

**Análise experimental do comportamento térmico de
construções em terra**

Sofia Gama Caldas Sampaio

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Arquitectura

Orientadores:

Prof.^a Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Prof. Doutor António Álvaro Borges Abel

Júri

Presidente: Prof. Doutor Manuel de Arriaga Brito Correia Guedes

Orientador: Prof.^a Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Vogal: Prof.^a Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues

Maio 2014

RESUMO

A crescente necessidade de diminuir a emissão de dióxido de carbono da indústria da construção, têm conduzido à procura de soluções e materiais mais sustentáveis ao longo de todo o seu ciclo de vida. É neste contexto que o interesse pela construção em terra renasceu e começou novamente a ser utilizado como material construtivo. O facto de a construção em terra ter pouca energia incorporada, ser bastante ecológica uma vez que a terra pode ser obtida *in loco*, ser económica, reciclável, ter bom comportamento acústico e térmico devido à sua elevada massa o que conduz a um elevado isolamento acústico e a uma grande inércia térmica das grossas paredes são os motivos que levam a adopção da terra como um dos materiais construtivos do séc. XXI. Assim, existe um crescente número de trabalhos de investigação no domínio da construção com terra, de avaliação do comportamento quer de construções antigas quer de construções novas, tendo como objectivo a sua sistematização, regulamentação e, como consequência, uma aplicação crescente e mais consciente desta solução.

Neste estudo são apresentados os resultados de duas campanhas de monitorização *in situ*, realizados durante os períodos de Verão e Inverno. As monitorizações foram realizadas em três habitações unifamiliares diferentes, localizadas na região de Abrantes, Portugal. Essas habitações foram construídas recorrendo à técnica da taipa e apresentam paredes com 50-55 cm de espessura. Foram monitorizados diferentes parâmetros a fim de avaliar o comportamento térmico das paredes em taipa, tais como: a radiação global incidente em plano vertical da fachada; temperatura ambiente interior e exterior; temperatura superficial interior e exterior da parede; fluxos de calor e humidade relativa do ar. Adicionalmente, foram também obtidas a condutibilidade térmica, o calor específico volumétrico e a difusividade térmica utilizando um equipamento portátil. Os resultados experimentais revelaram existir uma grande inércia térmica das paredes levando, normalmente, a temperaturas ambiente interiores bastante baixas em ambas as estações. Os resultados também demonstram a necessidade de melhorar a condutibilidade térmica da terra a fim de cumprir os valores recomendados na regulamentação térmica.

Adicionalmente foi realizado um trabalho experimental que visa o estudo do comportamento térmico de blocos de terra comprimida, com a incorporação de materiais isolantes. Foram utilizados dois tipos de terra e três tipos de materiais isolantes na mistura, nomeadamente, granulado de cortiça, agregado leve de argila expandida e vermiculite. Foi medida a condutibilidade térmica dos blocos para diferentes teores de humidade e tempos de secagem. A incorporação de 1,5% de granulado de cortiça foi o mais eficaz, levando a uma redução da condutibilidade térmica superior a 55-60%, dependendo das condições de cura. No entanto, para todas as soluções previstas, o coeficiente de condutividade térmica foi inferior a $0,65 \text{ W / m }^\circ \text{ C}$ em condições secas.

Palavras – chave: Arquitectura em terra; comportamento térmico; monitorização térmica *in situ*; parede de taipa; bloco de terra comprimida.

ABSTRACT

In order to decrease the carbon dioxide emission of the construction industry, efforts have been made in finding more sustainable construction's solutions and materials throughout their whole life cycle. It is in this context that interest in earth construction had reborn and started again to be applied in the construction sector. The earth construction has very low embodied energy, it's very environment friendly since the earth can be obtained *in loco*, economical, recyclable, has good acoustic and thermal behavior due to the high mass of the walls which results in a high acoustic insulation and high thermal inertia of the thick walls. Those are the reasons that lead to the adoption of the earth as a building material for the 21st century. For all these reasons, there is an increase in the number of papers that have been published about the evaluation of earth constructions behavior both of old and new buildings, aiming its systematization, regulation and, as a consequence, an increasing of its application in construction.

In this study, the results of in situ measurement campaigns, carried out during the summer and winter periods, are presented. They were performed on three different single-family dwellings located in Abrantes, Portugal. These dwellings were built using the rammed-earth technique, each one having walls with 50-55 cm of thickness. Several experimental measurements were conducted in order to evaluate the rammed-earth wall thermal behavior, such as: the incident global radiation on vertical plane of the facade; indoor and outdoor environment temperatures and moisture; indoor and outdoor surfaces wall temperatures; and heat fluxes. Moreover, walls' thermal conductivity, volumetric heat capacity and thermal diffusivity were also obtained using a portable measuring instrument. The experimental results revealed a large thermal inertia of the walls, which led to low indoor temperatures in both seasons. The results also demonstrate the need to improve the thermal conductivity of the earth in order to meet the requirements of the building regulations.

Additionally, it is carried a study of the thermal conductivity of compressed earth blocks (CEBs) improved with different insulating aggregate additions. Two different types of earth and three kinds of insulating materials were used in the mixture, namely cork, lightweight expanded clay aggregate and vermiculite. The thermal conductivity of CEB is evaluated for different water contents and at different ages. The incorporation of 1.5% of granulated cork was the most effective, leading to a reduction on the thermal conductivity up to 55-60%, depending on the curing conditions. Nevertheless, for all the envisaged CEB solutions, the thermal conductivity coefficient was lower than 0.65 W/m. °C in dried conditions.

Keywords: Earth architecture; thermal behavior; in situ monitoring; rammed earth wall; compressed earth block.

AGRADECIMENTOS

À Professora Maria da Glória Gomes por me ter proporcionado as condições necessárias para a elaboração deste trabalho de investigação, por me ter ensinado e ajudado a seguir o caminho certo e a aumentar os meus conhecimentos científicos. Agradeço também o apoio e a força que me deu nos momentos em que a motivação escasseava, que fizeram com que chegasse ao fim deste trabalho com uma enorme satisfação.

Ao Professor António Borges Abel pela co-orientação nesta investigação. Pela sabedoria e experiência arquitectónica que me transmitiu em conversas e com o contacto com casos reais de construção em terra, ajudando-me a compreender e a pesquisar cada vez mais e melhor todas as minhas questões.

À Dona Albertina pela sua amabilidade e disponibilidade ao longo da campanha experimental em Casais de Revelhos.

Ao Sr. Herminio, sua esposa e todos os habitantes do Pego que demonstraram um enorme interesse pelo meu trabalho e que, mexendo “mundos e fundos”, tornaram possível a sua realização.

À empresa Contimetra Lda pela ajuda oferecida e pela cedência do material necessário à concretização da campanha experimental e aos seus colaboradores que ajudaram na configuração da parte electrotécnica do trabalho.

Aos meus queridos pais que nunca desistem de nos apoiar nas nossas lutas diárias e que nos ajudam sempre, incondicionalmente, para que os sonhos, meus e dos meus irmãos, se concretizem. Estou especialmente grata neste trabalho pela paciência e dedicação que tiveram para me ajudarem a resolver todos os problemas (electrotécnicos) que surgiram. Pelas noites mal dormidas a pensar em soluções melhores. Pelas coisas que funcionavam e depois deixavam de funcionar. Por todo o “know-how” essencial para a concretização das campanhas experimentais. E pela companhia nas várias viagens a Abrantes. Sem vocês teria sido impossível atingir os meus objectivos. Obrigada por tudo.

Aos meus queridos irmãos e toda a minha Família pelas palavras encorajadoras e por acreditarem sempre em mim e no meu trabalho. À tia Zita que, à força, ficou mestre em comportamento térmico de construções em terra! Obrigada por toda a ajuda e tempo despendido.

Ao Miguel que acompanhou de perto todos os meus altos e baixos. Pela paciência com que nos momentos mais difíceis me ajudou a levantar a cabeça e a enfrentar os problemas. Pela companhia nas inúmeras viagens a Abrantes. Pelas horas intermináveis passadas ao frio à espera dos resultados dos ensaios. Por todos os momentos que fizeram desta experiência uma experiência memorável.

A todos os meus queridos amigos, um por um, que conseguem sempre transformar os meus caminhos sinuosos em belas caminhadas e que, apesar da minha ausência, nunca se afastaram. Um grande e especial obrigada à Carlota, à Roxana e à Catarina que, por falta de coisas mais interessantes para fazer no fim-de-semana, gentilmente me acompanharam nas minhas longas jornadas a Abrantes e a Montemor-o-Novo.

Estou igualmente grata ao “Telheiro da Encosta do Castelo” pela sua vontade de dinamização da construção em terra e por ter disponibilizado o seu espaço para a fabricação dos blocos de terra comprimidos. Em especial, quero agradecer ao Arq. Nuno Grenha que, através da sua visão e paixão pela construção em terra, me transmitiu o conhecimento e a vontade de querer explorar novos caminhos. É com a sua persistência e dedicação que a terra se manterá viva na arquitectura portuguesa.

Ao Professor Alexandre Bogas pela sua orientação e pela sua disponibilidade na realização da investigação dos blocos de terra comprimida.

