de Boltzman (em J/K).

O pirómetro de IV deve idealmente ser calibrado em relação a um corpo negro, onde a energia irradiada é máxima ($\varepsilon=1$). Quando a medição é efetuada em corpos com emissividade diferente da emissividade de um corpo negro, deve ser empregue um fator de correção (Anacleto 2007). Para tal é necessário conhecer o valor de emissividade dos materiais cuja temperatura se quer medir, o que é um fator de incerteza, porque depende, como referido anteriormente, de fatores como a natureza e o estado da superfície do material e da sua temperatura. Outro fator de incerteza que se verifica é a influência de corpos vizinhos, nomeadamente do operador, pois a radiação emitida por um corpo vizinho pode vir a ser refletida na superfície do corpo, cuja temperatura se pretende determinar, influenciando assim os resultados.

Os pirómetros de IV possuem uma lente que capta a radiação emitida pela superfície. Essa mesma radiação é refletida por um espelho parabólico e focada no sensor. Se for conhecida a quantidade de radiação absorvida pelo sensor, através da Lei de Planck, é possível calcular a temperatura superficial do material. Uma vez que as superfícies correntes dos materiais apresentam valores de emissividade inferiores à unidade (que é o caso do corpo negro), a radiação emitida por estas é inferior à prevista pela Lei de Planck, contribuindo para que a leitura da temperatura efetuada pelo equipamento seja inferior à real. Os fornecedores deste tipo de equipamentos corrigem esta

situação, instalando-lhes um compensador de emissividade, tratando-se de um ajuste de ganho do amplificador, que amplifica o sinal do sensor (Anacleto 2007).

Embora os materiais em estudo sejam todos do mesmo tipo, não-refletantes (figura 3.15), considerou-se relevante, dada a ausência de informação, comprovar neste trabalho se existem ou não diferenças significativas na emissividade devida às diferenças de cor entre materiais no estado seco, ou à alteração de cor que ocorre em consequência da humidificação. Como resposta a esta dúvida foi realizado o ensaio A que se descreve seguidamente.

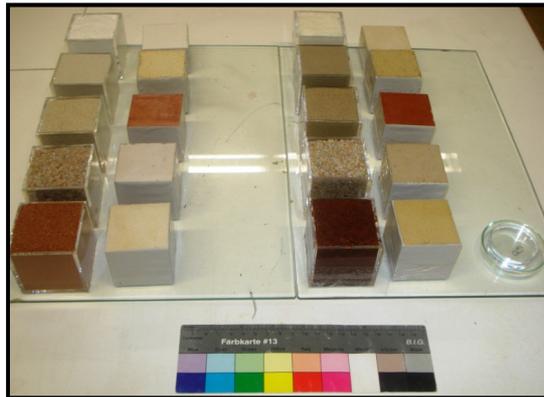


Figura 3.15 - Materiais nos estados seco e húmido e a água, respetivamente.

3.3.2 Ensaio A: Variação da emissividade devido às diferenças de cor entre materiais no estado seco e materiais no estado húmido

Este ensaio teve como objetivo conhecer a variação de emissividade associada às diferenças de cor entre os materiais no estado seco e, num mesmo material, entre os estados seco e húmido, bem como perceber se existia uma aceitável repetibilidade do método de medição. Para o realizar foi necessário recorrer à utilização de uma folha de polietileno sobre os materiais no estado húmido e ainda sobre a água, a fim de evitar a ocorrência do fenómeno de evaporação, que baixaria a temperatura, comprometendo assim os resultados obtidos. O polietileno, material constituinte da vulgar “película aderente”, é quase totalmente transparente aos IV. Isto pode ser demonstrado por um teste simples, como o que se apresenta na figura 3.16.



Figura 3.16 - Teste expedito de transparência aos IV de uma folha de polietileno.

Note-se que a folha de polietileno é um material transparente, logo as diferenças de cor entre provetes secos e húmidos continua a ser visível, tendo assim unicamente a função de evitar a evaporação.

Para a realização deste ensaio foram utilizados dois provetes de cada material, um no estado seco e outro no estado húmido, e um de água destilada. Foram utilizados provetes de T, CB, M e CS L500 com as dimensões de 50x50x5mm. No caso de A, dado tratar-se de um material friável, utilizaram-se provetes com as dimensões de 50x50x50mm. Os restantes materiais (incoerentes e AD) foram colocados nas caixas de acrílico, com as dimensões interiores de 50x50x35mm.

Numa primeira fase, as amostras no estado seco foram envolvidas em folha de polietileno e foram deixadas em ambiente condicionado ($T=20^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR}=50\%$) durante vários dias, admitindo assim que teria sido atingido o equilíbrio térmico, isto é, que todos os materiais se encontrariam à temperatura ambiente (20°C). O controlo das condições ambientais foi garantido recorrendo ao registo efetuado através de um termohigrógrafo (figura 3.17).

Admitindo que todos os materiais teriam atingido o equilíbrio térmico ($T=20^{\circ}\text{C}$), efetuou-se a medição da emissividade de cada material, introduzindo valores sucessivos de emissividade no pirómetro de IV, até se obter um registo da temperatura superficial de 20°C . Este é o método indicado no manual de utilização do pirómetro de IV MX4 da RAYTEK.



Figura 3.17 – Termohigrógrafo.

As medições (figura 3.18) foram, numa primeira fase, efetuadas nos materiais no estado seco com película, sendo de seguida extraída a mesma e efetuadas novas medições sem película. Os valores de emissividade registados são apresentados no quadro 3.3.



Figura 3.18 – Medição da emissividade efetuada com recurso a um pirómetro de IV.

Numa segunda fase, foram efetuadas iguais medições nas mesmas condições (quadro 3.3), mas agora incluindo também os materiais no estado húmido e a água, envoltos em película. A nova determinação do valor de emissividade dos materiais no estado seco, com e sem película, tinha como objetivo aferir a repetibilidade da técnica.

O humedecimento das amostras dos materiais foi efetuado através de imersão total destas em água destilada, durante 24 horas, a fim de garantir a sua completa saturação (figura 3.19). Após as 24 horas, os provetes e as caixas de acrílico já com os materiais incoerentes foram envoltos em folha de polietileno, garantido a selagem através de fita adesiva, para evitar qualquer fuga que permitisse a evaporação de água (figura 3.20). Os materiais húmidos e a água permaneceram a seguir numa sala condicionada a 20°C e 50% de HR durante 24 horas, de forma a atingirem o equilíbrio térmico.

A água, embora seja transparente à vista, comporta-se como um material opaco relativamente à ação da radiação infravermelha, permitindo assim conhecer a sua temperatura superficial. Tal pôde ser demonstrado através de um teste simples, como o que se apresenta na figura 3.21, no qual o pirómetro registou o mesmo valor quando o recipiente com água se encontrava sobre a bancada branca e sobre uma mão.

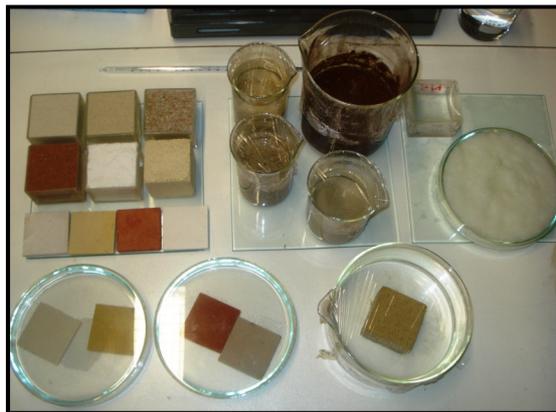


Figura 3.19 - Imersão total dos materiais.



Figura 3.20 – Materiais a serem envoltos em folha de polietileno.



Figura 3.21 - Teste expedito de transparência aos IV, realizado à água.

Na figura 3.22 é possível observar todos os materiais (com película) que foram sujeitos à medição da temperatura superficial, nomeadamente materiais no estado seco (esquerda), materiais no estado húmido (centro) e ainda a água (direita).

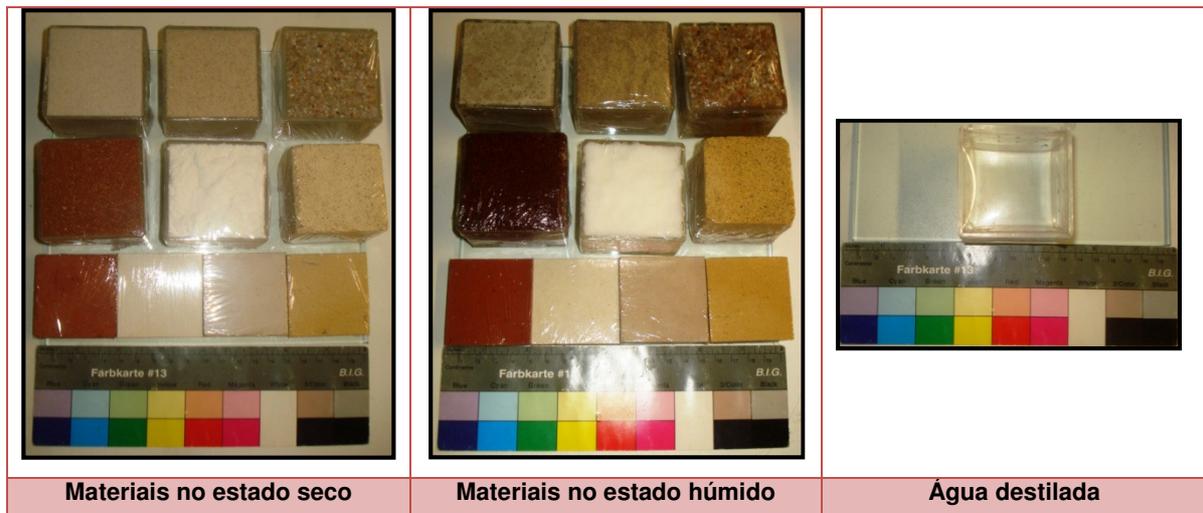


Figura 3.22 - Materiais envoltos em folha de polietileno.

Quadro 3.3 - Medição experimental da emissividade dos materiais.

Materiais	1º Ensaio		2º Ensaio		
	Materiais no estado seco		Materiais no estado seco		Materiais no estado húmido
	s/ polietileno	c/ polietileno	s/ polietileno	c/ polietileno	c/ polietileno
A-I	0.92	0.93	0.91	0.93	0.96
A-IV-A	0.92	0.96	0.90	0.93	0.96
A-V	0.90	0.91	0.91	0.92	0.97
CS L500	0.93	0.92	0.85	0.90	0.95
T	0.94	0.92	0.85	0.91	0.93
A	0.98	0.92	0.95	0.97	0.97
CB	0.94	0.92	0.85	0.90	0.95
M	0.89	0.90	0.82	0.88	0.93
S	0.85	0.88	0.77	0.87	0.92
C	0.84	0.91	0.80	0.90	0.95
AD	-	-	-	-	0.97
Média	0.91	0.92	0.86	0.91	0.95
Desvio padrão	0.04	0.02	0.05	0.03	0.02

Como se pode observar por análise do quadro 3.3, os valores médios de emissividade obtidos variam entre 0.86 e 0.95, havendo uma tendência para ocorrerem valores mais elevados no caso dos materiais no estado húmido e também decorrentes da utilização da folha de polietileno. Já a dispersão de resultados em cada teste não foi muito significativa, como se pode verificar pelos valores de desvio padrão apresentados no quadro 3.3 que, comparativamente com os valores médios, representam um máximo de 11% no caso dos materiais no estado seco (sem folha de polietileno) e um máximo de 4% no caso dos materiais no estado húmido (com folha de polietileno).

Decorridos estes ensaios preliminares, e dada a discrepância de valores obtidos, procurou-se em seguida comparar os valores de emissividade obtidos para os materiais secos, com valores de emissividade disponíveis na bibliografia (quadro 3.4).

Quadro 3.4 - Valores de emissividade dos materiais, presentes na bibliografia consultada.

MATERIAIS	(1)		(2)		(3)		(4)	
	ϵ	T(°C)	ϵ	T(°C)	ϵ	T(°C)	ϵ	T(°C)
Silicato de cálcio	-	-	-	-	-	-	0.88	40-700
Calcário	0.30-0.40	-	-	-	0.98	25	-	-
Tijolo	0.93	20	0.81-0.86	17	0.90	25	-	-
Argamassa	0.87	17	0.87	17	-	-	-	-
Areia	0.90	20	0.90	20	0.90	25	-	-
Madeira	0.96	19	0.80-0.90*	20	0.94	25	-	-
Papel branco	0.93**	20	0.70-0.90	20	0.95	25	-	-
Água destilada	0.96	20	0.96	20	0.93***	25	-	-

(1) Contemp

(2) Flir Systems (2009)

(3) Raytek – Manual de utilização (Pirómetro MX4)

(4) Janssens

* Placas de madeira

** Papel branco aglutinado

***Água

As circunferências vermelhas indicam os valores que foram depois considerados para efeito de cálculo da média da emissividade dos materiais.

Existem valores tabelados para a generalidade dos materiais testados e para a água mas estes são bastante variáveis de autor para autor, correspondendo por vezes a gamas e não a valores individuais e referem-se sempre a materiais no estado seco (quadro 3.4). Verifica-se que os valores de emissividade diferem bastante entre os materiais estudados e diferem ainda, em muitos casos, dos valores registados experimentalmente neste trabalho (quadro 3.3). Assim sendo, dada a variabilidade dos valores:

i) obtidos em medições sucessivas, que revelam uma repetibilidade limitada do método de medição, devendo-se provavelmente ao facto de existirem fatores de influência, como por exemplo a influência física do operador (Anacleto 2007);

ii) obtidos para os diferentes materiais, em ambos os estados (seco ou húmido);

iii) indicados na literatura, de autor para autor e de material para material;

considera-se que se justifica a utilização de um valor único de emissividade para todos os materiais, opção frequente na prática. Optou-se pelo valor de **0.92**. Este valor:

- corresponde à média dos valores encontrados na literatura e assinalados a vermelho, no quadro 3.4, referentes a cada material estudado, tendo como base a consideração dos valores que mais se aproximam das condições experimentais desenvolvidas;
- aproxima-se da média dos valores experimentais registados no caso dos materiais no estado húmido com folha de polietileno, cuja variação não vai além dos 4%, e no caso dos materiais no estado seco (com ou sem folha de polietileno), em que a variação não vai além dos 7%;
- aproxima-se também do valor registado para a água, não indo além de 6% a sua variação.

Por conseguinte, este valor foi então utilizado em medições efetuadas tanto em materiais no estado seco, como no estado húmido e ainda no caso da água.

3.4 Ensaios de evaporação com monitorização da temperatura superficial

Estes ensaios foram realizados para investigar os efeitos da evaporação sobre a temperatura da superfície dos materiais durante a primeira fase do processo de secagem (Figura 2.2), isto é, quando a zona superficial do provete se encontra molhada.

3.4.1 Ensaio B: Ensaio de secagem numa sala condicionada

O ensaio de secagem focou somente a primeira fase de secagem dos materiais e foi realizado com base no procedimento II.5 da RILEM (1980). Foi realizado em condições controladas, numa sala condicionada, com reduzida velocidade do ar, a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ de T e $50\% \pm 5\%$ de HR e sem qualquer efeito de radiação que pudesse comprometer os resultados obtidos. Tal conseguiu-se uma vez que as janelas existentes na sala encontravam-se com os estores baixos e cobertas por um

tecido opaco, evitando assim a incidência de qualquer radiação sobre os materiais alvo de estudo. Estas condições ambientais (T e HR) foram controladas através de um termohigrógrafo.

Este ensaio incidiu sobre os 11 materiais em estudo, 5 materiais coerentes, 5 materiais incoerentes e água destilada. Os provetes de A, T, CB e M utilizados no ensaio tinham dimensões de 50x50x50mm, o CS L500 tinha dimensões de 50x50x35mm; os materiais incoerentes foram colocados em caixas de acrílico transparente, com dimensões interiores de 50x50x50mm. Recorde-se que os provetes foram lateralmente impermeabilizados com resina epóxi.

Inicialmente, todos os materiais, à exceção da água, foram colocados numa estufa a 60°C, até se obter massa constante. Após o seu arrefecimento, procedeu-se ao registo da massa seca. De seguida, esses mesmos materiais foram colocados em imersão parcial, numa altura de água de 5mm a contar da base do material (Figura 3.23). Os provetes foram mantidos nestas condições durante um período de 48h, de forma a garantir a saturação capilar dos materiais.

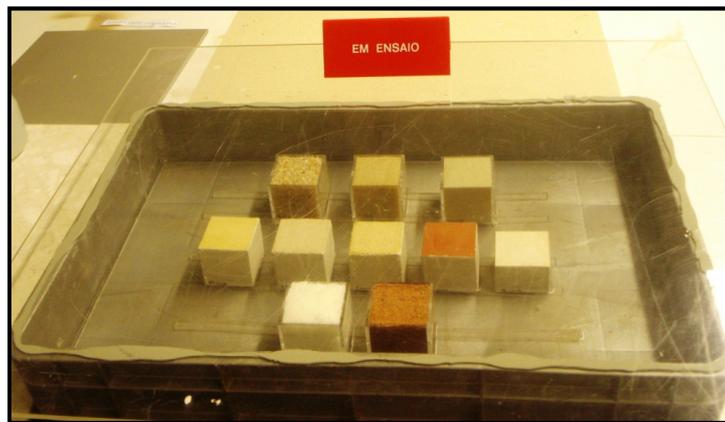


Figura 3.23 - Imersão parcial dos materiais.