ÍNDICE GERAL

RESUMO.....	i
ABSTRACT	iii
AGRADECIMENTOS	v
ÍNDICE GERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xv
ACRÓNIMOS.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento geral.....	3
1.1.1 Sustentabilidade e a importância do sector da construção	3
1.2 Objectivos	6
1.3 Metodologia	6
1.4 Organização do trabalho	6
2. A TERRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	9
2.1 Considerações iniciais.....	11
2.2 Soluções de construção em terra	11
2.3 Vantagens e desvantagens da construção em terra	13
2.4 A construção em terra na arquitectura em Portugal.....	15
2.5 Contexto social e económico.....	17
2.6 A Terra	18
2.3.1 Composição do solo	19
2.3.2 Ensaios para caracterização do solo.....	19
2.3.3 Ensaios para a caracterização da influência da água e vapor de água e da resistência mecânica	21
2.3.4 Ensaios para a caracterização térmica	21
2.7 Comportamento térmico da construção em terra – Estado da arte	22
3. DESCRIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO	27
3.1 Considerações iniciais.....	29
3.2 Caracterização e análise climática de Abrantes	29
3.2 A população e a casa tradicional de Abrantes.....	32
3.3 Casos de estudo – apresentação e descrição	33
3.1.1 Caso de estudo 1	33
3.1.2 Caso de estudo 2	35
3.1.3 Caso de estudo 3	37
4. CAMPANHA EXPERIMENTAL DE MONITORIZAÇÃO TÉRMICA	39
4.1 Considerações iniciais.....	41

4.2	Procedimento Experimental.....	41
4.2.1	Períodos de Monitorização	41
4.2.2	Descrição do equipamento e caracterização dos elementos construtivos	42
a)	Caso de Estudo 1	45
b)	Caso de Estudo 2	47
c)	Caso de Estudo 3	48
4.3	Resultados Experimentais	50
4.3.1	Análise de dados - Os Dias Tipo.....	50
4.3.1.1	Campanha de Inverno	53
a)	CS1 – 10 de Fevereiro de 2013	57
b)	CS2 - 27 de Fevereiro de 2013	61
c)	CS3 – 13 de Março de 2013	64
4.3.1.2	Campanha de Verão	67
a)	CS1 – 3 de Junho de 2013	69
b)	CS2 – 30 de Junho de 2013	72
4.3.1.3	Análise comparativa entre os casos de estudo	74
4.3.2	Determinação da condutibilidade térmica, difusividade térmica e coeficiente de transmissão térmica das paredes	76
4.3.2.1	Descrição do Equipamento e Procedimento Experimental	76
4.3.2.2	Apresentação e discussão de resultados.....	77
4.3.2.3	Cálculo do Coeficiente de Transmissão Térmica	79
4.3.3	Coeficiente de transmissão térmica das paredes de taipa monitorizada	80
4.3.3.1	Metodologia de cálculo	80
4.3.3.2	Metodologia de Instalação e Condicionantes	81
4.3.3.3	Especificações do ensaio	82
4.3.3.4	Resultados – Médias diárias	83
5.	COMPORTAMENTO TÉRMICO DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS ISOLANTES	87
5.1	Considerações iniciais.....	89
5.2	Ensaio experimentais	89
5.2.1	Terra	89
5.2.2	Materiais isolantes incorporados	91
5.2.3	Misturas	91
5.2.4	Produção dos BTCs.....	92
5.2.5	Procedimento experimental	93
5.2.6	Apresentação e discussão de resultados	93
6.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	99

6.1	Conclusões.....	101
6.2	Desenvolvimentos futuros.....	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
	ANEXOS	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Alguns exemplos internacionais de edifícios construídos através da técnica da taipa: a. Habitação unifamiliar, Austrália. Arq. David Oliver (http://arquitecturasdeterra.blogspot.pt/); b. Capela da Reconciliação, Alemanha. Arq. Rudolf Reiterman and Peter Sassenrath (www.mimooa.eu); c. Nk'Mip Desert Interpretive Center, Canada. Arq. HBBH Architects (http://www.inspirationgreen.com/); d. Escola de Artes Plásticas, Oaxaca, México. Arq. Maurício Rocha (http://www.world-architects.com/); e. House in Victoria, Australia. Arq. Jolson Architecture Interiors (http://www.archdaily.com/).	4
Figura 1.2 – Exemplos de construção em taipa em Portugal: a. Moradia em Beja, Portugal. Arq. Bartolomeu Costa Cabral (http://eartharchitecture.org/); b. Moradia no Alentejo, Portugal. Arq. Alexandre Bastos (http://poeticadaterra.blogspot.pt/); c. Moradia Unifamiliar no litoral Alentejano. Arq. Henrique Schreck (http://arquitecturasdeterra.blogspot.pt/); d. Moradia Unifamiliar, Monte Novo do Espargal, Alentejo. Arq. Miguel Peixinho (AAVV, 2005).	5
Figura 2.1 – Representação esquemática de diferentes grupos e diferentes formas de utilização de terra na construção. Fonte:Guillaud, H., Houben, H., (1989). <i>Traité de Construction en Terre</i>	11
Figura 2.2 – Carta de Solos de Portugal baseado na informação disponibilizada pela FAO (http://www.iambiente.pt/atlas/est/index.jsp).	16
Figura 2.3- Distribuição geográfica das principais técnicas tradicionais (AAVV, 2005)	17
Figura 2.4 – Mapa de solos do Mundo (FAO-UNESCO, <i>Soil map of the World</i> , 2007).	19
Figura 3.1 – Mapa de localização de Abrantes (Wikipédia Portugal).	29
Figura 3.2 – Mapa hidrográfico do Concelho de Abrantes (IGP, CACP, Limites administrativos 2007, Cartografia numérica da CMA).	29
Figura 3.3 - Valores mensais da temperatura média, média das máximas e valores máximos no concelho de Abrantes (1961-1990) (IPMA).	30
Figura 3.4 - Valores médios mensais da humidade relativa do ar às 9 e 18 horas no concelho de Abrantes (1961-1990) (IPMA).	31
Figura 3.5 - Precipitação mensal e máximas diárias no concelho de Abrantes (1961-1990) (IPMA).	31
Figura 3.6 - Médias mensais da frequência (FR em %) e velocidade (VM em km/h) do vento no concelho de Abrantes (1961-1990) (IPMA).	32
Figura 3.7 – Representação da planta do caso de estudo 1, Casais de Revelhos, Abrantes.	34
Figura 3.8 – Representação da fachada principal do caso de estudo 1.	34
Figura 3.9 – Fachada principal do caso de estudo 1.	35
Figura 3.10 – Constituição da parede da fachada principal.	35
Figura 3.11 – Ombreira da porta principal reforçada com tijoleira.	35
Figura 3.12 – Parede divisória em tijolo de burro.	35
Figura 3.13 – Representação da planta do caso de estudo 2, Pego, Abrantes.	36
Figura 3.14 – Representação da fachada principal do caso de estudo 2.	36
Figura 3.15 – Representação da empena lateral do caso de estudo 2 orientada a oeste.	36
Figura 3.16 – Fachada principal do caso de estudo 2.	37
Figura 3.17 – Empena lateral Oeste do caso de estudo 2.	37
Figura 3.18 – Cozinha. Ao fundo, local onde se preparava a refeição.	37
Figura 3.19 – Pátio interior e anexo.	37
Figura 3.20 – Representação da planta do caso de estudo 3, Pego, Abrantes.	38
Figura 3.21 – Representação da fachada principal do caso de estudo 3.	38
Figura 3.22 – Fachada principal do caso de estudo 3 com vista do jardim e um pequeno anexo do lado esquerdo.	38
Figura 4.1 – Planta do CS1 com a localização das sondas.	45
Figura 4.2 – Alçado Sul com a localização das sondas.	45

Figura 4.3 – Registos fotográficos da fachada orientada a Sul.....	45
Figura 4.4 - Equipamentos instalados no caso de estudo 1: a. <i>Datalogger</i> com conversores de sinal; b. Gemini Tinytag Plus 2 TGP-4500; c. Rotronic HydroLog-D; d. Termopar Tipo T e Fluxímetro Hukseflux HFP01 na superfície interior da parede (da esquerda para a direita); e. Sensor PTC na cobertura e temperatura ambiente (da esquerda para a direita); f. Prato termofluxímetro no envidraçado e superfície da parede exterior e termopar Tipo T na superfície do envidraçado; termopar Tipo T na superfície da parede; Piranómetro; Gemini Tinytag Plus 2 TGP-4500 e sensor PTC para a medição da temperatura ambiente exterior (da esquerda para a direita).....	46
Figura 4.5 - Planta do CS2 com a localização das sondas.	47
Figura 4.6 – Alçado Oeste com a localização das sondas.	47
Figura 4.7 - Equipamentos instalados no caso de estudo 2: a. Fachada orientada a Norte com sensor PTC na exterior da janela (Te); b. Fachada orientada a Oeste com Piranómetro, Termopar Tipo T (Tse) e Fluxímetro exterior (Fe) e Gemini Tinytag Plus 2 TGP-4500 (da esquerda para a direita); c. Fachada orientada a Oeste com Piranómetro, Termopar Tipo T (Tse) e Fluxímetro exterior (Fe) (da esquerda para a direita); d. Termopar Tipo T (Tsi) e Fluxímetro (Fi) Hukseflux HFP01 na superfície interior da parede orientada a Oeste e Termopar Tipo T (Tsin) e Prato termofluxímetro (Fin) na fachada orientada a Norte (da esquerda para a direita).	48
Figura 4.8 – Planta com a localização das sondas.	49
Figura 4.9 – Alçado Sul com a localização das sondas.....	49
Figura 4.10 - Equipamentos instalados no caso de estudo 3: (a) Piranómetro (Rd) e Fluxímetro Hukseflux HFP01 (Fe), Termopar Tipo T (Tse) na superfície exterior da parede (da esquerda para a direita); (b) Piranómetro (Rd) e Prato termofluxímetro (Fe), Termopar Tipo T (Tse) na superfície exterior da parede (da esquerda para a direita); (c) Sonda PTC na cobertura (Tc), Rotronic HydroLog-D, Termopar Tipo T (Tsi) e Fluxímetro Hukseflux HFP01 (Fi) na superfície interior da parede (da esquerda para a direita); (d) Termopar Tipo T e Fluxímetro Hukseflux HFP01 na superfície interior da parede (da esquerda para a direita).....	49
Figura 4.11 – Radiação solar incidente no plano vertical das fachadas registada no dia mais frio (DF).	57
Figura 4.12 – Temperaturas no dia mais frio da campanha de Inverno. a. Temperatura interior; b. Temperatura exterior.	57
Figura 4.13 – Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior no dia 10 de Fevereiro de 2013 no dia mais frio (DF) no CS1.	57
Figura 4.14 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior no CS1: a. no dia 10 de Fevereiro de 2013, dia mais frio (DF); b. no dia 7 de Fevereiro de 2013, dia de maior radiação (DMR).	59
Figura 4.15 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DF no CS1.....	60
Figura 4.16 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior no dia 27 de Fevereiro de 2013 (DF) no CS2.	61
Figura 4.17 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior no CS2: a. no dia 27 de Fevereiro de 2013 dia mais frio (DF); b. no dia 26 de Fevereiro, dia maior radiação (DMR).	62
Figura 4.18 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 no DF, na campanha de Inverno, no CS 2.	63
Figura 4.19 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior no dia 13 de Março de 2013, no dia mais frio (DF) no CS3.	64
Figura 4.20 - Radiação solar e fluxos exterior e interior no CS3: a. no dia 13 de Março de 2013, dia mais frio (DF); b. no dia 19 de Março, dia de menor radiação (DmR).	65
Figura 4.21 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DF e DMR no CS3.	66
Figura 4.22 - Radiação solar incidente no plano vertical das fachadas registada no dia mais quente (DQ).	69

Figura 4.23 - Temperaturas no dia mais quente da campanha de Verão. a. Temperatura interior; b. Temperatura exterior	69
Figura 4.24 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior do dia 3 de Junho de 2013 (DQ) na campanha de Verão.	70
Figura 4.25 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior no CS1: a. no dia 3 de Junho de 2013, dia mais quente (DQ); b. no dia 6 de Junho, dia de maior radiação (DMR).	71
Figura 4.26 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DQ no CS1.....	71
Figura 4.27 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior do dia 30 de Junho de 2013 (DQ) na campanha de Verão.	72
Figura 4.28 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior no CS2: a. no dia 30 de Junho de 2013, dia mais quente (DQ); b. no dia 18 de Junho, dia de menor radiação (DmR).	73
Figura 4.29 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DQ, na campanha de Verão, no caso de estudo 2.....	74
Figura 4.30 – Temperatura ambiente exterior (Te) e Temperatura ambiente interior (Ti): a. Dia mais frio no CS1; b. Dia mais frio no CS2; c. dia mais frio no CS3; d. Dia mais quente no CS1; e. Dia mais quente no CS2.	75
Figura 4.31 – a. Esquematização dos nove pontos de medição na parede; b. Teste em curso no caso de estudo 1.....	77
Figura 4.32 – a. Mapeamento dos valores de λ ; b. Mapeamento dos valores de cp; c. Mapeamento dos valores de α	78
Figura 4.33 – Coeficiente de transmissão térmica após 5 dias de medições.	83
Figura 4.34 – Coeficiente de transmissão térmica após 5 dias de medições.	85
Figura 5.1 - a. Terra Tipo I; b. Terra Tipo II.	90
Figura 5.2 – Teste da sedimentação. Terra Tipo I e Tipo II (da esquerda para a direita).	90
Figura 5.3 - a. Teste de retracção – terra Tipo I; b. Teste de retracção – terra Tipo II; c. Teste à flexão – terra Tipo I; d. Teste à flexão - terra Tipo II.	90
Figura 5.4 - Agregados utilizados. a. Granulado de cortiça; b. Vermiculite; c. LECA.	91
Figura 5.5 - Sequência da produção do BTC: a. Progresso de mistura; b. Preenchimento da prensa manual; c. Produção; d. e f. Produto final-BTC.	92
Figura 5.6 - a. ISOMET 2114 (Manual ISOMET2114); b. Teste em curso.....	93
Figura 5.7 - a. Expansão e fissuração da amostra com granulado de cortiça, A4_C, após 26 dias de cura de laboratório; b. Desintegração da amostra de granulado de cortiça, A2_C, após ter sido colocada na câmara de saturação; c. Amostra com LECA, A2_L2, após 26 dias de cura em laboratório.	95
Figura 5.8 – Condutibilidade térmica ao longo do tempo para cada BTC produzido com diferentes tipos de agregados – condições de cura de laboratório.....	96
Figura 5.9 – Condutibilidade térmica em condições de saturação (a.) e secas (b.).	97

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Períodos de monitorização.	41
Tabela 4.2 – Valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros obtidos experimentalmente durante ambas as campanhas (Inverno e Verão) no caso de estudo 1.....	51
Tabela 4.3 – Valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros obtidos experimentalmente durante ambas as campanhas (Inverno e Verão) no caso de estudo 2.....	51
Tabela 4.4 – Valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros obtidos experimentalmente durante a campanha de Inverno no caso de estudo 3.	52
Tabela 4.5 – Valores médios diários da radiação solar e das temperaturas ambiente exterior e interior da campanha de Inverno do caso de estudo 1.....	53
Tabela 4.6 - Valores médios diários da radiação solar e das temperaturas ambiente exterior e interior da campanha de Inverno do caso de estudo 2.....	54
Tabela 4.7 - Valores médios diários da radiação solar e das temperaturas ambiente exterior e interior da campanha de Inverno do caso de estudo 3.....	55
Tabela 4.8 – Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 10 de Fevereiro de 2013 (DF) no CS1. Hora dos valores máximos e mínimos e atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.....	58
Tabela 4.9 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 27 de Fevereiro de 2013 no dia mais frio (DF) no CS2. Hora dos valores máximos e mínimos e atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.....	61
Tabela 4.10 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior no dia 13 de Março de 2013 (DF) no CS3. Hora dos valores máximos e mínimos e atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.....	64
Tabela 4.11 - Valores médios diários da radiação solar e das temperaturas ambiente exterior e interior da campanha de Verão do caso de estudo 1.....	67
Tabela 4.12 - Valores médios diários da radiação solar e das temperaturas ambiente exterior e interior da campanha de Verão do caso de estudo 2.....	68
Tabela 4.13 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 3 de Junho de 2013 (DQ). Hora dos valores máximos e mínimos. Atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.....	70
Tabela 4.14 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 30 de Junho de 2013 (DQ) na campanha de Verão. Hora dos valores máximos e mínimos. Atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.....	72
Tabela 4.15 – Valores médios da temperatura ambiente exterior e interior e amplitude térmica da temperatura ambiente exterior e interior	75
Tabela 4.16. Valor médio e desvio padrão dos valores da condutibilidade térmica, do calor específico volumétrico, da difusividade térmica e da humidade relativa na superfície da parede.	77
Tabela 4.17 - Tabela utilizada por Doran (2008) para determinar o nível de confiança dos resultados obtidos (Doran, 2008).	81
Tabela 4.18 – Valores médios diários do fluxo interior, da temperatura ambiente interior e exterior, diferença entre os valores médios diários de T_i e T_e e valor de U após 5 e 8 dias de medições da campanha de Inverno do caso de estudo 1.....	83

Tabela 4.19 - Valores médios diários do fluxo interior, da temperatura ambiente interior e exterior, diferença entre os valores médios diários de T_i e T_e e valor de U após 5, 10, 15 e 20 dias de medições da campanha de Verão do caso de estudo 1.....	84
Tabela 5.1 – Características de dimensão das partículas, massa volúmica e condutibilidade térmica dos agregados incorporados.	91
Tabela 5.2 – Proporções das misturas.....	92
Tabela 5.3 - Condutibilidade térmica dos BTCs ao longo do tempo de cura.....	94

ACRÓNIMOS

BTC	Bloco de Terra Comprimida
BTCE	Bloco de Terra Comprimida Estabilizado
CMDFCI	Comissão Municipal de Defesa da Floresta contra Incêndios
CO ₂	Dióxido de Carbono
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEE	Gabinete de Estratégia e Estudos
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
NUT	Nomenclatura Comum das Unidades Territoriais Estatísticas
UNEP	United Nations Environment Programme

(Referentes a expressões matemáticas)