Decorridas as 48h, os provetes foram retirados da imersão parcial, procedendo-se à selagem da sua face inferior com folha de polietileno (Figura 3.24) para garantir que a secagem seria exclusivamente unidirecional através da face superior. Procedeu-se então a uma nova pesagem, com o objetivo de aferir a quantidade de água absorvida.



Figura 3.24 - Selagem dos provetes.

Os materiais foram colocados numa bancada (figura 3.25), dispostos afastados uns dos outros cerca de 2cm, bem como afastados de paredes e de outros obstáculos que pudessem influenciar a circulação do ar e interferir nos resultados da secagem.



Figura 3.25 - Ensaio de secagem.

Com o objetivo de determinar a quantidade de água evaporada foram efetuadas pesagens periódicas numa balança digital com resolução de 0.001g (Figura 3.26). As pesagens foram efetuadas durante 3 dias, 3 pesagens por dia, com um primeiro intervalo de 3h e um segundo de 4h por dia. No caso da água foram utilizadas caixas de Petri e seguido o seguinte procedimento: primeiro eram pesadas somente as caixas; depois enchia-se uma seringa com água (18 mL) que correspondia à capacidade da caixa; enchia-se a caixa com o conteúdo da seringa; a seringa era pesada tanto quando se encontrava cheia como quando já se encontrava vazia, a fim de determinar a massa inicial de água contida na caixa. Este procedimento foi repetido em cada pesagem, a fim de garantir que não existia perda de material, para não influenciar os resultados obtidos. Note-se que não foi considerado o teor de higroscopicidade dos materiais porque uma HR de 50% considera-se um valor baixo, que corresponde a um ambiente seco.



Figura 3.26 - Balança digital.

Os resultados do ensaio de secagem são quantitativamente expressos pela curva de secagem, a qual foi abordada na secção 2.3. Esta curva expressa o teor de água do provete em função do tempo. O teor de água é apresentado em percentagem ponderal de massa seca e obtém-se por aplicação da equação 3.6.

$$W_i = \frac{M - M_0}{M_0} \times 100 \quad (\text{Equação 3.6})$$

Na equação 3.6, W_i corresponde ao teor de água no instante i (em %), M representa a massa (em g) num instante t e M_0 representa a massa (em g) do material totalmente seco. Após o traçado da curva de secagem, pode-se obter de imediato a taxa de secagem, pois trata-se do valor correspondente ao declive do segmento de reta.

Neste ensaio procedeu-se também à determinação da quantidade de água evaporada (g/m^2), de acordo com a equação 3.7.

$$Q = \frac{M_{sat}-M}{S} \quad (\text{Equação 3.7})$$

Na equação 3.7, Q representa a quantidade de água evaporada (g/m^2), M_{sat} representa a massa (g) no instante inicial após a saturação do material, M representa a massa (g) num determinado instante t e S representa a área superficial do provete (m^2).

Durante o ensaio de secagem foi também controlada a temperatura superficial dos materiais, com o pirómetro de IV. O ensaio de secagem foi repetido, mas desta vez utilizando outros provetes com as mesmas dimensões, na tentativa de perceber se obtinham os mesmos valores. Os ensaios foram então denominados por ensaio B1 e ensaio B2.

3.4.2 Ensaio C: Ensaio de secagem ao ar livre

Este ensaio tinha como principal objetivo investigar o efeito da evaporação sobre a temperatura superficial dos diferentes materiais, quando a frente de secagem está localizada à superfície, bem como aferir quais os materiais que poderão proporcionar maior eficácia evaporativa em condições reais. O ensaio foi realizado no exterior, no campus do LNEC, em Lisboa, num dia quente de verão.

Os materiais foram assim testados em condições não-controladas, em que a temperatura do ar, a HR e o vento variaram com o decorrer do tempo. A temperatura do ar e a HR foram aferidos ao longo do ensaio com um termohigrómetro. Contudo, tanto o fator vento como a radiação solar incidente, embora relevantes, não puderam ser controlados uma vez que não se dispunha de equipamento específico para a sua determinação.

Foram realizados dois tipos de ensaios, com a variante do dispositivo experimental ser colocado à sombra ou ao sol. A seleção do local para a realização do ensaio teve em consideração a não-existência de edifícios na envolvente.

Para a realização deste ensaio foi utilizada uma placa de XPS, que serviu de base aos materiais que foram alvo de estudo. A placa tinha como dimensões 800x800x50mm. Nesta placa foram efetuadas 22 orifícios (quadrados), com as dimensões faciais de 50x50mm, nos quais foram encaixados os provetes dos materiais coerentes (CB, M, T, CS L500 e A), e de 56x56mm, em que foram encaixadas as caixas de acrílico com os restantes materiais (água e materiais incoerentes - areias, serradura e celulose). Os provetes utilizados tinham as dimensões de 50x50x50mm, à exceção do provete de CS L500 que possuía as dimensões de 50x50x35mm.

De cada material, foi testada uma amostra seca e outra húmida, com o objetivo de avaliar o comportamento do mesmo material durante a evaporação, ficando o seco como referência para

ajudar à interpretação dos resultados obtidos. No caso da água foram também colocados dois recipientes com água. Os materiais húmidos foram previamente humedecidos por absorção capilar através da base, por meio de imersão parcial em água, durante 48 horas numa sala condicionada ($T=20^{\circ}\text{C}$ e $\text{HR}=50\%$), e os materiais secos permaneceram as primeiras 24h numa estufa a 60°C e as restantes 24 horas na sala condicionada.

Relativamente aos materiais húmidos, após as 24h em imersão parcial procedeu-se à selagem da face inferior dos materiais, inclusive das caixas de acrílico, com folha de polietileno, de modo a garantir que a secagem fosse unidirecional e ocorresse somente através da face superior.

De seguida, colocaram-se os materiais, à exceção da água, na placa de XPS e envolveu-se a mesma em película de polietileno, para garantir que não havia evaporação. A água foi colocada num recipiente hermeticamente fechado. Tanto o dispositivo experimental, como o recipiente com a água foram levados e deixados no local selecionado para o ensaio (Figura 3.27), às 12h. De modo a que se atingisse o equilíbrio térmico, os materiais foram deixados nestas condições durante 1h.

Ao fim de 1h, isto é às 13h, procedeu-se não só ao corte da película, como também ao enchimento das caixas de acrílico que estariam destinadas ao armazenamento de água. Iniciaram-se então as medições da temperatura superficial dos materiais (figura 3.28) com o pirómetro de IV, de 15 em 15 minutos, desde as 13h às 14h30. As medições efetuaram-se sempre a uma distância entre o pirómetro e a superfície do material de cerca de 350mm. As condições ambientais (T e HR) foram registadas em cada medição, através da utilização de um termohigrómetro (figura 3.29).

Segundo a informação disponibilizada pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), no dia em que se realizou o ensaio (09/08/2013), verificou-se na região de Lisboa, vento fraco (inferior a 15 km/h) e a temperatura do ar variou entre 19 e 37°C . Este primeiro ensaio, que foi realizado ao sol, denominou-se ensaio C1.



Figura 3.27 - Dispositivo experimental envolto pela folha de polietileno e o recipiente com a água.

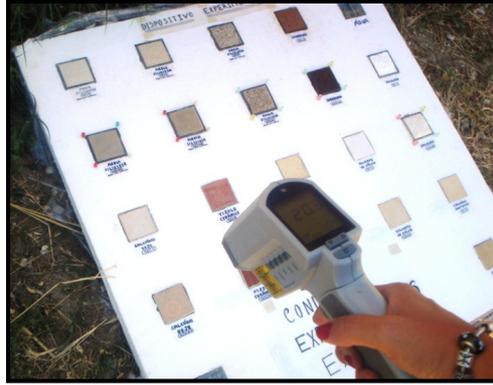


Figura 3.28 - Medição das temperaturas superficiais dos materiais, com utilização do pirómetro.



Figura 3.29 – Termohigrómetro.

O ensaio realizado ao sol foi repetido porque se obtiveram valores discrepantes para a temperatura da água nos dois recipientes, que estavam sujeitos às mesmas condições, o que se pensou dever-se ao facto de ter havido interferência da sombra do operador durante as medições (figura 3.30). Neste segundo ensaio apenas foi possível registar as condições ambientais iniciais, pois o equipamento (termohigrómetro) ficou sem bateria. Também devido a problemas técnicos (a página da internet do IPMA não estava acessível) não foi possível aceder à informação referente à velocidade do vento e às variações de temperatura, para o dia em que foi realizado o ensaio (13/08/2013). Este segundo ensaio, realizado ao sol, foi denominado ensaio C2.



Figura 3.30 - Influência do operador nas medições (sombreamento).

Posteriormente, o ensaio foi novamente repetido, mas desta vez o dispositivo experimental foi colocado à sombra. De acordo com a informação disponibilizada pelo IPMA, no dia em que foi realizado o ensaio à sombra (12/08/2013) verificou-se na cidade de Lisboa um vento fraco (inferior a 15km/h) e as temperaturas variaram entre 19 a 30°C. Este ensaio foi denominado ensaio C3.

3.5 Resultados dos ensaios de evaporação

3.5.1 Ensaio B: Ensaio de secagem numa sala condicionada

Relativamente ao ensaio de secagem realizado na sala condicionada (ensaio B), os resultados obtidos são os apresentados nas figuras 3.31 a 3.41, correspondentes aos dois ensaios de secagem realizados (ensaios B1 e B2). Para cada material e para cada ensaio é apresentada a curva correspondente à perda de massa e a curva correspondente à temperatura superficial registada. A zona a tracejado das curvas de secagem e da temperatura superficial correspondem ao início da 2ª fase de secagem, situação que não está a ser considerada neste trabalho.

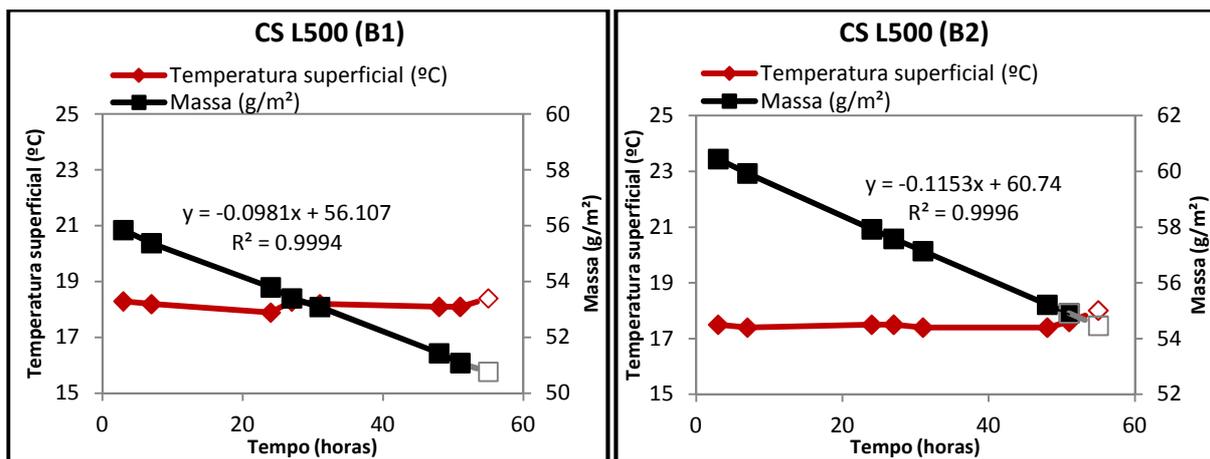


Figura 3.31 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de CS L500 nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

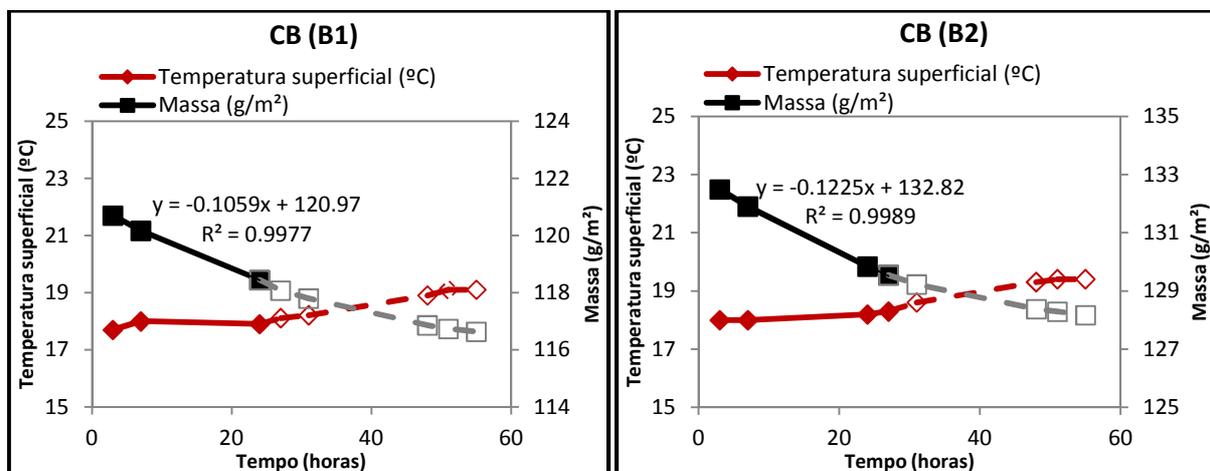


Figura 3.32 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de CB nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

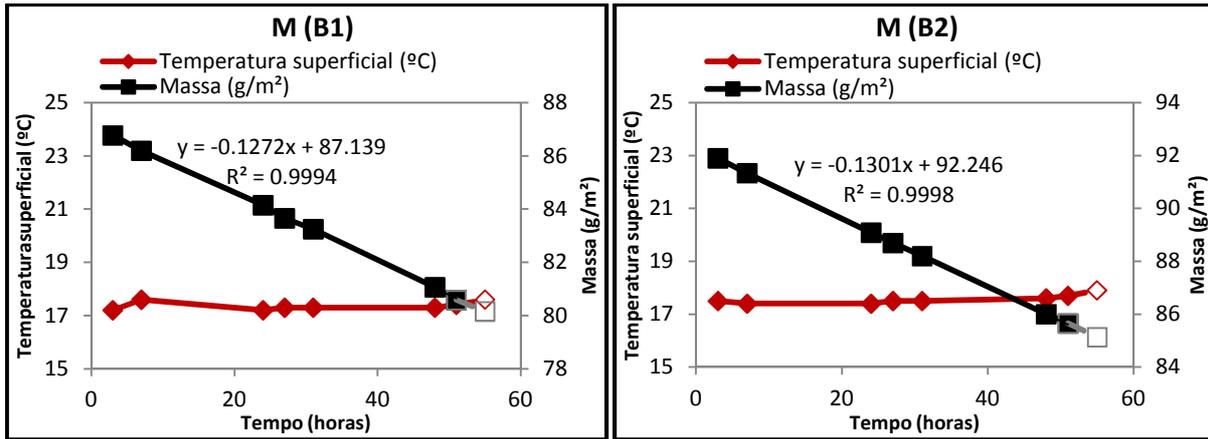


Figura 3.33 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de M nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

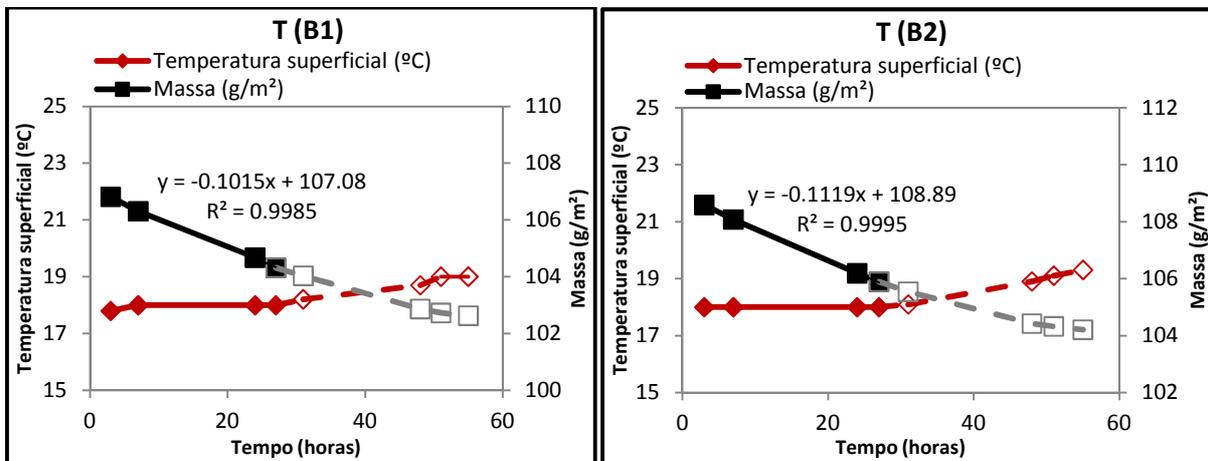


Figura 3.34 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de T nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