U	Coeficiente de transmissão térmica	W/m ² . °C
R _t	Resistência Térmica	m ² . °C /W
R _{si}	Resistência térmica superficial interior	m ² . °C/W
R _{se}	Resistência térmica superficial exterior	m ² . °C/W
e	Espessura da parede	m
λ	Condutibilidade térmica	W/m. °C
cp	Calor específico volumétrico	J/m ³ K
α	Difusividade térmica	m ² /s
q _j	Média diária do fluxo de calor no dia j	W/m ²
T _{ij}	Média diária da temperatura ambiente interior no dia j	°C
T _{ej}	Média diária da temperatura ambiente exterior no dia j	°C

(Referentes à campanha experimental das monitorizações)

CS1	Caso de Estudo 1	
CS2	Caso de Estudo 2	
CS3	Caso de Estudo 3	
DF	Dia mais frio	
DQ	Dia mais quente	
DMR	Dia de maior radiação	
DmR	Dia de menor radiação	
Te	Temperatura ambiente exterior	°C
Ti	Temperatura do ambiente interior	°C

Tsi	Temperatura superficial interior da parede de taipa	°C
Tse	Temperatura superficial exterior da parede de taipa	°C
Tc	Temperatura superficial interior da cobertura	°C
Tv	Temperatura superficial interior do envidraçado	°C
Tsin	Temperatura superficial interior da parede de taipa orientada a Norte	°C
Fe	Fluxo de calor exterior da parede de taipa orientada a Sul e a Oeste	W/m ²
Fi	Fluxo de calor interior da parede de taipa orientada a Sul e a Oeste	W/m ²
Fv	Fluxo de calor interior no pano envidraçado	W/m ²
Fin	Fluxo de calor interior da parede de taipa orientada a Norte	W/m ²
Rd	Radiação global em plano vertical	W/m ²
HRe	Humidade relativa exterior	%
HRI	Humidade relativa interior	%

(Referentes à campanha experimental dos blocos de terra comprimida)

A1_N	Amostra de referência da terra Tipo I
A1_C, A2_C, A3_C e A4_C	Amostras com granulado de cortiça
A1_V, A2_V, A3_V e A4_V	Amostras com vermiculite
A1_L e A2_L	Amostras com granulado de argila expandida
A1_N2	Amostra de referência da terra Tipo II
A1_L1, A2_L2 e A3_L2	Amostras com granulado de argila expandida com terra Tipo II

1. INTRODUÇÃO

“A habitação entre nós é, pois, uma consequência da adaptação às várias circunstâncias naturais e sociais que a condicionam” – ROSA PEIXOTO, IN A CASA PORTUGUESA

1.1 ENQUADRAMENTO GERAL

1.1.1 SUSTENTABILIDADE E A IMPORTÂNCIA DO SECTOR DA CONSTRUÇÃO

A sustentabilidade e a construção sustentável são conceitos cada vez mais usados nos dias que correm quando se aborda o tema do desenvolvimento da sociedade. O grande crescimento da população mundial desde o século passado, associado a uma melhoria do nível de vida, tem contribuído para um aumento significativo do impacte ambiental *per capita*, traduzindo-se, principalmente, no aumento de emissões de gases de efeitos de estufa (GEE) no ambiente. Um dos sectores da actividade humana responsável por uma grande parcela das emissões destes gases é o sector da construção, atribuindo-lhe cerca de 30% de emissões de CO₂ (Pacheco-Torgal e Jalali, 2012).

Para responder a todas as exigências duma população em crescimento, é necessário que o sector de construção esteja em constante evolução. Não é por acaso que o sector da construção providencia cerca de 7% de postos de trabalho por todo o mundo e 7,5% na união europeia (UNEP,2003).

No entanto, as actividades construtivas têm grande impacte ambiental associado à ocupação e ao uso do solo, ao consumo de recursos (nomeadamente de água e de energia), produção em larga escala de resíduos e efluentes (líquidos e gasosos) e à alteração dos ecossistemas naturais (Pinheiro, 2006). Assim como o nível de vida, também o desejo e a necessidade de garantir condições de conforto interior tem vindo a aumentar; porém o sector da construção não tem tido como principal preocupação as questões ambientais. A construção contemporânea está bastante associada a materiais que criam grande impacto a nível ambiental como o betão e o aço, para além de que as técnicas construtivas ou as soluções de projecto adoptados nem sempre são as mais favoráveis em termos de eficiência energética.

Estes gastos excessivos de matéria-prima e de energia e, paralelamente, a falta de consciencialização da população para as questões ambientais, têm conduzido a um estilo de vida da sociedade moderna insustentável para o meio ambiente. É neste contexto de emergência que nasce o conceito do desenvolvimento sustentável. Entende-se por desenvolvimento sustentável um desenvolvimento político, social, cultural e ambiental equilibrado, que satisfaça as necessidades das gerações actuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer as suas próprias necessidades (Report Our Common Future, 1987).

Sendo o sector da construção um dos principais causadores de um desequilíbrio ambiental e principal predador dos recursos naturais torna-se indispensável que todos os intervenientes do sector – projectistas, construtores e cliente final – sejam sensibilizados para as questões ecológicas e, não apenas, para as questões económicas.

As primeiras preocupações relativamente à sustentabilidade do crescimento da nossa sociedade são relativamente recentes. O primeiro documento oficial data de 1987 (Report Our Common Future, 1987), porém inúmeros esforços de profissionais têm sido levados a cabo com o intuito de mudar os hábitos de uma sociedade consumista.

Hoje em dia já é possível encontrar um crescente número de publicações sobre esta problemática na arquitectura e na construção. São estudadas variadas técnicas e materiais inovadores, mais ecológicos (na fabricação e ao longo do ciclo de vida da construção) e materiais que procuram utilizar cada vez menos energia incorporada entre outros.

É neste contexto que também se enquadra o estudo da construção em terra na arquitectura contemporânea. Em Portugal, este material está ainda bastante conectado a uma arquitectura de emergência e aos países subdesenvolvidos onde se utiliza a terra como material pobre e limitado. No

entanto, a utilização da terra como material de construção remonta há muitos milénios. Minke (2001) refere que a construção em terra é conhecida desde há 9000 anos atrás, nos primórdios da construção e, ainda hoje, é possível encontrar muitos exemplos de edifícios milenares com esta solução. Refira-se, como exemplo, o caso da cidade de El-Obeid na antiga Mesopotâmia (5000-4000 AC); a grande Muralha da China (com 3000 anos); o templo de Horyuji no Japão (com 1300 anos); as ruínas da cidade de Chanchán no Peru; a vila de Taos no Novo México (1000-1500 AC); a cidade de Shibam no Yemen (com 100 anos) entre outros (Pacheco-Torgal e Jalali, 2012).



a.



b.



c.



d.



e.

Figura 1.1- Alguns exemplos internacionais de edifícios construídos através da técnica da taipa: a. Habitação unifamiliar, Austrália. Arq. David Oliver (<http://arquitecturasdeterra.blogspot.pt/>); b. Capela da Reconciliação, Alemanha. Arq. Rudolf Reiterman and Peter Sassenrath (www.mimoo.eu); c. NK'Mip Desert Interpretive Center, Canada. Arq. HBBH Architects (<http://www.inspirationgreen.com/>); d. Escola de Artes Plásticas, Oaxaca, México. Arq. Maurício Rocha (<http://www.world-architects.com/>); e. House in Victoria, Australia. Arq. Jolson Architecture Interiors (<http://www.archdaily.com/>).



Figura 1.2 – Exemplos de construção em taipa em Portugal: a. Moradia em Beja, Portugal. Arq. Bartolomeu Costa Cabral (<http://eartharchitecture.org/>); b. Moradia no Alentejo, Portugal. Arq. Alexandre Bastos (<http://poeticadaterra.blogspot.pt/>); c. Moradia Unifamiliar no litoral Alentejano. Arq. Henrique Schreck (<http://arquitecturasdeterra.blogspot.pt/>); d. Moradia Unifamiliar, Monte Novo do Espargal, Alentejo. Arq. Miguel Peixinho (AAVV, 2005).

Para que a terra se liberte do estigma de uma arquitectura pobre e duvidosa, sob o ponto de vista construtivo, é extremamente importante o trabalho de pesquisa e experimental que visa a caracterização da terra como material de construção moderno. A escassa publicação existente em torno das preocupações mecânicas, de durabilidade, e das propriedades físicas e químicas da terra, levam a que a escolha da utilização desta técnica construtiva seja um processo moroso e dispendioso.

Existem vários exemplos de arquitectura contemporânea utilizando a terra como matéria-prima principal, aliando a durabilidade, pela qual as construções em terra são conhecidas, com as recentes melhorias das características físicas, químicas e mecânicas da terra. É usual, na construção contemporânea, a utilização de diferentes materiais para além da terra, como o betão, madeira, bambú, o vidro, entre outros. A Figura 1.1 apresenta diversos exemplos de construções contemporâneas que utilizam a taipa como técnica construtiva principal.

Em Portugal existem também variados exemplos de construção contemporânea, com especial destaque em moradias unifamiliares. A Figura 1.2 apresenta vários exemplos da aplicação da taipa em território português.