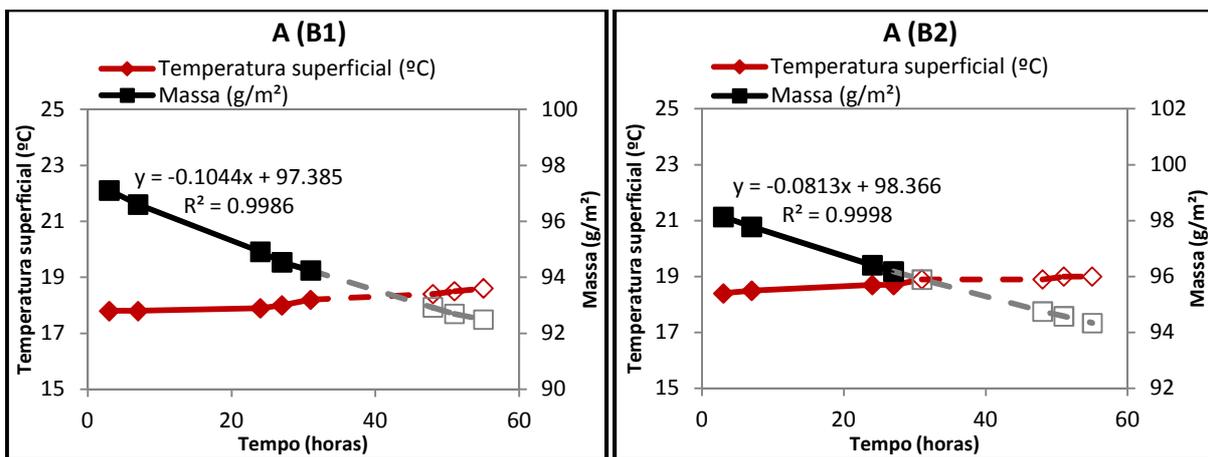


Figura 3.35 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de A nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

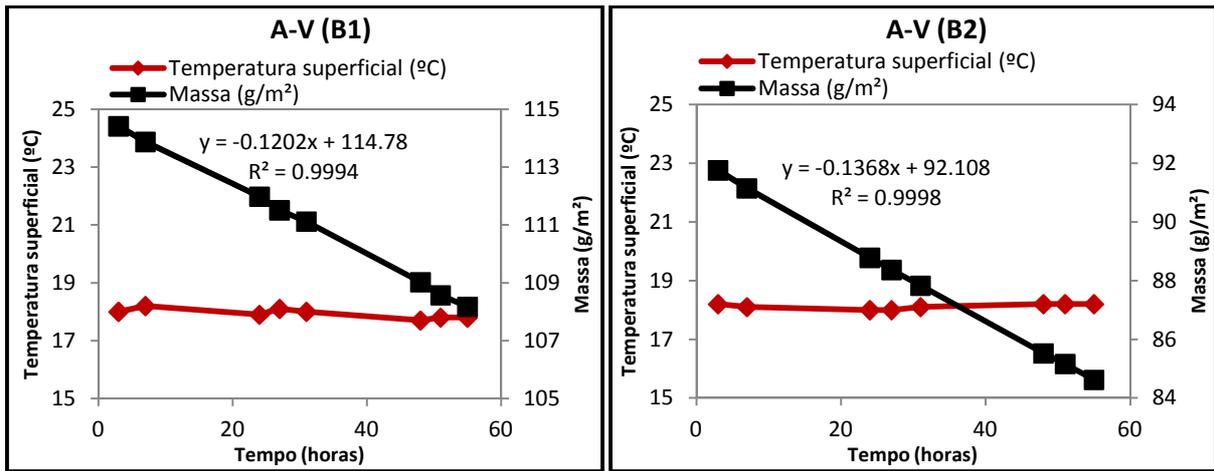


Figura 3.36 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de A-V nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

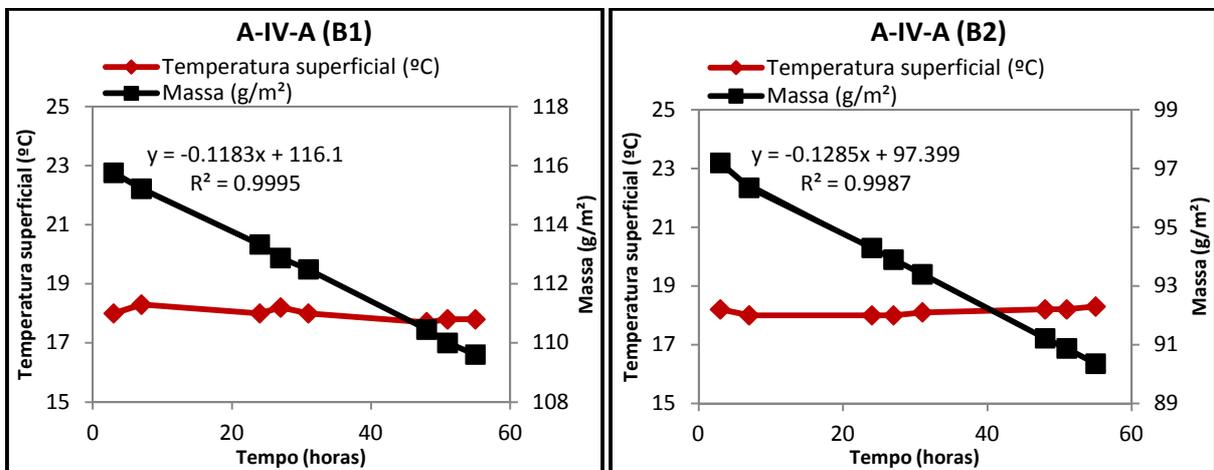


Figura 3.37 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de A-IV-A nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

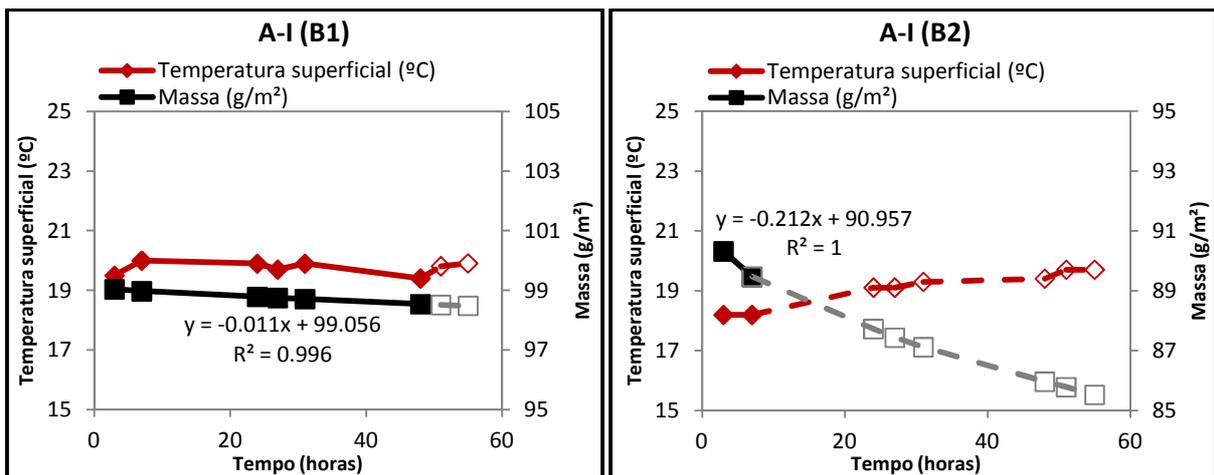


Figura 3.38 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de A-I nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

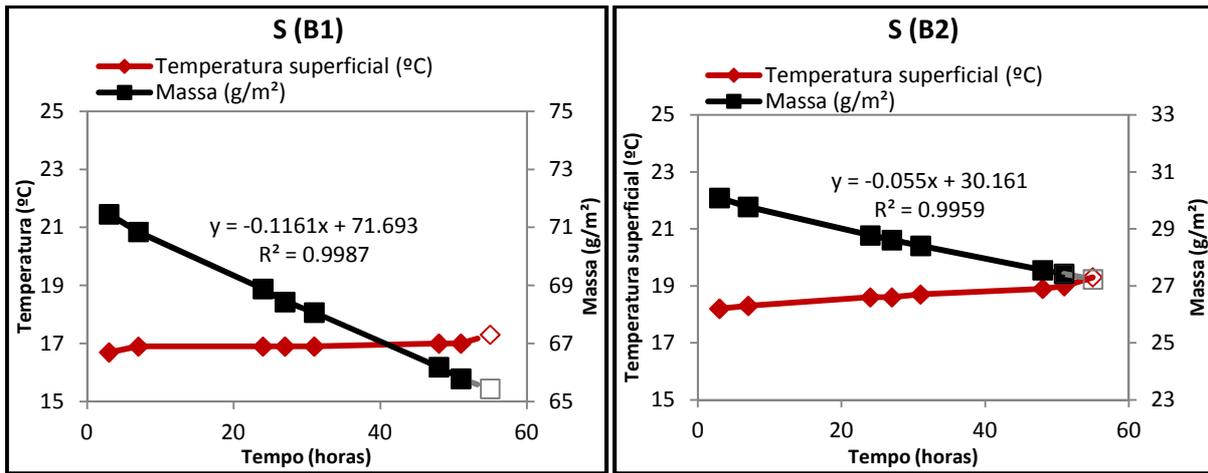


Figura 3.39 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de S nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

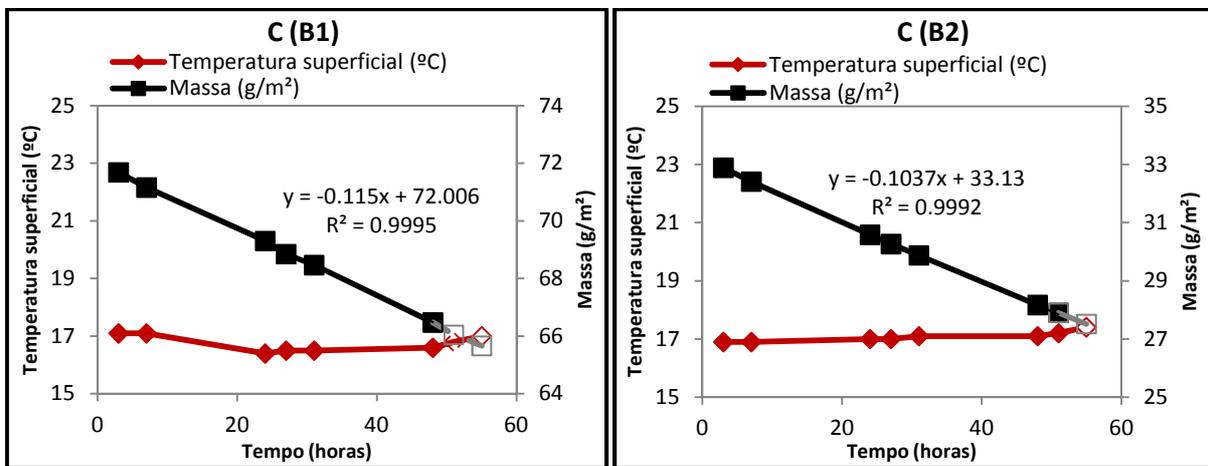


Figura 3.40 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de C nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

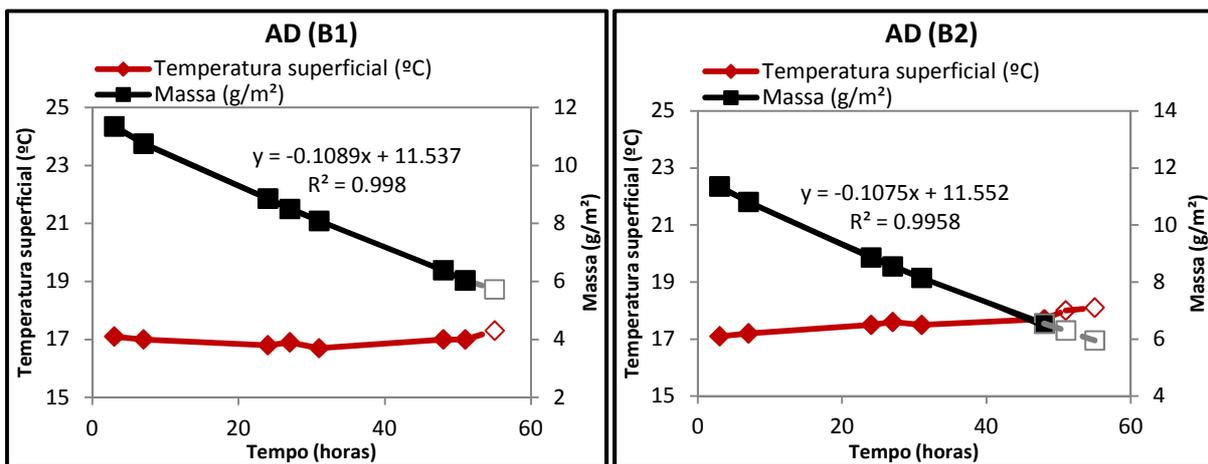


Figura 3.41 - Curvas de secagem e de temperatura superficial de AD nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

Importa referir que é comum que o troço inicial das curvas de secagem varie consoante o material. Segundo Gonçalves (2007), tal pode dever-se ao facto dos materiais apresentarem diferentes porosidades e diferentes rugosidades superficiais, que por sua vez conduzem a superfícies efetivas de evaporação distintas e, conseqüentemente, taxas de secagem diferentes.

Após a análise das figuras 3.31 a 3.41 verifica-se que os valores obtidos para o caso de A-I não podem ser considerados. Este material, no caso do ensaio B2, abandona rapidamente a 1ª fase de secagem, tornando-se impercetível o seu comportamento durante esta fase. No caso do ensaio B1, embora o material tenha sido colocado previamente, tal como os restantes materiais, 48h em imersão parcial, não se verificou a sua saturação total. Relativamente ao ensaio realizado a S, visto que no ensaio B2 também não se verificou a saturação capilar do material, os resultados obtidos também não podem ser considerados.

Nas figuras que são apresentadas em seguida (figuras 3.42 e 3.43) é possível observar a variação das temperaturas superficiais de todos os materiais ao longo do período em que se realizaram os ensaios B1 e B2, respetivamente.

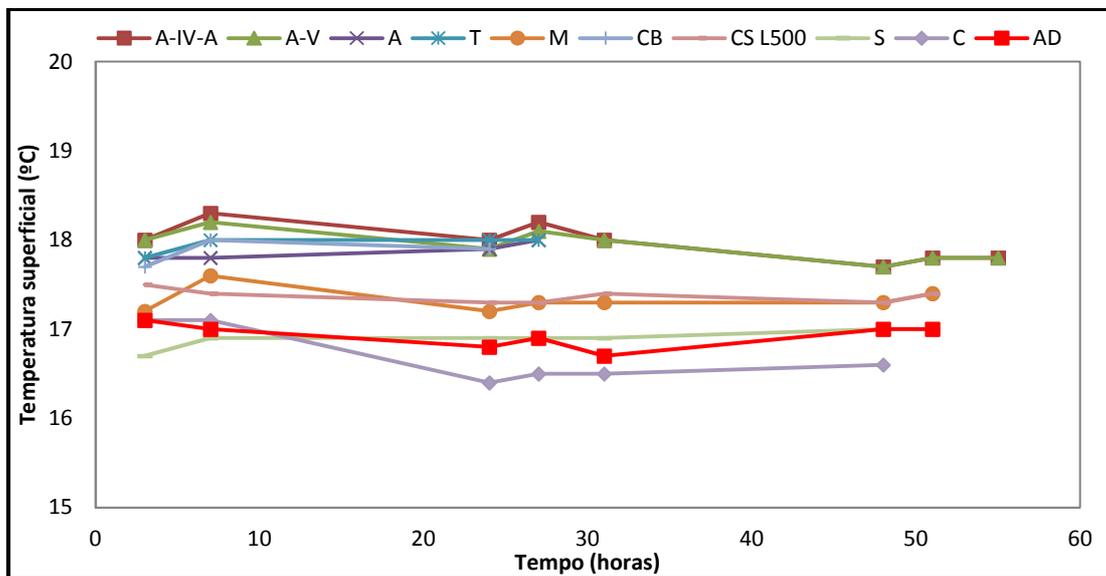


Figura 3.42 - Temperaturas superficiais registadas (ensaio B1).

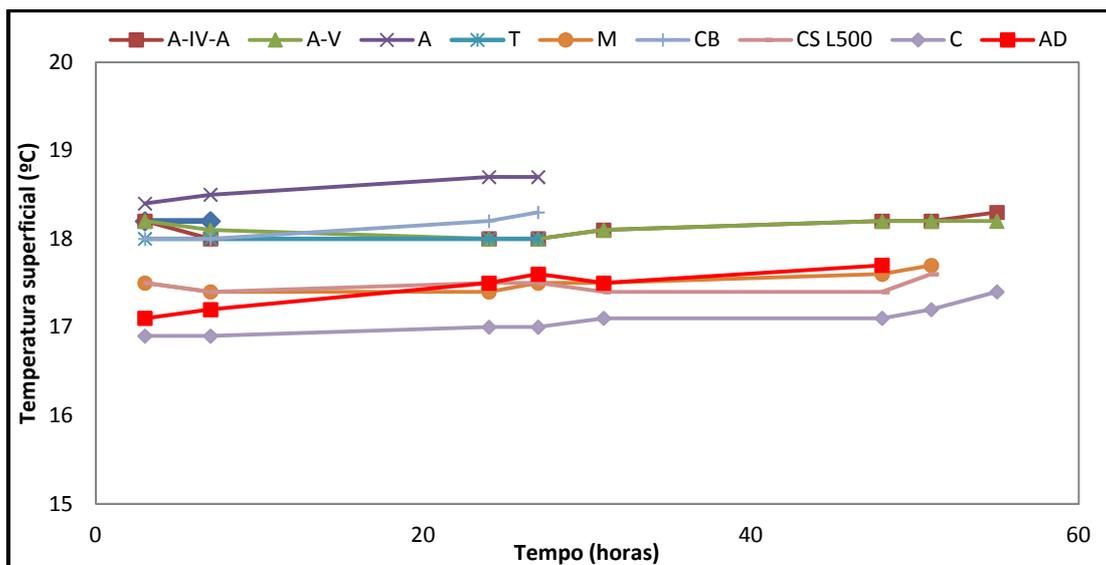


Figura 3.43 - Temperaturas superficiais registadas (ensaio B2).

Compilando os resultados obtidos nos ensaios B1 e B2, excluindo os referidos no parágrafo anterior, apresentam-se nas figuras 3.44 e 3.45 os valores da taxa de secagem durante a 1ª fase e a média das temperaturas superficiais obtidas nos ensaios B1 e B2, respetivamente. Importa salientar que nas figuras 3.44 e 3.45 apenas é apresentado o desvio padrão relativamente à média das temperaturas superficiais, pois não faria qualquer sentido definir o desvio padrão no caso da taxa de evaporação, porque em cada ensaio apenas foi estudado um exemplar de cada material.

Nas figuras 3.46 e 3.47 são apresentados gráficos que permitem relacionar, para cada material e para cada ensaio, a taxa de evaporação com a média das temperaturas superficiais registadas.

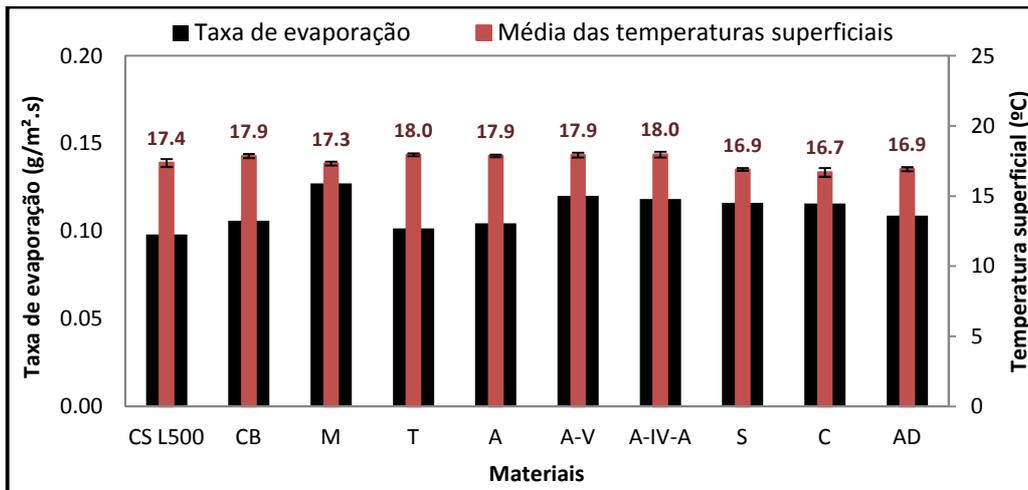


Figura 3.44 - Taxa de evaporação e média das temperaturas superficiais registadas (ensaio B1).

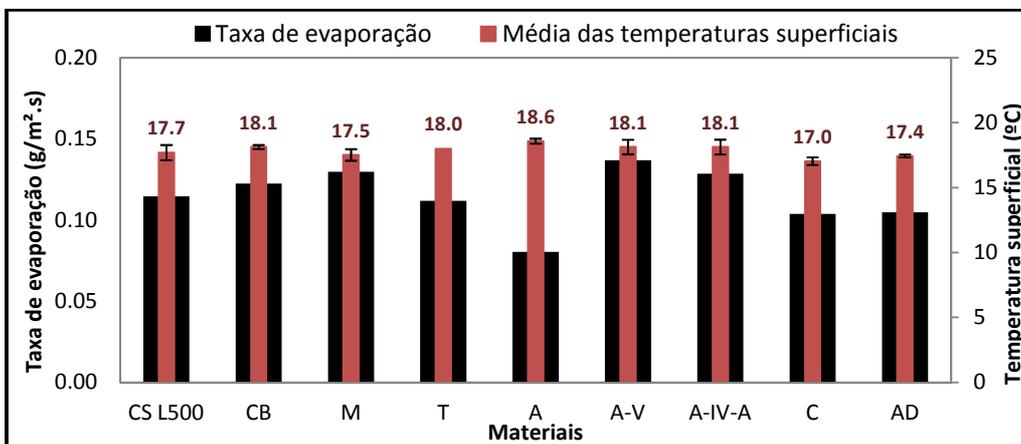


Figura 3.45 - Taxa de evaporação e média das temperaturas superficiais registadas (ensaio B2).

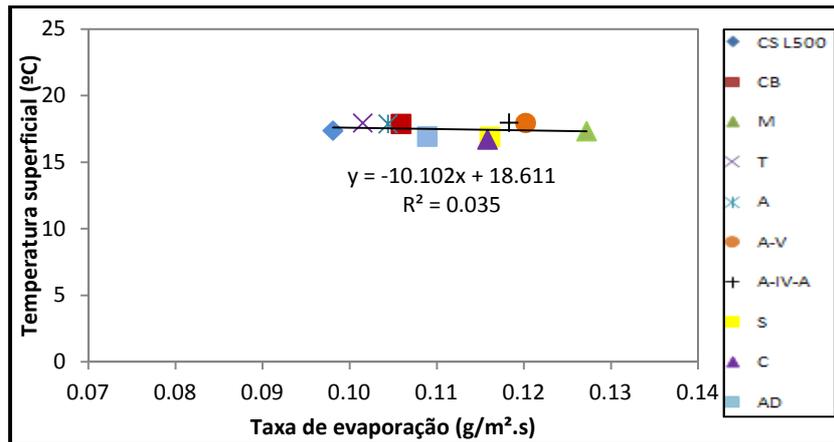


Figura 3.46 - Correlação entre a taxa de evaporação e a média das temperaturas superficiais registadas (ensaio B1).

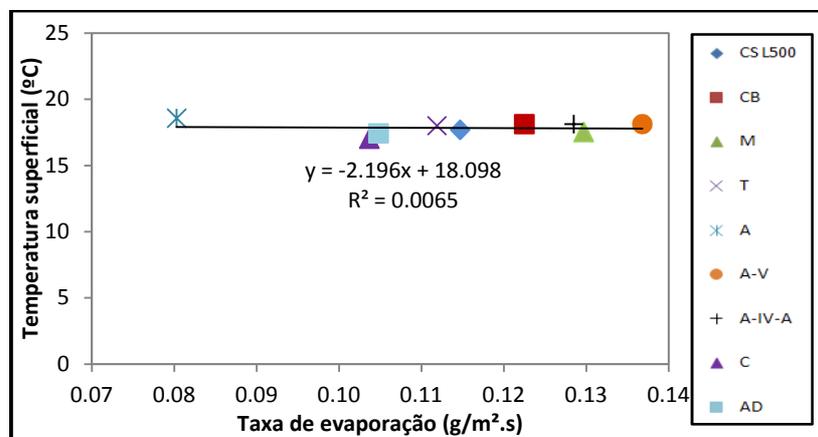


Figura 3.47 - Correlação entre a taxa de evaporação e a média das temperaturas superficiais registadas (ensaio B2).

Para o cálculo da taxa de secagem relativa a cada material, não se considerou o primeiro ponto em todos os casos, pois trata-se do instante em que os materiais são retirados do meio em que estiveram sujeitos à saturação e se dá o início da evaporação, não tendo ainda sido atingido o equilíbrio térmico. Isto quer dizer que existem ainda trocas de calor entre o material e o ambiente, sendo necessário que a temperatura do material estabilize, para que não se obtenham resultados inviáveis. Em todos os materiais, à exceção de A-V e A-IV-A, para além do primeiro ponto também não puderam ser considerados outros pontos (assinalados a tracejado e de cor cinzenta nos gráficos) para a obtenção do valor das respetivas taxas de secagem. Tais pontos não foram considerados porque se verificou que, a partir de um certo instante, a taxa de secagem começou a decrescer ligeiramente, ou a temperatura superficial deixou de ser aproximadamente constante e começou a aumentar, indicando que se está a sair da primeira fase de secagem e a entrar na segunda fase de secagem, a qual não está a ser considerada neste trabalho.

3.5.2 Ensaio C: Ensaio de secagem ao ar livre

Relativamente ao ensaio C, os registos efetuados das temperaturas superficiais dos materiais húmidos ao longo do período do ensaio (1h30m), na situação em que o ensaio foi realizado ao sol

(ensaios C1 e C2) e na situação em que o ensaio foi realizado à sombra (ensaio C3) são apresentados nas figuras 3.48, 3.52 e 3.56, respetivamente. A HR registada no decorrer dos ensaios é também apresentada nas figuras 3.49, 3.53 e 3.57. Nas figuras 3.50, 3.51, 3.54, 3.55, 3.58 e 3.59 são apresentadas as temperaturas superficiais e a média das temperaturas superficiais registadas para os materiais em ambos os estados, para cada ensaio.

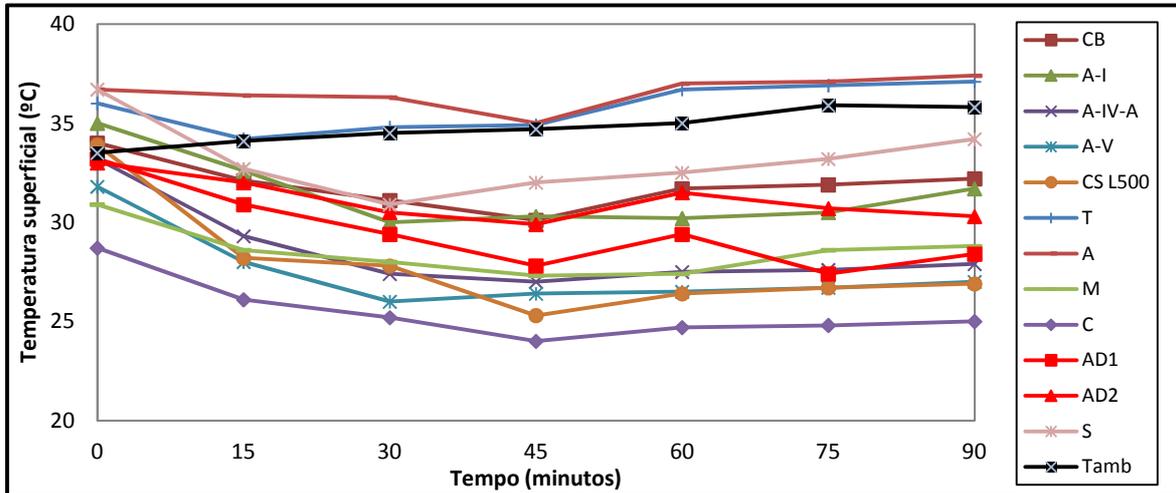


Figura 3.48 - Registo da temperatura ambiente, da temperatura superficial dos materiais no estado húmido e da água, no ensaio realizado ao sol (ensaio C1).

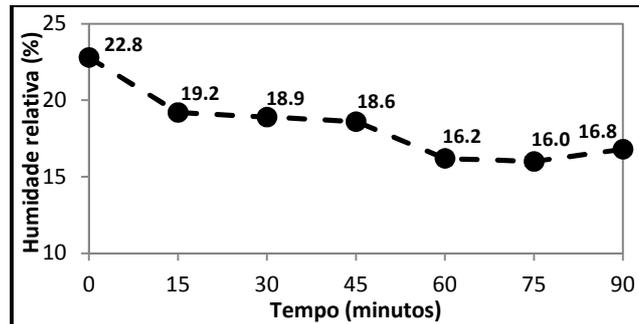


Figura 3.49 - Humidade relativa registada no ensaio realizado ao sol (ensaio C1).

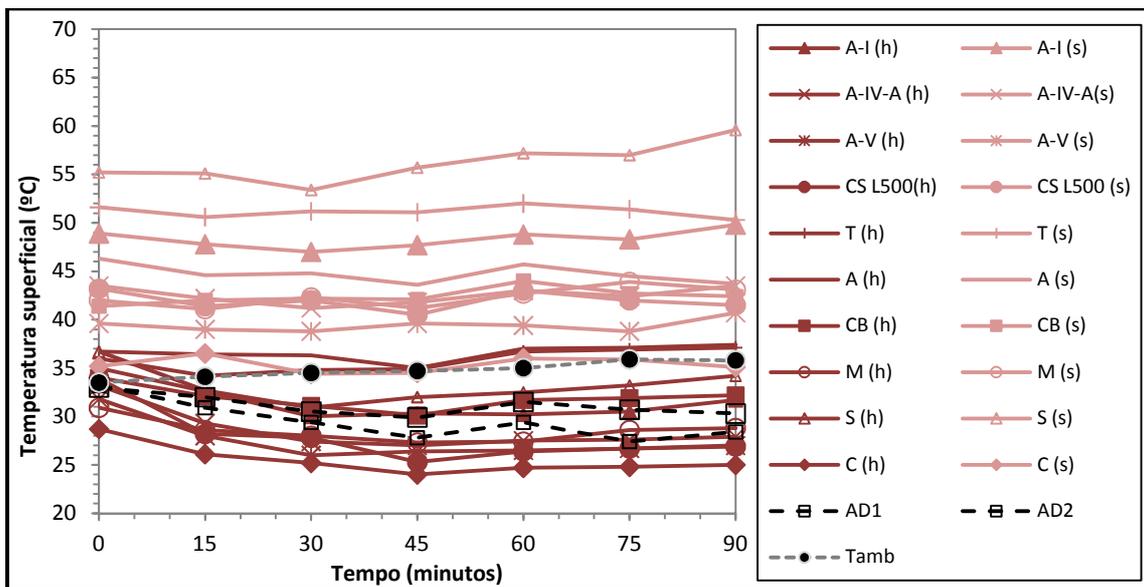


Figura 3.50 - Temperaturas superficiais registadas no ensaio realizado ao sol (ensaio C1).

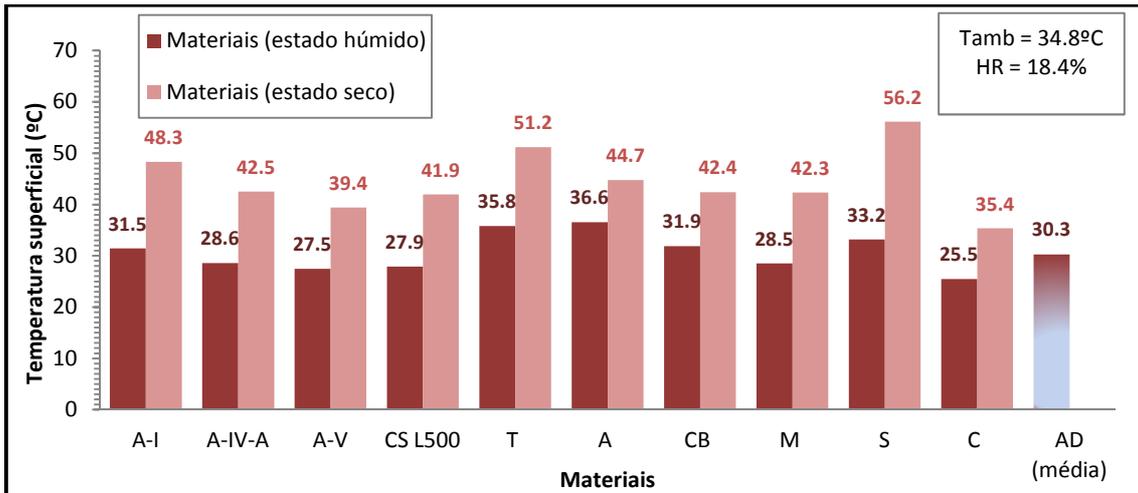


Figura 3.51 - Média das temperaturas superficiais registadas no ensaio realizado ao sol (ensaio C1).

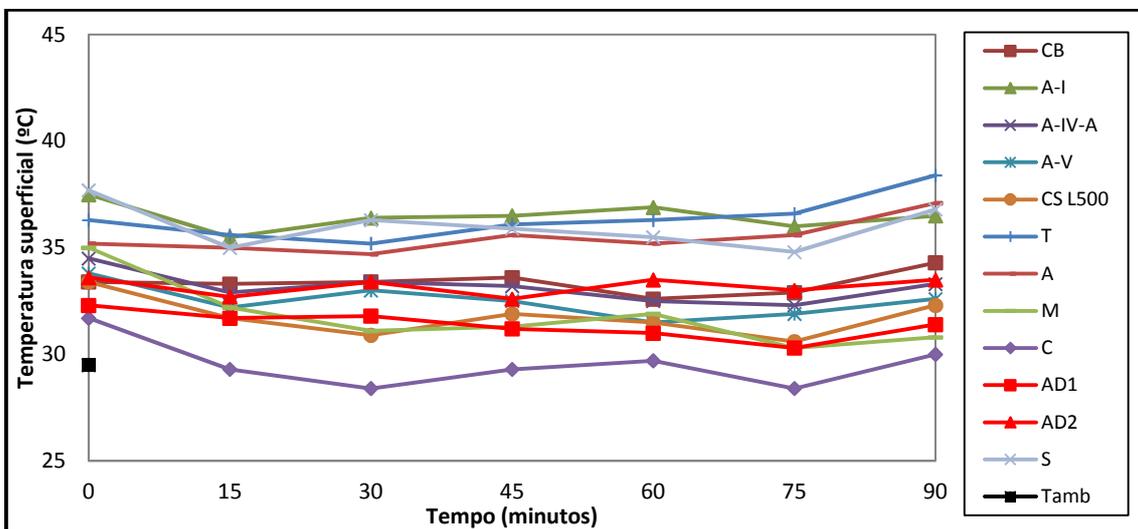


Figura 3.52 - Registo da temperatura ambiente, da temperatura superficial dos materiais no estado húmido e da água, no ensaio realizado ao sol (ensaio C2).