1.2 OBJECTIVOS

A presente dissertação visa aprofundar o conhecimento do comportamento térmico de construções em terra em Portugal. Para isso pretende-se:

- Descrever a evolução histórica da construção em terra e identificar as suas principais vantagens e desvantagens.
- Realizar um levantamento da construção em terra em Portugal.
- Efectuar uma campanha experimental, no período de Inverno e Verão, de monitorização térmica *in situ* em três casos de estudo com parede em taipa, localizadas na região de Abrantes.
- Caracterizar termicamente algumas soluções de blocos de terra comprimida com incorporação de diferentes materiais com propriedades isolantes.

1.3 METODOLOGIA

De modo a serem alcançados os objectivos propostos, divide-se o trabalho em duas componentes principais: investigação teórica e investigação prática.

Através da investigação teórica pretende-se entender a evolução histórica do uso da terra na construção, o recente renascer da arquitectura em terra como solução construtiva do século XXI e as suas vantagens e desvantagens. Pretende-se também caracterizar a construção em terra em Portugal, identificar as zonas do país onde este tipo de construção é mais dominante, quais os tipos de solução mais adoptadas, a situação económica e social na época em que as casas foram construídas, a implantação das habitações na região e na zona climática e as limitações e tecnologias construtivas que o material impõe. Paralelamente, efectua-se uma revisão do conhecimento actual no domínio do comportamento térmico da construção em terra.

Através da investigação prática pretende-se efectuar uma avaliação experimental do comportamento térmico das construções em terra. Para isso, recorre-se a monitorização *in situ* de três casos de estudo localizados na região de Abrantes, com a solução de parede em taipa, sendo realizadas duas campanhas experimentais nas alturas extremas do clima, uma campanha experimental na estação de aquecimento (Inverno) e outra na estação de arrefecimento (Verão). Foram utilizados diferentes tipos de sensores em variados pontos de medição, nomeadamente termopares, fluxímetros, piranómetros e termohigrómetro para o registo de temperaturas, fluxos de calor, radiação solar e humidades relativas.

Com o intuito de explorar a possibilidade de melhorar termicamente a solução de blocos de terra comprimida (BTCs), foi ainda conduzida uma campanha experimental de caracterização do comportamento térmico de BTCs com a incorporação de diferentes materiais isolantes, nomeadamente, granulado de cortiça, vermiculite e agregado de argila expandida.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se dividido em duas partes distintas. O capítulo 1 aborda conceitos gerais sobre a sustentabilidade na construção fazendo um enquadramento geral do reaparecimento e da situação actual da construção em terra no Mundo e em Portugal.

O capítulo 2 faz parte da investigação teórica. Aborda o tema da construção em terra numa vertente mais abrangente. Inicialmente são também apresentadas as diversas técnicas construtivas da construção em terra e é explicado, de forma mais aprofundada, o processo de construção da taipa e de blocos de terra comprimida (BTCs). São apontadas as vantagens e desvantagens da construção em terra. Posteriormente é efectuada uma introdução ao aparecimento e desenvolvimento da construção em terra em Portugal e dos exemplos existentes no território português, seguida de uma contextualização social e económica das diferentes épocas em que a construção em terra teve grande relevância. Adicionalmente, é abordada a terra enquanto matéria-prima, as suas características e os diversos testes expeditos e laboratoriais levados a cabo para a caracterização química e física do material. Finalmente, apresenta-se o estado da arte do estudo da térmica neste tipo de construção e é explicado o efeito da inércia térmica nas construções.

O capítulo 3 apresenta o clima e os casos de estudo do trabalho e o capítulo 4 descreve toda a campanha experimental e apresenta a análise de resultados.

O capítulo 5 insere-se no contexto de um trabalho experimental, desenvolvido em paralelo, que procurou responder a variados problemas que surgiram ao longo do processo de investigação, nomeadamente o tempo de execução das paredes em taipa e a condutibilidade térmica muito elevada da terra. Assim, o capítulo 5 apresenta a campanha experimental e os resultados da caracterização térmica de blocos de terra comprimida com a incorporação de materiais com propriedades isolantes na mistura.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais dos resultados das campanhas experimentais realizadas e são discutidos possíveis desenvolvimentos futuros dentro do campo da presente temática.

2. A TERRA COMO MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

**“Assim, a arquitectura se submete aos recursos naturais, (...)” – ROSA PEIXOTO, IN A CASA
PORTUGUESA**

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo 2, insere-se na parte de investigação teórica deste trabalho e procura introduzir o tema da construção em terra de uma forma breve e concisa. Pretende-se compreender a evolução das construções em terra no território português e o seu contexto socioeconómico, bem como compreender o seu comportamento nas construções, em particular, o seu comportamento térmico. Serão abordadas as diversas técnicas construtivas existentes e utilizadas actualmente, tendo como especial enfoque a técnica da taipa.

De seguida é apresentado o estado de arte do comportamento térmico da construção em terra bem como a influência da inércia térmica das habitações nos fenómenos de transferência de calor.

2.2 SOLUÇÕES DE CONSTRUÇÃO EM TERRA

Ao longo da vasta existência da construção em terra foram-se desenvolvendo várias técnicas construtivas que se adequam principalmente ao tipo de solo do local, nomeadamente devido às suas características físicas e químicas que definem a resistência da terra. A disponibilidade do equipamento necessário e da mão-de-obra podem também influenciar a escolha da técnica utilizada.

Existem inúmeras técnicas construtivas da construção em terra que se podem dividir em três grandes grupos: a monolítica e autoportante (A); portante (B); de enchimento de uma estrutura de suporte (C), tal como ilustrado na Figura 2.1 (Guillaud e Houben, 1989).

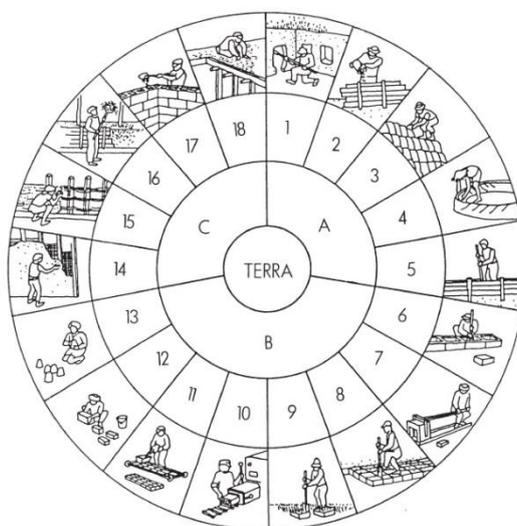


Figura 2.1 – Representação esquemática de diferentes grupos e diferentes formas de utilização de terra na construção. Fonte:Guillaud, H., Houben, H., (1989). *Traité de Construction en Terre*.

Na Figura 2.1 representam-se as diferentes técnicas existentes para a construção em terra. No que diz respeito à categoria monolítica e autoportante (A), a técnica mais conhecida e disseminada pelo mundo é a técnica da taipa (5). Existe também, dentro desta família, as técnicas da terra escavada (1); terra plástica (2); terra empilhada (3); e terra modelada (4). Na categoria da alvenaria portante (B) existem as técnicas: blocos apilados (6); blocos prensados (7); blocos cortados (8); torrões de terra (9); terra extrudida (10); adobe mecânico (11); adobe manual (12); e adobe moldado (13). Por fim, relativamente às técnicas de enchimento de uma estrutura de suporte (C), nas quais está inserido o tabique português,

fazem parte a terra de recobrimento (14); terra sobre engradado (15); terra palha (16); terra de enchimento (17) e terra de cobertura (18). Ainda mais, a terra para além de técnica construtiva pode também ser utilizada em rebocos, necessário para proteger as paredes de terra das chuvas e ventos que desgastam a parede.

Em Portugal é possível observar-se exemplos de construção principalmente em taipa, adobe e tabique. No entanto, a taipa é a técnica mais disseminada no território português, desde a sul do rio Tejo até a região do Algarve. Por sua vez, exemplos de construção em adobe podem encontrar-se na região do rio Tejo e na costa litoral (Aveiro, Coimbra, Leiria e Tomar). Quanto à técnica de tabique, pode encontrar-se região de Castelo Branco, Guarda e Vila Real.

A técnica da taipa consiste em compactar, camada por camada, entre duas pranchas de madeira, com a mesma espessura das paredes comuns de pedras, terra preparada para este fim.

Para a execução da taipa são necessários os seguintes materiais (Rocha,2005):

- duas pranchas de madeira grandes chamadas de taipais que, dependendo da zona do país, podem variar de comprimento e altura. Estas pranchas, eram colocadas na vertical, paralelas entre si, com um espaçamento igual à espessura desejada para a parede;
- duas pranchas de madeira, denominados de frontais, com o comprimento igual à espessura desejada para as paredes e que se colocam perpendicularmente aos taipais, em cada extremidade, formando um paralelepípedo;
- três barras de ferro de secção rectangular ou circular, denominados de agulhas, que se colocam, espaçados entre si, por baixo dos taipais servindo de apoio destes. Numa das extremidades, estas agulhas têm forma de T para travar o movimento dos taipais para fora. Na outra extremidade existem diferentes perfurações que têm como intuito a variação da largura das paredes. Nessa extremidade, o travamento do taipal era feito através de uns elementos de ferro denominados de alfinetes;
- seis barrotes de madeira, os costeiros, que têm como função travar lateralmente os taipais. Par a par são colocados, na zona exterior dos taipais e sobre as agulhas. Utilizando uma corda, os costeiros são amarrados e apertados, também par a par, garantindo o travamento dos taipais;
- três ripas de madeira, os côvados, colocados na parte superior e perpendicularmente aos taipais, alinhados com as agulhas. Os côvados têm o comprimento da espessura da parede e servem para manter os taipais equidistantes ao longo do seu comprimento;
- dois malhos de madeira, os pilões, utilizados para compactar a terra.