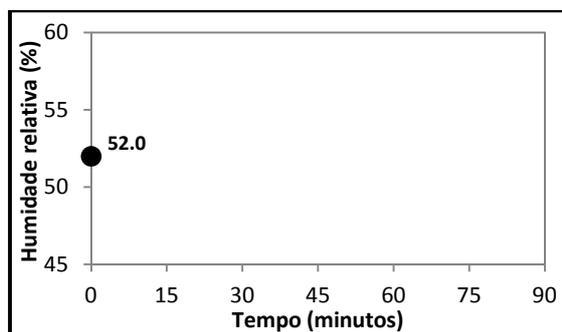


Figura 3.53 - Humidade relativa registada no ensaio realizado ao sol (ensaio C2).

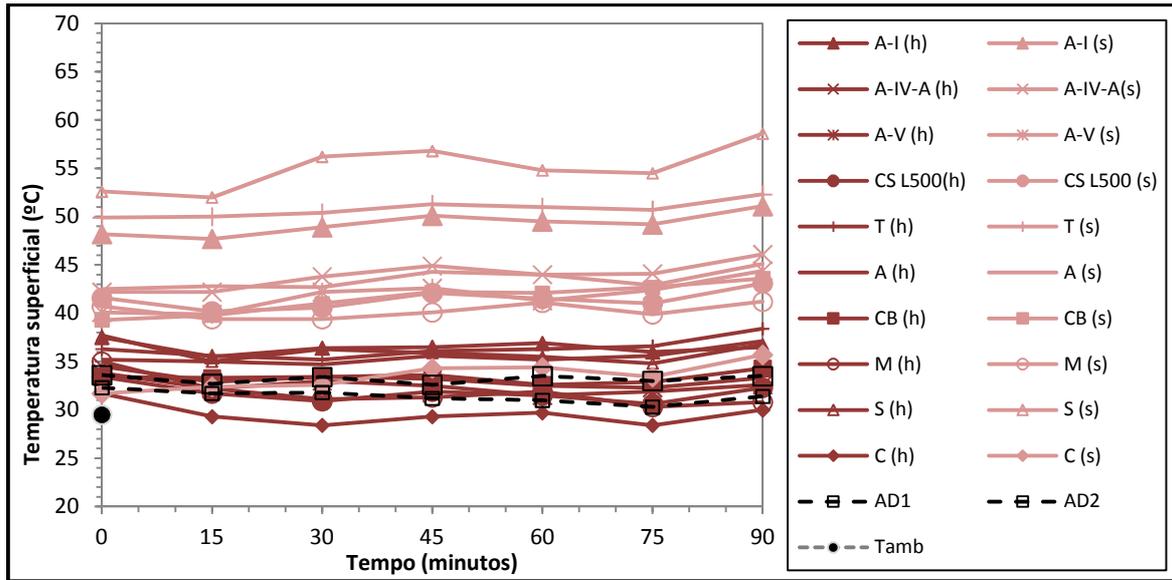


Figura 3.54 - Temperaturas superficiais registadas no ensaio realizado ao sol (ensaio C2).

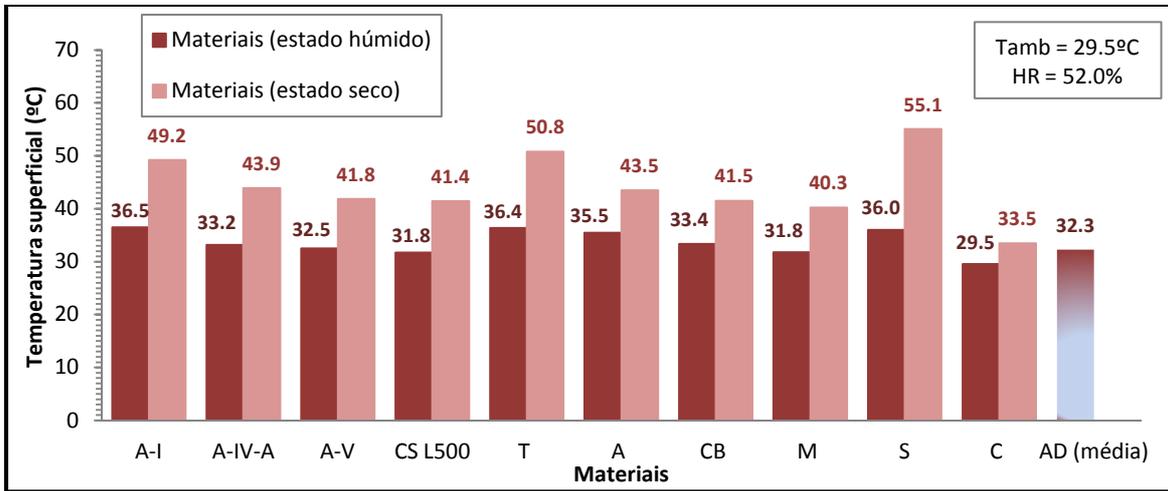


Figura 3.55 - Média das temperaturas superficiais registadas no ensaio realizado ao sol (ensaio C2).

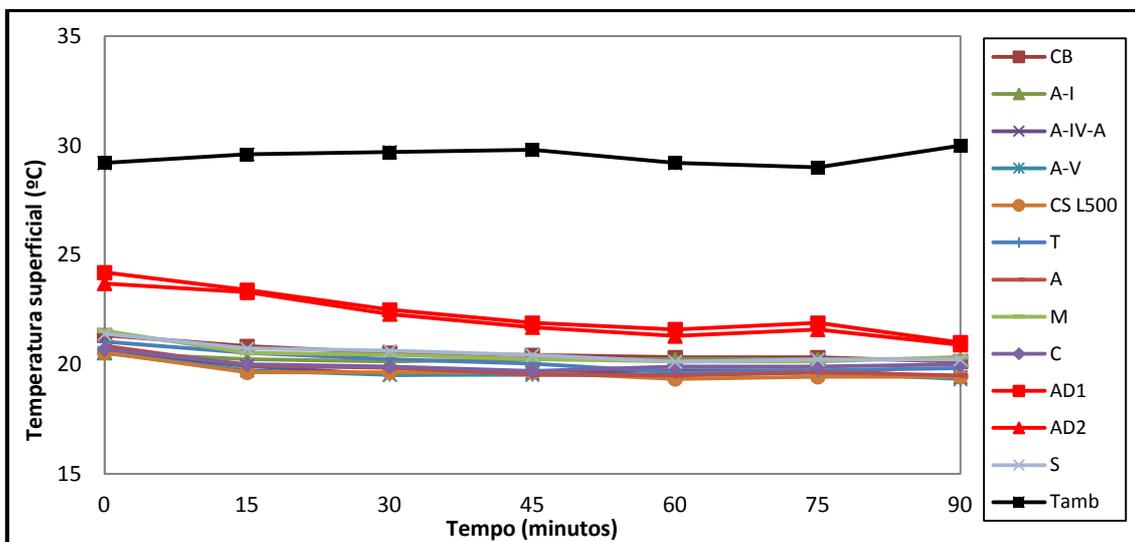


Figura 3.56 - Registo da temperatura ambiente, da temperatura superficial dos materiais no estado húmido e da água, no ensaio realizado à sombra (ensaio C3).

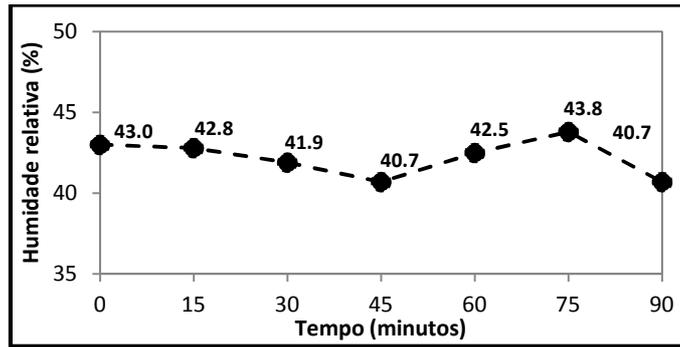


Figura 3.57 - Humidade relativa registada no ensaio realizado à sombra (ensaio C3).

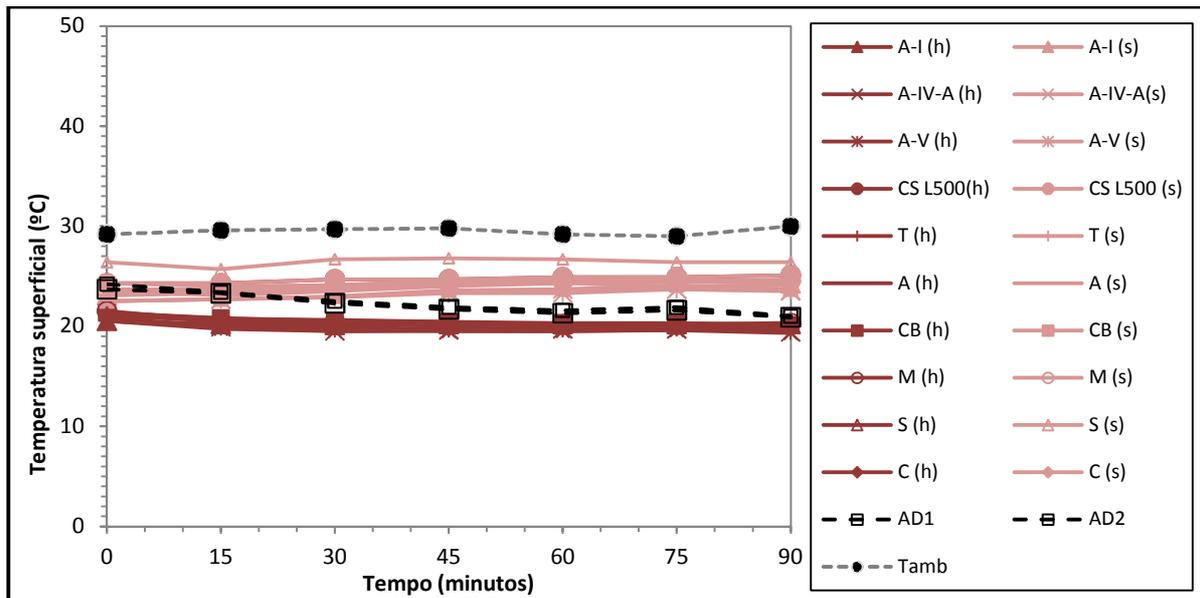


Figura 3.58 - Temperaturas superficiais registadas no ensaio realizado à sombra (ensaio C3).

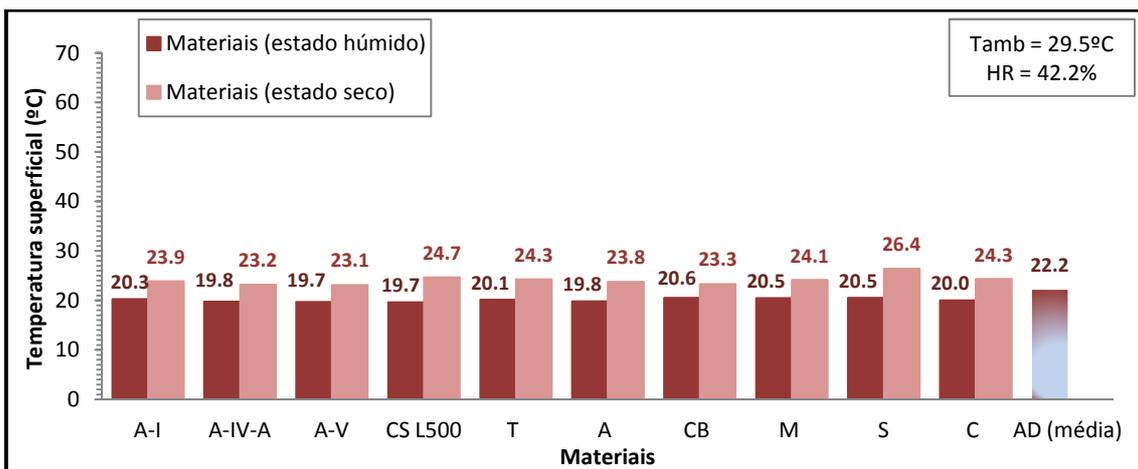


Figura 3.59 - Média das temperaturas superficiais registadas no ensaio realizado à sombra (ensaio C3).

3.6 Discussão dos resultados dos ensaios de evaporação

3.6.1 Ensaio B: Ensaio de secagem numa sala condicionada

Por observação e interpretação das figuras 3.31 a 3.41, referentes aos resultados obtidos nos ensaios de secagem, realizados na sala condicionada, é possível perceber que o comportamento dos materiais à secagem é variável. Importa também referir que a temperatura superficial registada nos materiais encontra-se sempre abaixo dos 20°C (condição de equilíbrio térmico na sala condicionada), uma vez que apenas está a ser estudada a 1ª Fase de secagem, logo não se verifica a totalidade da secagem nos provetes, encontrando-se assim a decorrer o processo evaporativo que contribui para a redução da temperatura registada. Por análise das figuras é também possível verificar que, em alguns casos, nomeadamente no caso de S e A-I, a curva de secagem difere de forma significativa, comparando ambos os ensaios realizados (B1 e B2). Estas situações devem-se ao facto de não se ter verificado a saturação capilar dos materiais, possivelmente porque estes não favoreceram a ascensão da água e conseqüente saturação capilar, afetando assim os resultados obtidos no processo de secagem.

De forma mais clara, por análise das figuras 3.44 a 3.47, nas quais são apresentadas a média das temperaturas superficiais medidas nos ensaios e a taxa de evaporação referente a cada material, é possível afirmar que um material que apresente uma taxa de evaporação mais elevada não terá de ser obrigatoriamente o material que oferece melhores condições de arrefecimento, ou seja, temperaturas superficiais mais baixas. Tal deve-se ao facto de existirem outros fatores que influenciam diretamente a temperatura superficial dos materiais, tal como o calor específico dos próprios materiais. Assim sendo, não se pode estabelecer uma correlação direta entre a taxa de evaporação e a temperatura superficial atingida pelo arrefecimento evaporativo. No entanto, foi possível verificar que, de entre todos os materiais, M apresenta uma das maiores taxas de evaporação e temperaturas superficiais mais baixas.

Através da observação das figuras 3.44 a 3.47 foi também possível confirmar a ideia defendida por Tournier *et al.* (2000), Rousset-Tournier (2001) e Gonçalves *et al.* (2012), que sugerem que a água não é garantidamente o elemento que apresenta uma maior taxa de evaporação, comparativamente com outros materiais porosos. Tal poderá dever-se à complexa disposição dos poros num material poroso e à curvatura dos meniscos, que pode dar origem a uma grande superfície de evaporação no material.

Em anexo, são também apresentados outros dados determinados nestes ensaios de secagem, nomeadamente as curvas de secagem referentes ao teor de água (%) das amostras (figura I.1 a I.10). Por análise destas figuras é possível perceber que, no caso de C e S, existe uma maior variação do teor de água durante os ensaios, tendo-se traduzido num registo de temperaturas superficiais mais baixas, comparativamente com os restantes materiais. Em anexo são também apresentadas figuras (II.1 a II.11) que permitem perceber em quais dos materiais estudados a quantidade de água evaporada (g/m^2), durante a realização do ensaio, foi maior. Desta forma,

verificou-se que a quantidade de água evaporada, independentemente de se tratar do ensaio B1 ou B2, foi maior nos materiais M, A-V e A-IV-A.

3.6.2 Ensaio C: Ensaio de secagem ao ar livre

Após a análise de todos os resultados referentes aos materiais no estado húmido (figuras 3.48, 3.52 e 3.56), verifica-se que, no caso em que o ensaio foi realizado ao sol e em que os registos das condições ambientais demonstraram valores de HR mais baixos (figura 3.49), as temperaturas superficiais apresentaram um maior decréscimo. Tal pode dever-se, de acordo com Henriques (2007), ao facto da capacidade de evaporação de água em excesso de materiais porosos ser função, sobretudo, do estado higrotérmico do ar em contacto com a superfície livre dos materiais, ou seja, quanto menor for a HR existente no ar, maior são as trocas de vapor de água entre o material e o ar, proporcionando o arrefecimento do ambiente, até ao instante em que se atinja o equilíbrio. Em geral, os materiais húmidos apresentaram uma variação da temperatura superficial entre si muito inferior, comparativamente com a variação verificada entre os materiais secos.