As paredes de taipa são elevadas sob um embasamento, normalmente construído em pedra, que tem como objectivo proteger a base das paredes dos salpicos da chuva e de evitar a ascensão capilar da água. Sobre o embasamento eram montados os taipais, dentro dos quais a terra era batida vigorosamente por dois homens. Enquanto os dois homens batem a terra, tendo especial atenção a zona periférica do taipal, um outro homem criva a terra e um quarto transporta-a e coloca-a dentro dos taipais quando a camada anterior estiver completa. Este processo é repetido o número de vezes necessário à execução de um taipal completo e, quando terminado, o taipal é desmontado e deslocado lateralmente para se executar outro taipal.

Terminada uma fiada de taipais, e quando a primeira já se encontra suficientemente sólida para receber a segunda fiada, dá-se início a todo o processo novamente e assim consecutivamente até se elevar as paredes à altura desejada para a habitação. Entre cada fiada é usual colocar-se uma camada de cal e areia, pedras ou outro material na periferia dos taipais por forma a aumentar o atrito entre os dois blocos monolíticos de taipa.

A produção de adobes, por sua vez, consiste no enchimento de um molde, normalmente de madeira, com terra no estado plástico, com uma quantidade de água suficiente para garantir uma secagem não destrutiva devido à retracção do material. É utilizada palha na mistura, para diminuir a retracção dos blocos durante a sua secagem, e consequentemente, a fissuração dos blocos é menor. Após o molde estar totalmente preenchido, o excesso é retirado com o auxílio de um arame e a face superior do bloco é uniformizada com a mão ou recorrendo a um pedaço de madeira. Lentamente, o molde é retirado e os blocos são deixados a secar, ao sol. A capacidade instalada de produção manual de adobes, ronda cerca de 300 a 500 adobes, caso o molde seja duplo.

Posteriormente à produção de adobes, foi introduzido, pelo arquitecto François Cointeraux em 1789, o conceito de blocos de terra comprimida, que consiste na produção de adobes recorrendo a uma prensa manual ou automática. A principal diferença entre os dois tipos de blocos está na mistura utilizada. Os BTCs são fabricados com uma quantidade de água bastante inferior, o que conduz a uma redução da coesão da mistura, pois as propriedades aglutinantes das partículas de argila não são activadas. Assim, torna-se necessário recorrer-se a incorporação de pequenas percentagens de cimento para a sua estabilização (Minke, 1994).

Segundo Minke (1994) a produção de BTCs utilizando uma prensa manual tem uma produção instalada de 150 a 200 blocos por dia por trabalhador, enquanto utilizando uma prensa automática o rendimento aumenta para 1500 a 4000 blocos por dia. Utilizar prensas automáticas implica a utilização de uma misturadora e uma trituração também automáticas o que conduz a custos muito elevados de investimento inicial. Este método torna-se vantajoso, apenas, se houver uma grande exportação do produto final e se houver uma grande quantidade de matéria-prima disponível minimizando os custos da reparação e manutenção das máquinas.

2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA CONSTRUÇÃO EM TERRA

Para além dos factores referidos anteriormente existem várias vantagens na construção em terra que importa salientar. É importante também salientar os aspectos menos positivos para ser possível fazer um balanço global.

Minke (2001) descreve as vantagens e desvantagens da construção em terra. Por um lado, quando comparado com os materiais correntes da construção, a terra apresenta três principais desvantagens:

- a terra não é um material construtivo standard, pois as suas características variam de local para local e, como consequência, a preparação para uma mistura correcta também varia consoante a composição da terra local;
- as misturas que utilizam terra contraem-se quando secam. Devido à adição de água na preparação da mistura (que confere a trabalhabilidade necessária à argila) quando esta evapora causa uma contracção significativa provocando fissuras, sendo esta mais elevada em adobes do que na taipa. A contracção pode ser controlada diminuindo a quantidade de argila e de água, optimizando a distribuição dos grãos, e através do uso de aditivos;
- a construção em terra não é impermeável. A construção em terra deve ser bem protegida da chuva e da geada. Estas devem ser bem protegidas por coberturas resistentes e sem infiltrações, caso contrário, se a água se impregna no interior da parede, poderá haver risco de desmoronamento.

Por outro lado existem diversas vantagens quando comparada com a construção corrente:

- a terra tem a capacidade de absorver e libertar vapor de água mais rapidamente que os materiais correntes, controlando de forma mais eficaz a humidade relativa do interior das habitações;
- a terra tem a capacidade de conservar o calor, pois é um material de massa volúmica acima da média, aliado às espessuras com que, geralmente, é utilizado construtivamente, fazem dela uma solução de elevada inércia térmica. A inércia térmica é extremamente útil em zonas onde o clima apresenta elevadas amplitudes térmicas diárias. A parede absorve o calor durante o dia e à noite vai libertando o calor para o interior da habitação, controlando a temperatura interior;
- a utilização da terra poupa energia e reduz a poluição ambiental, uma vez que a sua preparação, transporte e manobra requer apenas cerca de 1% da energia necessária para produzir as soluções de tijolo ou betão armado;
- a terra pode ser reutilizável, após o ciclo de vida do edifício;
- a terra reduz os custos do material, uma vez que é adquirida *in situ*;
- a terra é ideal para a autoconstrução, uma vez que, a construção em terra requer apenas trabalho humano e material básico e de baixo custo.

Diversos investigadores que exploram as propriedades térmicas da terra evidenciam, em geral, a forte inércia térmica das paredes das habitações em terra e as vantagens e desvantagens térmicas que daí advêm. Segundo Taylor e Luther (2003) as paredes exteriores transmitem uma quantidade de energia muito reduzida para o interior enquanto as paredes interiores absorvem o calor do interior durante o dia, controlando e amenizando a temperatura interior.

Delsante (2006) afirma que, devido à resistência térmica, massa volúmica e espessura das paredes de terra, é esperado um bom comportamento térmico das construções durante o Verão; no entanto durante o Inverno o mesmo não se verifica. O abrandamento da propagação da onda de calor, através das paredes, até ao interior da habitação reduz os ganhos térmicos interiores. A taipa, provavelmente, não terá um bom comportamento térmico, durante o período de Inverno, caso a habitação não tenha uma boa orientação solar e uma área considerável de vãos envidraçados para aumentar os ganhos solares.

Oliver (1998) acredita que esta irá ser crescentemente aplicada à medida que as pessoas forem tomando conhecimento desta técnica construtiva e à medida que o preço associado a este tipo de construção comece a decrescer. Como a terra é um material com uma energia incorporada muito baixa, a sua utilização será favorável quando o preço da energia aumentar e quando começarem a ser impostas taxas de emissão de dióxido de carbono. Além da matéria-prima, outro factor que encarece a construção em taipa é a falta de mão-de-obra especializada, pelo que é essencial a formação de pessoas neste ramo. Por outro lado, aumentando um pouco a energia incorporada pelo recurso a meios mecânicos de compactação faz diminuir a componente de mão-de-obra que, em países desenvolvidos tem um peso bastante substancial no custo final.

Oliver (1998) tem-se focado, principalmente, na melhoria da mistura utilizada na construção de taipa, por forma a prevenir, de forma eficiente, os efeitos do ataque da água nas paredes de taipa. A melhoria das propriedades físicas e químicas da terra é um dos principais objectivos a atingir para que seja atingido um nível de confiança elevado nesta técnica construtiva.

2.4 A CONSTRUÇÃO EM TERRA NA ARQUITECTURA EM PORTUGAL

Como referido, a construção em terra é utilizada há vários milhares de anos, tanto em edifícios de habitação, como em edifícios religiosos e edifícios de carácter militar. Minke (2001) refere a existência de casas construídas com adobes, entre 8000-6000 AC, no Turquemenistão e, como o exemplar mais antigo da técnica construtiva da Taipa, fundações de taipa, na Assíria, datadas de há cerca de 5000 AC.

Pinto (2004), num artigo sobre a origem da arquitectura de terra em Portugal, reuniu diversos documentos de autores que referem a construção em terra na arquitectura da Península Ibérica. Ao contrário do que é muitas vezes afirmado, não foram os mouros os responsáveis pela implementação da construção em terra na Hispânia. No Livro II dos “Dez Livros de Arquitectura” de Vitruvius, escritos entre 27 e 16 AC aproximadamente, é descrito o processo de construir com terra crua. Mais especificamente, ao explicar a dimensão de adobes faz referência a um tijolo existente na Hispânia. Posteriormente, também Plínio-o-Velho (séculos I e II DC), no seu livro “Naturalis Historiae” citado por Pinto (2004), se refere a construções em terra apisoada, invalidando a suposição de que a arquitectura de terra terá sido implementada no período islâmico aquando a ocupação moura.

Porém, foram os mouros, sem dúvida, que mais contribuíram para a evolução das técnicas e a disseminação da construção em terra no território da Hispânia (actual Península Ibérica). No entanto, a herança islâmica da construção em terra é essencialmente a nível da arquitectura militar. Num contexto de guerra e de necessidade de grandes muralhas defensivas, a técnica mais desenvolvida foi a taipa. A taipa permite, pelo seu baixíssimo custo, e exige, pelas suas debilidades de comportamento mecânico, a construção de paredes extremamente espessas (1,55 – 2,10 m de espessura) e portanto, bastante mais resistentes. Para além da espessura, utilizavam também a cal como ligante por forma a conferir uma maior resistência às paredes. Bruno (2005) elaborou um levantamento das fortificações em taipa em Portugal que resistiram aos diversos ataques ao longo dos seus anos de existência. São os casos dos castelos de Alcácer do Sal, de Juromenha, de Moura, de Paderne e de Silves construídos entre 828-929 DC, no Período 2 da ocupação muçulmana, tendo sido reconstruídos no Período 4 (1086-1250) após a conquista cristã.

Pela carta de solos de Portugal (Figura 2.2) verifica-se que grande parte do solo tem na sua composição argilas (essencialmente os Cambissolos, Podzois e Luvisolos), possibilitando a construção em terra. Cruzando a informação do mapa da Figura 2.2 com os mapas da Figura 2.3 verifica-se que os locais onde predominam as técnicas construtivas de terra correspondem aos locais com os terrenos argilosos. Considerando o facto de, em geral, os solos a sul do rio Tejo não serem vantajosos para a utilização da pedra na construção, com excepção de pequenas bolsas, contrariamente à região norte de Portugal, justifica-se a predominância da utilização da terra na arquitectura vernacular em detrimento de outros materiais e respectivas técnicas construtivas, mais onerosas e de difícil obtenção.

Desta forma, e sendo a terra um dos recursos de maior facilidade de aquisição e de baixo custo tornou-se o principal material de construção na região Sul de Portugal.

Correia (2005) enumera as várias regiões onde se regista uma presença significativa da construção em taipa onde, até aos anos cinquenta, foi a técnica predominante, tendo identificado as regiões do Alto e Baixo Alentejo, algumas zonas do Algarve, do Ribatejo (Santarém e Abrantes), da zona de Pombal e alguns casos na região de Castelo Branco.

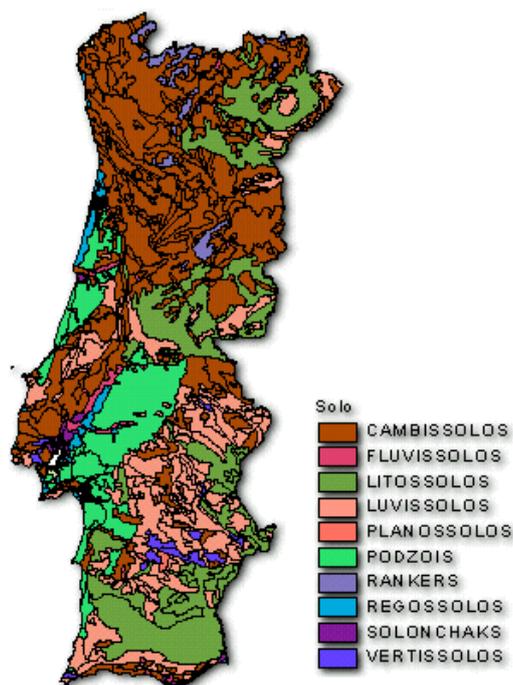


Figura 2.2 – Carta de Solos de Portugal baseado na informação disponibilizada pela FAO (<http://www.iambiente.pt/atlas/est/index.jsp>).

A taipa, para além da sua forte implementação na construção de habitações foi também usada para a construção de edifícios com outro fins, por exemplo silos para conservação de cereais em Vales Mortos, Serpa (Rocha, 2005) e moinhos em Vila do Bispo e em Grândola (Bexiga, 2005).

Recentemente, existem já alguns exemplos de arquitectura contemporânea em taipa; no entanto, existe ainda uma panóplia de condicionantes que dificultam a utilização da técnica. Apesar da aquisição da matéria-prima ter custos bastante reduzidos, senão nulos, a questão da escassez de mão-de-obra especializada encarece o valor final da obra. O tempo de execução, que hoje em dia se torna, por vezes, um factor condicionante de decisão, é outro factor que as técnicas da terra ainda não conseguiram ultrapassar. Apesar do aparecimento dos blocos de terra comprimida (BTC) utilizando prensas manuais ou automáticas, as empresas que os fabricam ainda não têm capacidade de resposta para as exigências actuais do mercado, tornando necessário o investimento em maquinaria e em formação de mão-de-obra especializada o que encarece o custo do produto final (Beirão, 2005). A autora refere ainda uma capacidade instalada da taipa de 4 m² a 6 m² por quatro trabalhadores que corresponde a um aumento do valor da construção em 5 a 10%, quando comparada com uma parede convencional de tijolo.

Para além da escassez de mão-de-obra especializada, a regulamentação actual é mais um impasse para a aplicação desta construção. Como a matéria-prima varia de solo para solo torna-se extremamente difícil caracterizá-la. Consequentemente, a dificuldade em cumprir a diversidade de regulamentos existentes simultaneamente com os reduzidos conhecimentos científicos, dificulta o licenciamento das construções.

Actualmente os casos de utilização da taipa na construção localizam-se principalmente em reconstruções/reabilitações ou, então, na construção de iniciativa privada, principalmente para fins de turismo rural. No entanto, o intervalo de cerca de cinquenta anos em que as técnicas tradicionais quase se perderam tem sido combatido por diversos profissionais nomeadamente ao nível científico e de

persistência pessoal, quer na autoformação, quer na formação de mão-de-obra especializada, com o intuito de quebrar as barreiras existentes e de combater o preconceito associado à construção em terra.

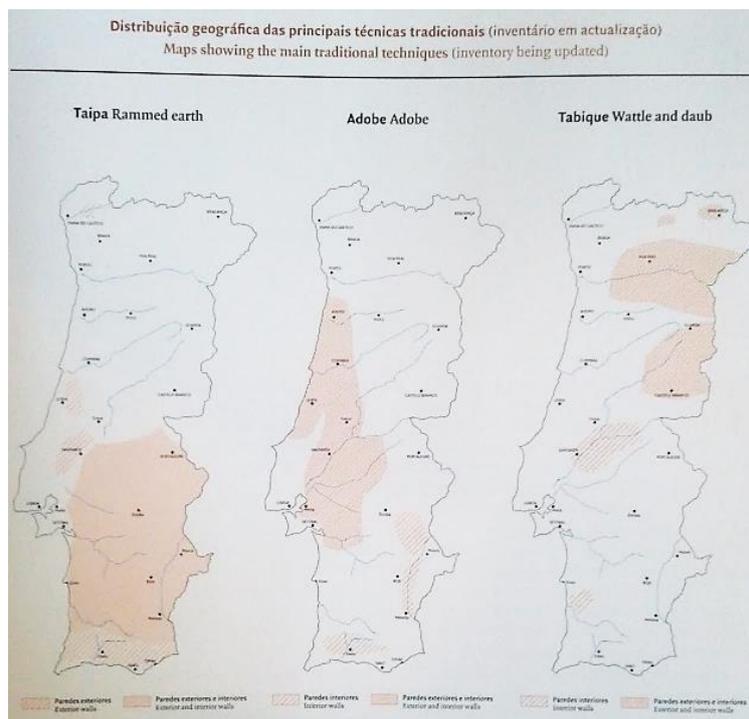


Figura 2.3- Distribuição geográfica das principais técnicas tradicionais (AAVV, 2005)

2.5 CONTEXTO SOCIAL E ECONÓMICO

Durante séculos de história da arquitectura sempre se construiu com materiais locais, ora se utilizava a pedra, a madeira ou a terra. Com o decorrer da história, nomeadamente com a revolução industrial, despoletou-se o aparecimento de novos materiais na construção, mais resistentes, mais esbeltos, materiais que possibilitavam diferentes tipos de arquitectura para além da arquitectura convencional. Materiais que, no entanto, precisam de quantidades de energia muito elevadas para a sua produção. Materiais mais poluentes e não renováveis. O ferro, o vidro, o betão, etc. Materiais e técnicas que possibilitavam uma maior rapidez de construção. Materiais que, para serem manobrados, precisam de maquinaria específica.

A construção em terra, muito além de ter as qualidades já referidas anteriormente, tem um grande impacto a nível social. Grande parte das habitações espalhadas pelo território português foram construídas pelos próprios habitantes e em comunidade. De facto, citando Fathy (1973), “O amadurecimento de uma determinada competência é uma experiência de grande valor espiritual para o artesão, e um homem que adquira a mestria dessa competência cresce muito em auto-respeito e estatura moral. Na verdade, a transformação provocada nas personalidades dos camponeses quando eles constroem sua própria aldeia é de maior valor do que a transformação na sua condição material. Cada artesão ganha individualmente na compreensão e dignidade, enquanto a aldeia adquire colectivamente um senso de sociedade, de interdependência e fraternidade que só tal realização cooperativa pode dar. Por causa do valor espiritual da habilidade construtiva, muitas vezes prefiro aquele que parece ser o caminho mais difícil para construir.”