No caso dos ensaios realizados ao sol (C1 e C2), por observação das figuras 3.48 e 3.52, os materiais húmidos que apresentaram temperaturas superficiais mais baixas foram: CS L500 e C. No caso do CS L500, de acordo com Brito e Gonçalves (2013), este material apresenta algumas características (intrínsecas) que podem contribuir para a eficácia do processo de arrefecimento evaporativo, nomeadamente a elevada porosidade capilar e o elevado coeficiente de capilaridade, superior a qualquer um dos restantes materiais coerentes a ser estudado. Relativamente ao material incoerente C, os resultados obtidos vão de encontro à ideia apresentada por Wanphen e Nagano (2009), em que é afirmado que quanto maior forem os espaços entre as partículas, maior será a penetração da radiação solar e, conseqüentemente, haverá uma aceleração do processo evaporativo e uma diminuição da temperatura superficial. Das medições das temperaturas superficiais dos materiais no estado seco (figuras 3.50, 3.51, 3.54 e 3.55) foi possível perceber que, no caso de S, T e A-I, a temperatura superficial atingida por estes materiais, após uma hora de exposição ao sol, é muito elevada, cerca de 50°C. No entanto, durante o processo evaporativo a temperatura superficial era muito menor, cerca de 15 a 20°C inferior. O segundo ensaio (C2) realizado ao sol e tendo o cuidado de não causar qualquer sombreamento sobre os materiais aquando das medições, de modo a não falsear os resultados, ficou demonstrado que os resultados obtidos para a temperatura superficial de AD nos dois recipientes continua a diferenciar-se, embora estivessem sujeitas às mesmas condições (figura 3.52). Deste modo, tal poderá dever-se ao facto de neste ensaio não estar a ser controlado o fator vento, que poderá influenciar as medições, uma vez que este influencia diretamente o processo evaporativo e é variável no tempo. O vento é um fator que favorece as trocas de calor por radiação ou convecção, acelerando o processo evaporativo. Por exemplo, de acordo com Tournier *et al.* (2000), Rousset-Tournier (2001), Gonçalves *et al.* (2012) e Musa (2008), a taxa de secagem é superior numa superfície molhada, comparativamente com uma superfície livre de água, quando ambas expostas a uma baixa velocidade do vento ($V < 0.5 \text{ m/s}$). Caso a velocidade seja superior, a situação inverte-se (Tang *et al.* 2004). Importa também salientar a influência do calor

específico dos materiais na temperatura superficial, o qual não está a ser determinado neste trabalho, assim como também a influência do coeficiente de absorção solar destes.

No caso do ensaio realizado à sombra (C3) e relativamente aos materiais no estado húmido (figura 3.56), o valor das temperaturas superficiais obtido para todos os materiais foi muito idêntico e não mostram uma diferença significativa comparativamente com C, que é um material utilizado em dispositivos de arrefecimento por evaporação. No entanto o CS L500 é, de todos os materiais analisados, aquele que apresentou temperaturas superficiais mais baixas. Neste ensaio (C3) é também possível verificar que, por ação do sombreamento, as temperaturas superficiais registadas para os materiais húmidos encontram-se bastante abaixo das temperaturas ambiente e abaixo das temperaturas superficiais registadas para a água (figura 3.58 e 3.59). Esta situação permite concluir que, de um modo geral, todos os materiais apresentam características favoráveis ao arrefecimento evaporativo, quando dispostos à sombra. Relativamente a AD mais uma vez se pôde verificar, através da realização deste ensaio, que não se trata do elemento que proporciona melhores condições de arrefecimento evaporativo.

Em suma, por análise dos resultados obtidos no ensaio C, verifica-se que os materiais de construção utilizados correntemente têm elevado potencial de arrefecimento. Foi também perceptível através da análise dos resultados que, em condições ambientais de temperatura mais elevada e ambiente mais seco, isto é, HR baixa, o arrefecimento proporcionado por estes materiais surte maior efeito, pois as variações registadas entre os materiais no estado seco e no estado húmido são superiores (figura 3.51).

4 Conclusões

4.1 Considerações Finais

O desenvolvimento desta dissertação permitiu dar resposta aos objetivos pré-definidos, uma vez que se conseguiu avaliar o potencial de arrefecimento evaporativo dos materiais testados. Tratou-se de um trabalho que exigiu, numa primeira fase, uma pesquisa bibliográfica intensa, dada a escassez de informação relativamente a este tema e também dado tratar-se de uma temática que, embora abordada ao longo do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, nomeadamente em Física da Construção, não tinha sido detalhada a nível laboratorial. A pesquisa bibliográfica permitiu também delinear posteriormente todo o trabalho experimental desenvolvido.

Este trabalho permitiu investigar a capacidade de arrefecimento evaporativo de 10 materiais (coerentes e incoerentes), utilizando também a água, como elemento de referência. Para tal, foram realizados diversos ensaios de secagem, numa sala condicionada e no exterior, ao sol ou à sombra. Estes ensaios foram antecidos por um ensaio preliminar, realizado com vista a determinar o valor de emissividade dos diferentes materiais. Todos os ensaios decorreram durante o período de verão (julho e agosto). No caso dos ensaios realizados no exterior, existiu preocupação de que estes fossem realizados em dias quentes.

O estudo permitiu retirar as seguintes conclusões principais:

- Verificou-se uma baixa repetibilidade da técnica de determinação da emissividade, na qual se vai ajustando o valor introduzido no pirómetro até se obter o valor de temperatura superficial correspondente ao equilíbrio térmico nas condições de ensaio. Para ultrapassar esta limitação, foi adotado para todos os materiais em estudo um valor único de emissividade (0.92), que corresponde à média dos valores consultados através da bibliografia e aproxima-se também da média dos valores de emissividade medidos.
- No caso da serradura (S) e da areia de granulometria grossa (A-I), nem sempre foi possível assegurar a saturação capilar, possivelmente porque estes materiais não favorecem a ascensão e consequentemente a saturação capilar, afetando os resultados obtidos no processo de secagem.
- Não foi possível correlacionar a taxa de evaporação com as temperaturas superficiais registadas para cada material. Tal poderá dever-se à influência do calor específico de cada material, ou seja, da energia térmica necessária para mudar a temperatura superficial destes.
- O ensaio de secagem na sala condicionada permitiu concluir que, de uma forma geral, os materiais utilizados na construção e analisados neste trabalho apresentam um bom potencial de arrefecimento evaporativo.
- Os registos efetuados permitiram também comprovar que a água não é garantidamente o elemento que apresenta maior taxa de secagem, o que se pode refletir na temperatura superficial (embora esta temperatura não dependa apenas da taxa de secagem, pois também

depende do calor específico de cada material). Há, de facto, materiais que apresentam temperaturas superficiais mais baixas que a superfície livre de água, durante o processo evaporativo.

- Os ensaios de secagem realizados no exterior, ao sol, permitiram verificar que os materiais que oferecem melhores condições de arrefecimento são: a celulose (C) e o silicato de cálcio (CS L500). O mesmo ensaio, mas realizado à sombra, permitiu verificar que as temperaturas superficiais obtidas para os diferentes materiais eram muito idênticas entre si e sempre inferiores à da água
- Nos ensaios realizados no exterior, ao sol, alguns dos materiais no estado seco, nomeadamente a serradura (S), a areia siliciosa de granulometria grossa (A-I) e o tijolo cerâmico (T) alcançaram uma temperatura superficial elevada (cerca de 50°C), tendo o processo evaporativo reduzido este valor em cerca de 15 a 20°C.

Em suma, os resultados obtidos indicam que, para condições de temperatura elevada (superiores a 30°C) e HR baixa (inferior a 50%), os materiais que apresentam maior potencial de arrefecimento são: CS L500 e C (material utilizado habitualmente em dispositivos mecânicos de arrefecimento). Numa situação em que se verifiquem temperaturas amenas, na ordem dos 20°C e com uma HR na ordem dos 50%, o material que parece apresentar um melhor potencial de arrefecimento é o calcário “Maastricht” (M).

O trabalho realizado indica que, genericamente, materiais de construção vulgares, como o tijolo cerâmico ou as pedras naturais, podem ser utilizados de forma eficaz para fins de arrefecimento evaporativo em climas quentes e secos, podendo ser portanto utilizados para reduzir as necessidades energéticas dos edifícios.

4.2 Desenvolvimentos futuros

Visto que no âmbito deste trabalho não foi possível abordar todos os aspetos desejados, sobretudo relacionados com questões surgidas no decorrer do trabalho, apresentam-se de seguida algumas sugestões que se consideram pertinentes para desenvolvimentos futuros no âmbito desta temática:

- Estudar a influência do calor específico e do coeficiente de absorção solar dos diferentes materiais na sua temperatura superficial.
- Repetir os ensaios de secagem realizados no laboratório, cingindo os materiais a determinadas velocidades e direções de vento pré-definidas, de modo a perceber até que ponto este fator influencia a secagem dos materiais e consequentemente o arrefecimento.
- Sujeitar os materiais a diferentes temperaturas, numa escala entre -10°C e 45°C e determinar a sua emissividade, recorrendo por exemplo ao uso de um equipamento específico como um emissómetro portátil.
- De modo a perceber até que ponto a rugosidade afeta a emissividade dos materiais, preparar

vários provetes do mesmo material com diferente acabamento superficial e efetuar de novo medições da temperatura superficial.

- Particularmente no que respeita aos materiais que se mostraram mais vantajosos, dado o seu contributo para o arrefecimento evaporativo de ambientes, interessa também conhecer a sua durabilidade, após serem sujeitos a vários ciclos de humedecimento-secagem-humedecimento e determinar a sua resistência mecânica.

Referências bibliográficas

- ANACLETO, A. – *Temperatura e sua medição*. Dissertação de Mestrado em Física, Porto, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, 2007.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) - D4404-84 (2004) – *Standard test method for determination of pore volume and pore volume distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimetry*. ASTM, 2004.
- BOM, G.; FOSTER, R.; DIJKSTRA, E.; TUMMERS, M. – *Evaporative air-conditioning: Applications for environmentally friendly cooling*. Washington, The World Bank, 1999.
- BRITO, V. – *Influência dos revestimentos por pintura na secagem do suporte*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, 2009.
- BRITO, V.; GONÇALVES, T.; FARIA, P. – *Coatings applied on damp building substrates: Performance and influence on moisture transport*. Journal of Coatings Technology and Research, Volume 8, págs. 513-525. American Coatings Association (ACA), 2011.
- BRITO, V.; GONÇALVES, T. – *Artisanal lime coatings and their influence on moisture transport during drying*. HMC13 - 3rd Historic Mortars Conference, Glasgow, 11-14 September 2013.
- CIAMPI, M. ; LECCESE, F. ; TUONI, G. - *Sull'impiego delle pareti ventilate per la riduzione dei carichi termici estivi*. 2002.
http://www.lateriziofacciavista.it/FAV/UserFiles/File/BIBLIOTECA/EnergiaComfortTermico/89_70_75.pdf (25/11/2013).
- COOK, J. – *Passive cooling*. United States, Cambridge MA, 1989.
- CONTEMP - *Adendo: Tabelas de emissividade*. S/d.
http://www.contemp.com.br/downloads/pdf/Tabela_de_Emissividades.pdf (16/09/2013).
- DE CLERCQ, H.; JOVANOVIĆ, M.; LINNOW, K.; STEIGER, M. – *Performance of limestones laden with mixed salt solutions of - Na₂SO₄-NaNO₃ and Na₂SO₄-K₂SO₄*. Environmental Earth Sciences, Volume 69, págs. 1751-1761. Springer-Verlag, 2012.
- DECRETO-LEI nº118/2013. D.R. 1ª Série nº159 (2013-08-20) págs. 4988-5005.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION (CEN) – EN 1015-11:1999/A1:2006 – *Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels, CEN, 1999.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDISATION (CEN) – EN 1015-2:1998/A1:2006 - *Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels, CEN, 1998.
- FARIA, P. – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estado de influência dos ligantes*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, 2004.

- FERNSTROM, G. – *Analysis of standards options for evaporative coolers*. Pacific Gas and Electric Company. 2004.
http://www.energy.ca.gov/appliances/2003rulemaking/documents/case_studies/CASE_Evaporative_Cooler.pdf (09/02/2013).
- FLIR SYSTEMS - *FLIR Reporter Professional. Manual del usuario*. Espanha, 2009.
[http://support.flir.com/DocDownload/Assets/46/Spanish/1558568\\$a401.pdf](http://support.flir.com/DocDownload/Assets/46/Spanish/1558568$a401.pdf) (16/09/2013).
- GIVONI, B. – *Passive low energy cooling of buildings*. Hoboken (New Jersey), John Wiley & sons, Inc., 1994.
- GONÇALVES, H.; GRAÇA, J. – *Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal*. Lisboa, 2004.
<http://www.lneg.pt/download/4117/ConceitosBioclimáticos.pdf> (04/03/2013).
- GONÇALVES, T. - *Salt crystallization in plastered or rendered walls*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2007.
- GONÇALVES, T.; BRITO, V.; PEL, L. – *Water vapor emission from rigid mesoporous materials during the constant drying rate period*. Drying Technology, Volume 30, págs. 462-474. Taylor & Francis, 2012.
- HE, J.; HOYANO, A. – *A 3D CAD-based simulation tool for prediction and evaluation of the thermal improvement effect of passive cooling walls in the developed urban locations*. Solar Energy, Volume 83, págs. 1064-1075. Elsevier, 2009.
- HE, J.; HOYANO, A. – *Experimental study of cooling effects of a passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramics with high water soaking-up ability*. Building and Environment, Volume 45, págs. 461-472. Elsevier, 2010.
- HE, J.; HOYANO, A. – *Experimental study of practical applications of a passive evaporative cooling wall with high water soaking-up ability*. Building and Environment, Volume 46, págs. 98-108. Elsevier, 2011.
- HENRIQUES, F. – *Humidade em paredes*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2007.
- HENRIQUES, F. – *Comportamento higrotérmico de edifícios*. 2011.
http://www2.dec.fct.unl.pt/~fh/personal/pt/Higrotermica_v11.3.pdf (18/06/2013).
- IEA- *Technology Roadmap – Energy-efficient buildings: Heating and cooling equipment*. Paris, 2011.
http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/buildings_roadmap.pdf (09/11/2013).
- INE/DGEG – *Inquérito ao consumo de energia no setor doméstico (2010)*. Lisboa, 2011.
<http://www.dgeg.pt/> (09/11/2013).
- Infratemp – *Termometria infravermelha - teoria básica*. 2010.
<http://www.infratemp.com.br/imagensDinamica/comofunciona/1412011090301.pdf> (27/12/2013).
- Instituto Português da Qualidade (IPQ) – NP EN 196-1:2006 – *Métodos de ensaios de cimentos*. Parte 1: *Determinação das resistências mecânicas*. Lisboa, IPQ, 2006.
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). Lisboa. <http://www.ipma.pt> (09/08/2013, 12/08/2013 e 13/08/2013).

- JANSSENS, M. – *Improved method for analyzing ignition data from the cone calorimeter in the vertical orientation*. Porto Rico, s/d. <http://www.iafss.org/publications/fss/7/803/view> (16/09/2013).
- JAPANESE INDUSTRIAL STANDARD (JIS) / JAPANESE STANDARDS ASSOCIATION (JSA) – JIS A 1435:1991 – *Test methods for frost resistance of exterior wall materials of buildings (Freezing and thawing method)*. Japan, JIS, 1991.
- MALLI, A.; SEYF, Hamid R.; LAYEGHI, M.; BEHRAYESH, H. - *Investigating the performance of cellulosic evaporative cooling pads*. Energy Conversion and Management, Volume 52, págs. 2598-2603. Elsevier, 2011.
- MUSA, M. – *Novel evaporative cooling systems for building applications*. Dissertação de Doutorado, England, University of Nottingham, 2008.
- NATICCHIA, B.; D'ORAZIO, M.; CARBONARI, A.; PERSICO, I. – *Energy performance evaluation of a novel evaporative cooling technique*. Energy and Buildings, Volume 42, págs. 1926-1938. Elsevier, 2010.
- OKADA, K.; MATSUI, S.; ISOBE, T.; KAMESHIMA, Y.; NAKAJIMA, A. – *A Water-retention properties of porous ceramics prepared from mixtures of allophane and vermiculite for materials to counteract heat islands effects*. Ceramics International, Volume 34, págs. 345-350. Elsevier, 2008.
- OLIVEIRA, L. – *Otimização energética de um sistema de climatização industrial*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2012.
- PEREIRA, T. – *Otimização das características de humedecimento e secagem de argamassas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, 2008.
- RAYTEK – *High performance infrared thermometer*. S/d. http://www.instrumart.com/assets/MX4_manual.pdf (16/09/2013).
- RILEM TC 25-PEM (1980) – *Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods*. Materials and Structures, Volume 13, págs. 195-197 (Test No. II.1 “Saturation coefficient”), págs. 204-207 (test No. II.5 “Evaporation curve”, pág. 209 (Test No. II.6 “Water absorption coefficient (capillarity)”), Paris, 1980.
- ROUSSET-TOURNIER, B. - *Transferts par capillarité et évaporation dans des roches. Rôle des structures de porosité*. Thèse de doctorat, Strasbourg, Université Louis Pasteur, 2001.
- SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. – *Passive cooling of buildings*. James & James (Science Publishers) Lda., London, 1996.
- SLÍZKOVÁ, Z.; FRANKEOVÁ, D. – *Consolidation of porous limestone with nanolime laboratory study*. 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Itália, 24 October 2012.
- TANG, R.S.; ETZION Y. – *On thermal performance of an improved roof pond for cooling buildings*. Building and Environment, Volume 39, págs. 201-209. Elsevier, 2004.
- TOURNIER, B.; JEANETTE, D.; DESTRIGNEVILLE, C. – *Stone drying: An approach of the effective evaporating surface area*. 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice, June 19–24, 2000.

TOYA, T.; KAMESHIMA, Y.; YASUMORI, A.; OKADA, K. – *Gas permeability of the porous alumina ceramics with uni-directionally aligned pores by extrusion method*. Journal of European Ceramics Society, Volume 27, págs. 53-59, 2007.

WANPHEN, S.; NAGANO, K. – *Experimental study of the performance of porous materials to moderate the roof surface temperature by its cooling effect*. Building and Environment, Volume 44, págs. 338-351. Elsevier, 2009.

VISSERS, D. – *Study on building integrated evaporative cooling of large glass-covered spaces*. Netherlands, University of Technology Eindhoven. 2011.
http://archbps1.campus.tue.nl/bpswiki/images/8/86/Vissers_Rapport.pdf (21/11/2013).

XUAN, Y.; XIAO, F.; NIU, X.; HUANG, X.; Wang S. – *Research and application of evaporative cooling in China: A review (I) – Research*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 16, págs. 3535-3546. Elsevier, 2012.

Anexos

Anexo I – Teor de água das amostras

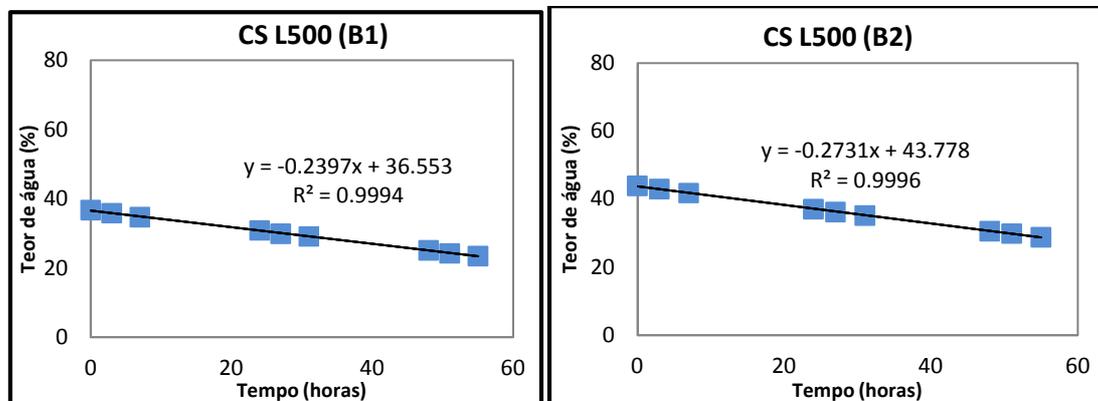


Figura I.1 – Curvas de secagem de CS L500, referentes aos ensaios B1 e B2, respetivamente.

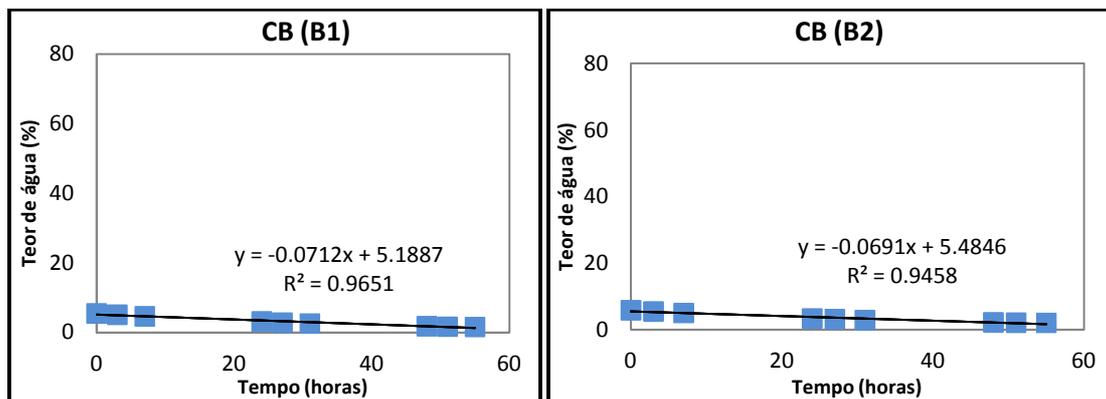


Figura I.2 – Curvas de secagem de CB, referentes aos ensaios B1 e B2, respetivamente.

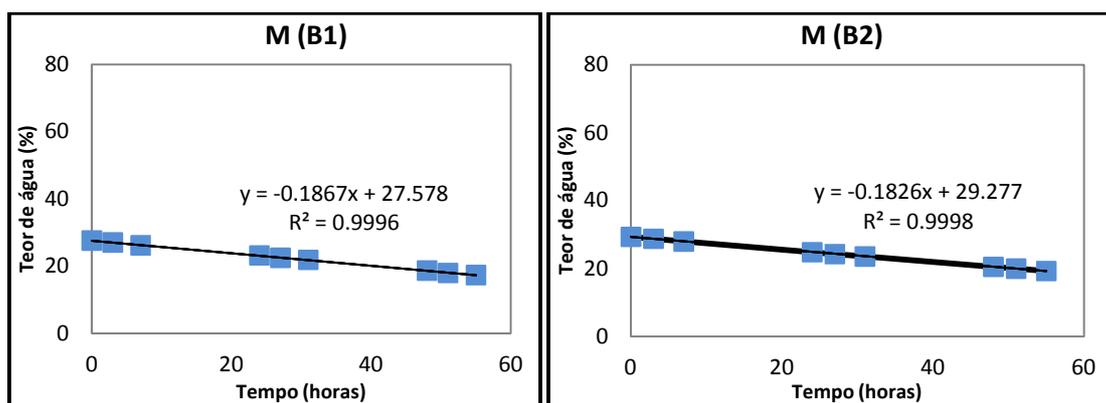


Figura I.3 – Curvas de secagem de M, referentes aos ensaios B1 e B2, respetivamente.

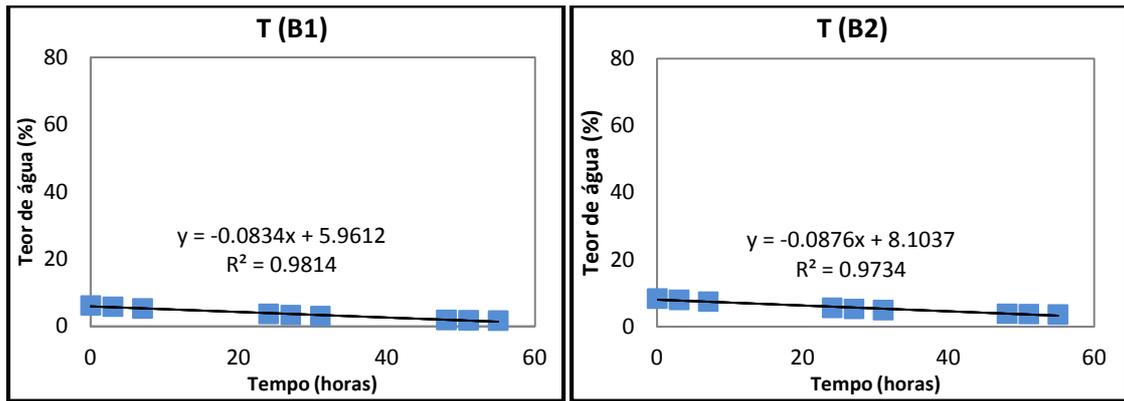


Figura I.4 – Curvas de secagem de T, referentes aos ensaios B1 e B2, respetivamente.

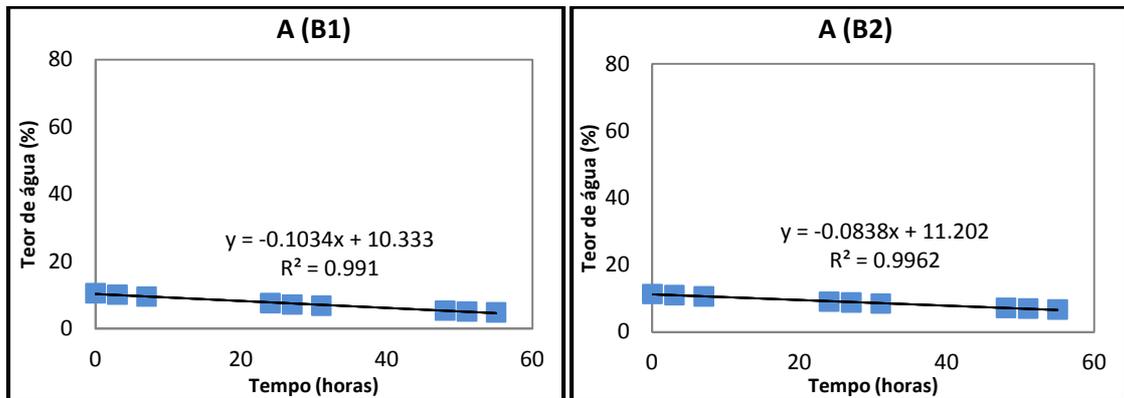


Figura I.5 – Curvas de secagem de A, referentes aos ensaios B1 e B2, respetivamente.

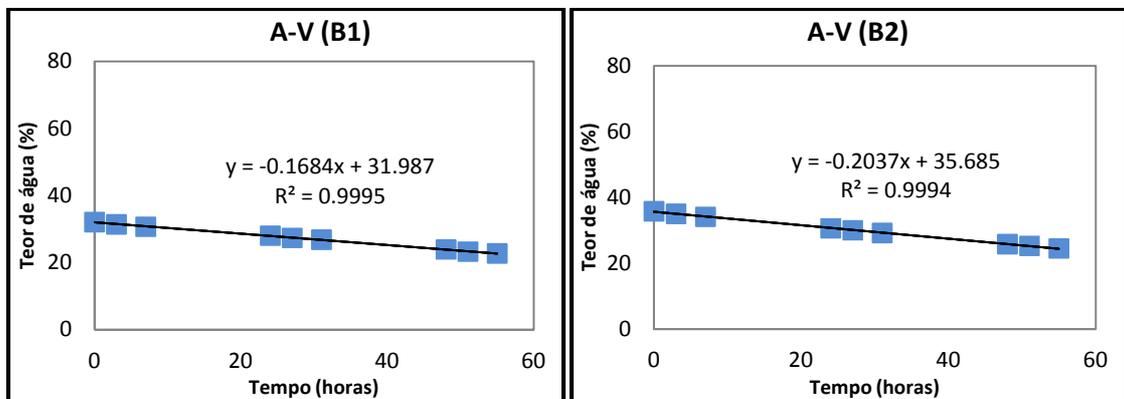


Figura I.6 – Curvas de secagem de A-V, referentes aos ensaios B1 e B2, respetivamente.

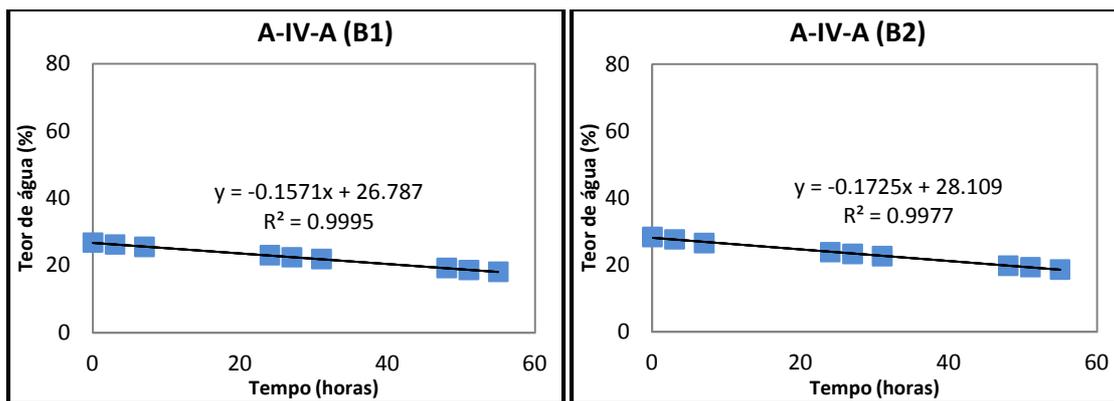


Figura I.7 – Curvas de secagem de A-IV-A, referentes aos ensaios B1 e B2, respetivamente.

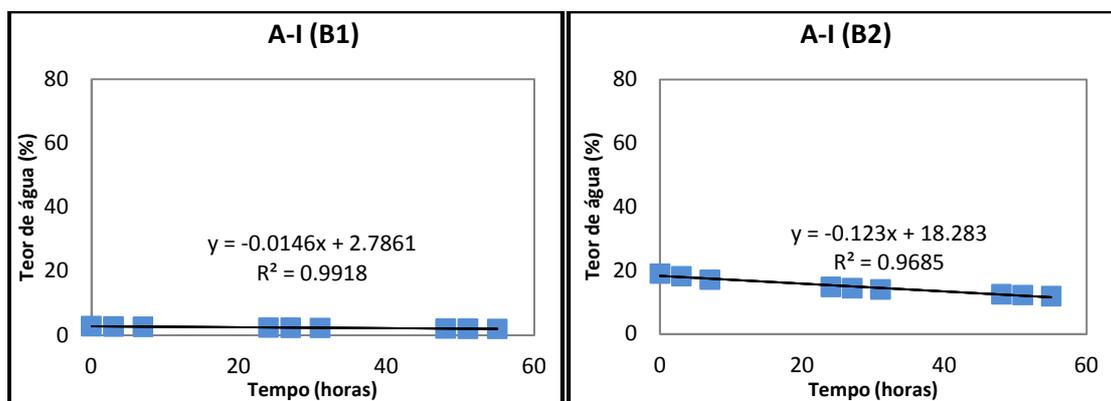


Figura I.8 – Curvas de secagem de A-I, referentes aos ensaios B1 e B2, respetivamente.

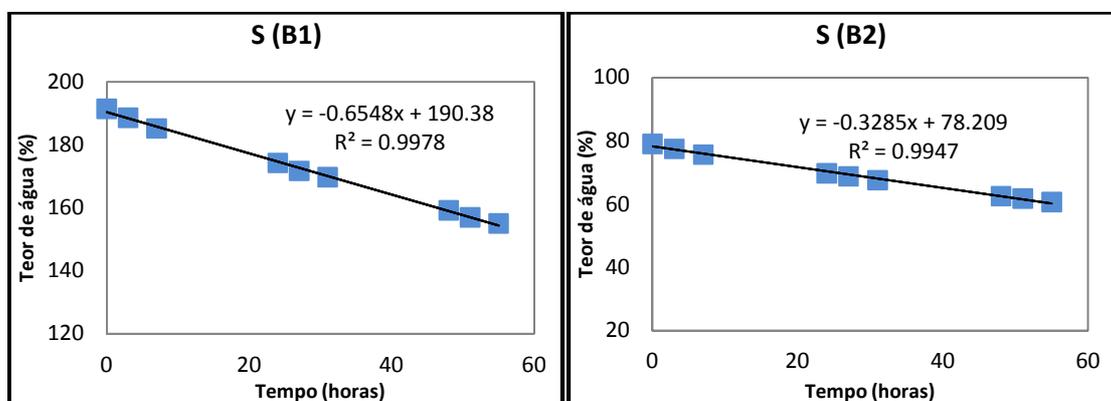


Figura I.9 – Curvas de secagem de S, referentes aos ensaios B1 e B2, respetivamente.

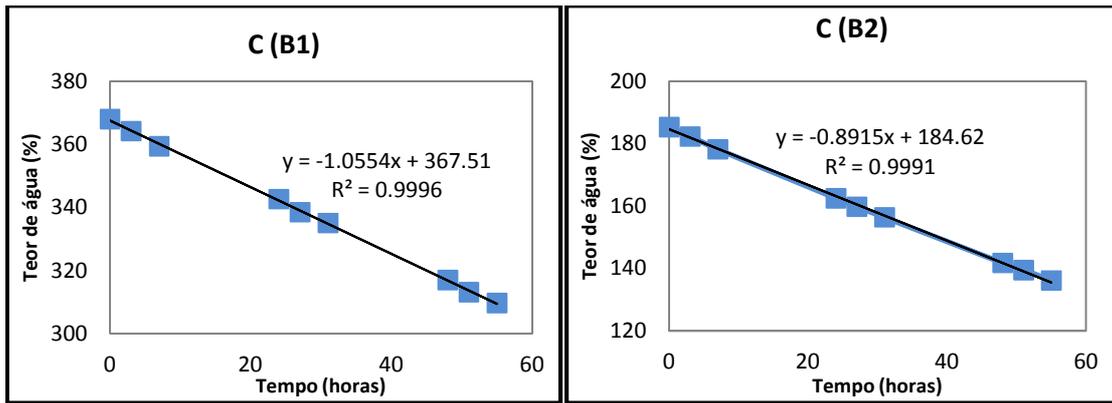


Figura I.10 – Curvas de secagem de C, referentes aos ensaios B1 e B2, respetivamente.

Anexo II – Quantidade de água evaporada

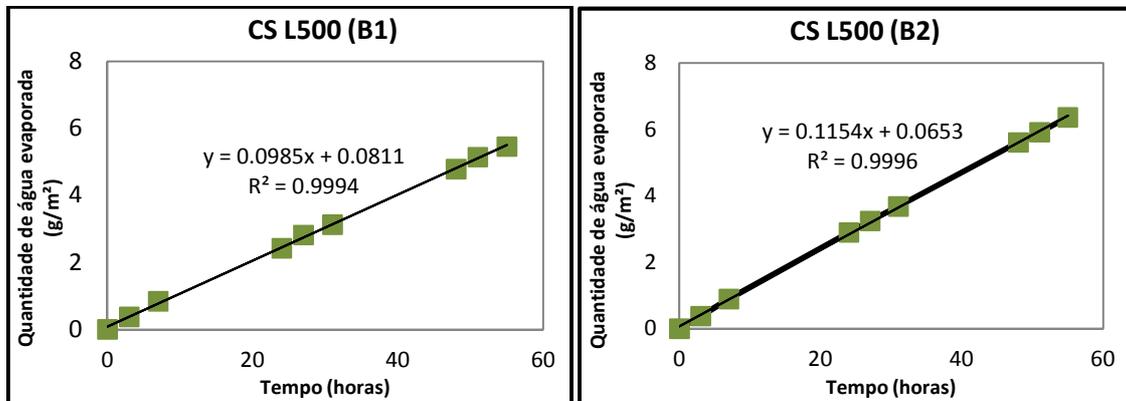


Figura II.1 – Quantidade de água evaporada (g/m²) em CS L500, nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

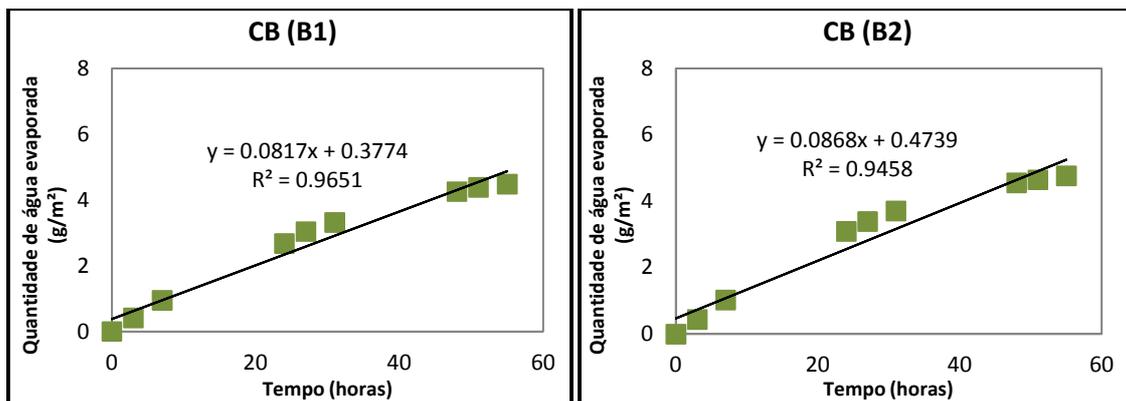


Figura II.2 – Quantidade de água evaporada (g/m²) em CB, nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

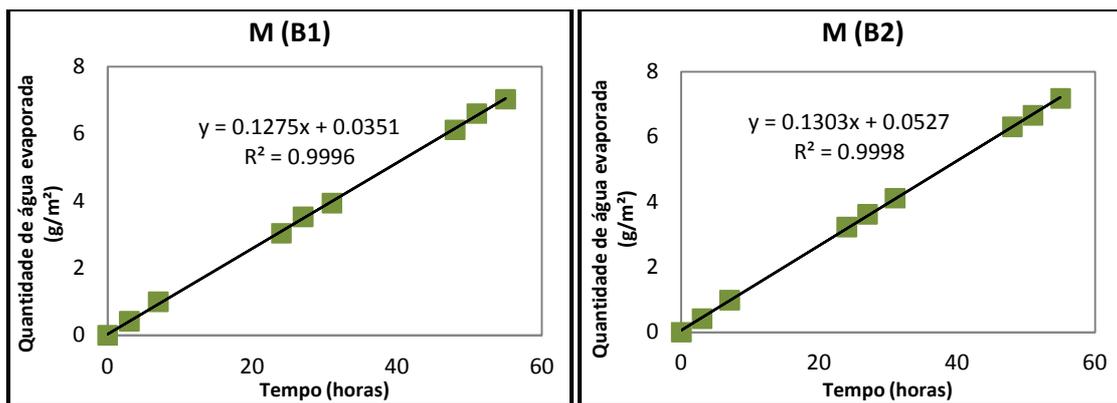


Figura II.3 – Quantidade de água evaporada (g/m²) em M, nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

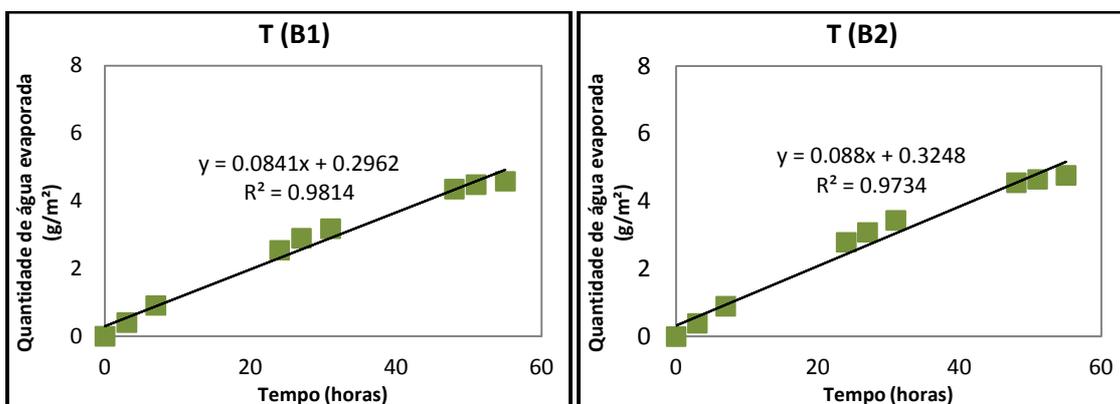


Figura II.4 – Quantidade de água evaporada (g/m²) em T, nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

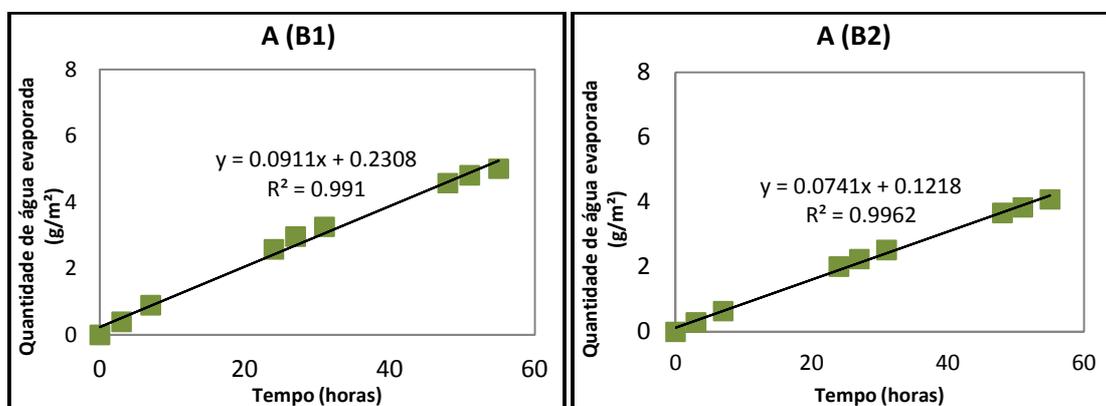


Figura II.5 – Quantidade de água evaporada (g/m²) em A, nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

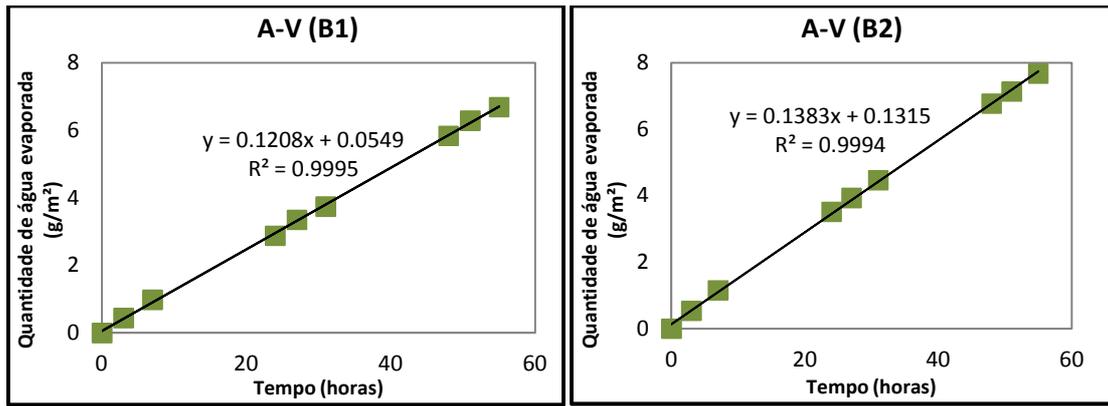


Figura II.6 – Quantidade de água evaporada (g/m^2) em A-V, nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

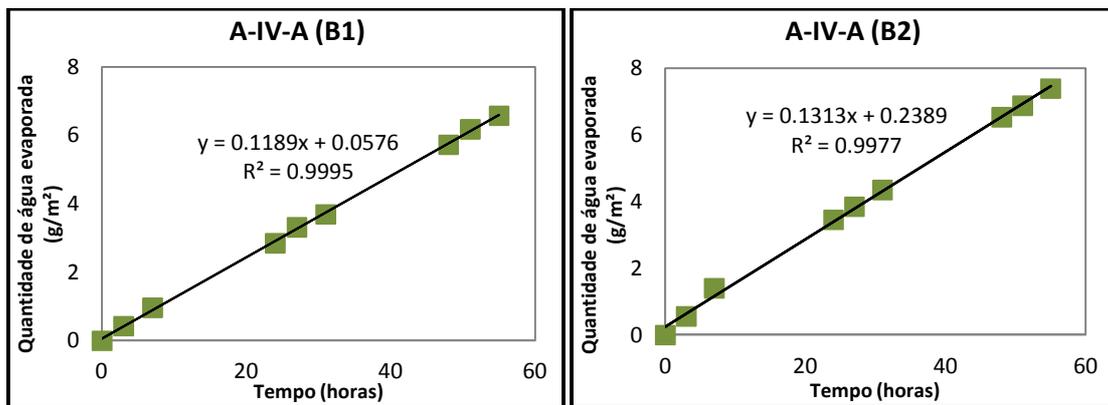


Figura II.7 – Quantidade de água evaporada (g/m^2) em A-IV-A, nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

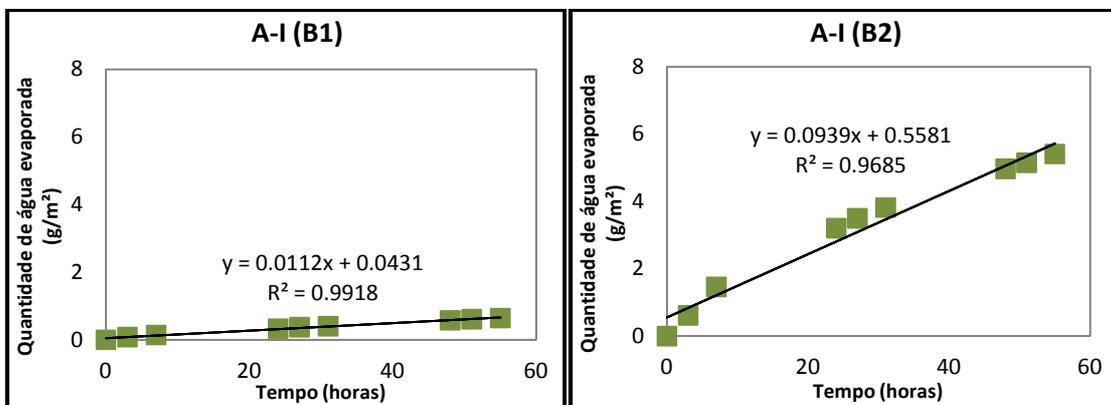


Figura II.8 – Quantidade de água evaporada (g/m^2) em A-I, nos ensaios B1 e B2, respetivamente.

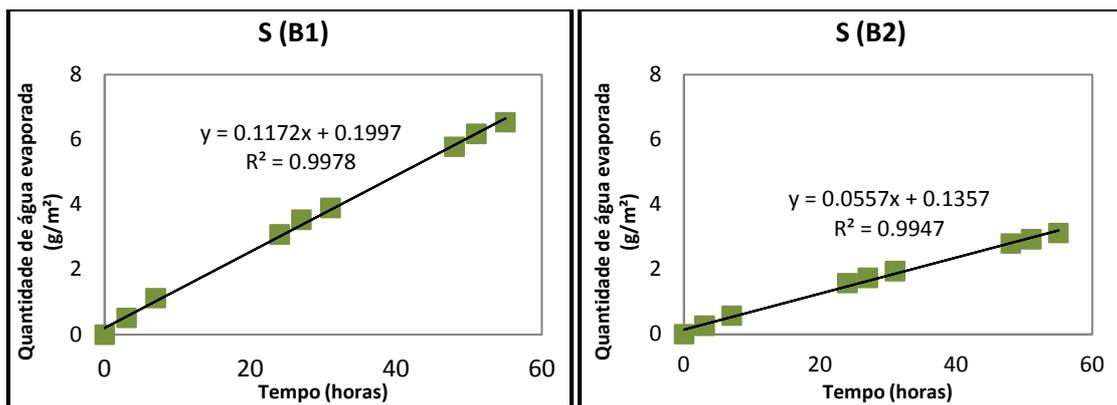


Figura II.9 – Quantidade de água evaporada (g/m²) em S, nos ensaios B1 e B2, respectivamente.

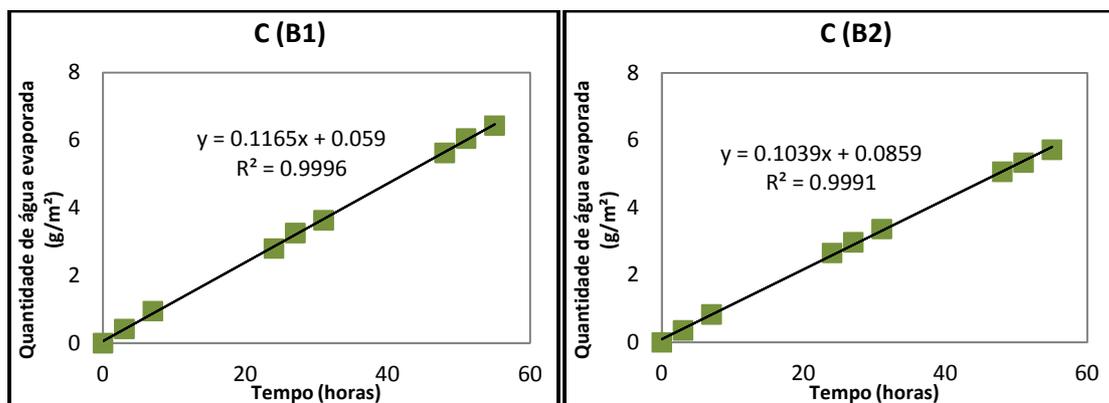


Figura II.10 – Quantidade de água evaporada (g/m²) em C, nos ensaios B1 e B2, respectivamente.

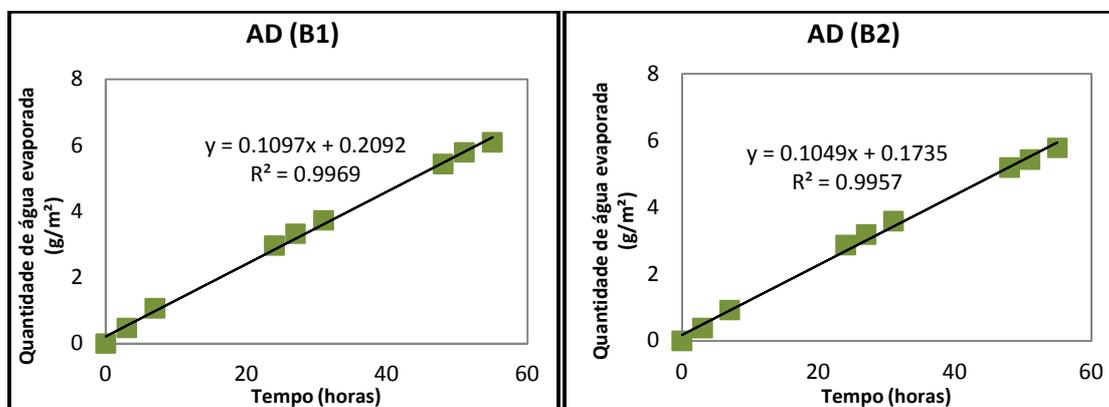


Figura II.11 – Quantidade de água evaporada (g/m²) em AD, nos ensaios B1 e B2, respectivamente.