Também Torres (2005) refere que: “A construção em taipa, ao contrário, obriga a uma complexa participação colectiva. A terra humedecida que não pode ser deixada a secar, o seu transporte rápido

num vaivém de carregadores, o pisoamento cadenciado por vários homens, a constante desmontagem e remontagem dos taipais. Enfim, trata-se duma operação só possível num ambiente de participação comunitária, mais usual no meio camponês, onde também se coloca com menos acuidade o uso do solo e o custo do espaço edificado.”

Além do sentido comunitário que a construção em terra envolve, esta permitiu e permite oferecer uma arquitectura de qualidade, utilizando o mínimo de recursos, tanto a nível da sua concepção como durante a sua utilização. Estas construções, em climas extremamente quentes e/ou com grandes amplitudes térmicas diárias, conseguem amenizar e reduzir a amplitude térmica sem ser necessário recorrer a gastos de energia para arrefecer as habitações.

Fathy teve um grande impacto na arquitectura do Egipto. A maioria do seu trabalho enquanto arquitecto foi dedicado a desenvolver soluções para os menos abastados, oferecendo-lhes condições de habitabilidade comparáveis às da classe média. Um dos projectos mais emblemáticos nesta busca foi o projecto de Nova Gurna, uma aldeia toda construída utilizando técnicas (e.g. abóbada e cúpulas para a cobertura) e materiais (adobe) ancestrais. No projecto Nova Gurna, Fathy procurou oferecer aos pobres um nível de vida comparável ao de uma classe superior, onde conceitos como as condições climáticas e de saúde pública foram tidos em conta. Fathy (1973), descreve todo o processo de concepção e construção da Nova Gurna, que continua a influenciar nos dias de hoje muitos dos arquitectos e projectistas interessados nestas técnicas. Na concepção deste projecto, Fathy procurou aproximar o arquitecto, o artesão e o cliente para que este último fizesse parte da realização da sua nova casa. Fathy defendia ainda que os três intervenientes devem tomar as decisões que lhes competem caso contrário o projecto final é prejudicado e o papel da arquitectura no crescimento cultural é diminuído

Actualmente o contexto socioeconómico é diferente. A construção em terra surge essencialmente na procura das técnicas tradicionais que se foram perdendo ao longo dos tempos e na necessidade de trazer à construção contemporânea um carácter sustentável. É um regressar ao pré revolução industrial sem, contudo, regredir nas necessidades e no estilo de vida actual. Assim como Fathy interpretou a arquitectura e as técnicas ancestrais e as adaptou às necessidades encontradas em 1930, hoje em dia é necessário reintroduzir essas técnicas e materiais e conseguir adaptá-las às necessidades actuais, de sustentabilidade, de habitabilidade, económicas ou até mesmo estéticas.

2.6 A TERRA

A terra é um material de construção abundante no nosso planeta. Existe em praticamente todo o lado, no entanto nem todos os tipos de terras, ou solos, são ideais para serem utilizados na construção. Os solos variam dependendo da rocha mãe e dos processos de transformação que sofreram ao longo do seu ciclo de vida. Estes processos são originados pela existência de matéria orgânica, pela queda de precipitação, pela acção do vento, pela sedimentação do solo ou pela adição de produtos químicos (como adubos, biocidas, resíduos).

Todos estes processos de transformação do solo caracterizam os diferentes tipos de solos existentes no nosso globo terrestre, Figura 2.4. No entanto, os solos mais vantajosos para o uso da construção em terra são solos que contém percentagens de argila entre 15-30 % (Minke, 2001).

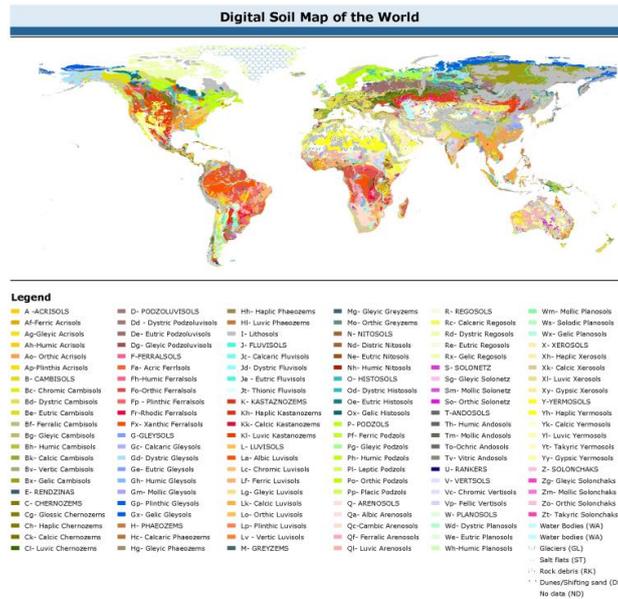


Figura 2.4 – Mapa de solos do Mundo (FAO-UNESCO, Soil map of the World, 2007).

2.3.1 COMPOSIÇÃO DO SOLO

O solo para construção é composto por gravilha, areia, silte e argila que, em diferentes proporções, influenciam o resultado final da construção. Se o solo contiver poucas quantidades de argila, e grandes quantidades de areia e silte, este será um solo bastante resistente porém pouco consistente, pois a argila não tem a capacidade de ligar todas as partículas. Se, pelo contrário, contiver grandes quantidades de argila, no processo de secagem dá-se uma grande contração e, como consequência, fendilha, retirando resistência ao produto final.

Segundo Minke (2001), a argila resulta da decomposição do Feldspato e outros minerais. A sua composição mineralógica quando reagindo com água e com os sais contidos nela, geram forças superficiais nas partículas de tal forma importantes que servem para aglutinar os restantes materiais.

Para uma boa construção é essencial o profundo conhecimento do material que se está a utilizar. A terra, antes de ser utilizada para a elevação das paredes deve ser submetida a uma análise cuidada que identifique as suas características físicas e químicas. Assim, é possível um melhor conhecimento do material para que este seja aplicado da forma mais correcta, bem como, caso seja necessário, fazer-se uma correcção das suas características adicionando-lhe outras matérias, modificando a sua composição física e/ou química.

2.3.2 ENSAIOS PARA CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

Existe uma variedade de ensaios que tem como objectivo classificar a constituição do solo. Existem os designados ensaios *in situ* ou expeditos e os ensaios laboratoriais, sendo estes últimos mais indicados para uma análise mais precisa. Como exemplos dos testes expeditos têm-se (Minke, 2001):

- o teste do cheiro, através do qual é possível identificar a presença de matéria orgânica;

- teste do brilho. Uma amostra húmida do solo é moldada em forma esférica. Ao fazer um corte nessa amostra, se apresentar um aspecto brilhante está-se na presença de argila, caso apresentar um aspecto baço, indica que se está na presença de silte;
- teste da prova. Um pedaço de solo é colocado na boca. Um solo arenoso irá dar uma sensação desagradável ao contrário do solo siltoso. Por sua vez, um solo argiloso, dá uma sensação de ser pegajoso, suave e farinhento.
- teste à lavagem. Uma amostra húmida de solo é friccionada entre as mãos, caso se sinta facilmente a presença de grãos indica a presença de gravilha ou areia, se a amostra é pegajosa mas as mãos são limpas sem recurso a água, indica a presença de um solo siltoso, caso seja necessário água para lavar as mãos indica que o solo é argiloso;
- teste de sedimentação. Uma amostra de solo é colocada num recipiente juntamente com água (solo/água correlação de 1:4) e é fortemente agitada. Pela acção da gravidade as partículas maiores irão depositar-se primeiro no fundo do recipiente enquanto as mais finas ficam mais à superfície. No final, obter-se-á diferentes camadas e de diferentes alturas que indicam a proporção de cada matéria na amostra, gravilha, areia, silte e argila;
- teste de consistência. É feito um cilindro com cerca de 5 cm de diâmetro e 1 cm de comprimento com uma amostra da terra que posteriormente é seco ao sol ou em estufa. Após a secagem e ao se apertar os discos entre o polegar e o indicador, a dureza observada permitirá classificar o solo: se for necessário muita força para quebrar o disco, é porque a amostra tem argila suficiente, que dá coesão ao cilindro, e areias, que conferem maior resistência às forças; se se partir facilmente e se pulverizar muita matéria, a amostra é rica em areias e siltes;
- teste de coesão ou teste do rolinho. Este teste consiste em fazer um rolo com 3 mm de espessura sem que apareça nenhuma fissura ou que este se parta. Caso aconteça algum dos casos deve-se adicionar água até este se manter intacto com os 3 mm. De seguida, faz-se um rolo com 6 mm de diâmetro e 20 cm de comprimento com uma amostra do solo ligeiramente humedecida. O rolo é colocado na palma da mão e, lentamente, deve ser empurrado para fora. Quando maior o comprimento do rolo que ficar pendurado sem se quebrar maior o teor de argila na amostra pois existe uma coesão maior;
- teste da queda de uma bola. Uma amostra húmida do solo é moldada numa bola de 4 cm de diâmetro e é deixada cair a uma altura de 1,5 m. Se a bola se mantiver intacta e apenas deformada indica que a amostra é rica em argilas, caso contrário se esta se desfizer completamente, então a amostra é rica em areia e siltes.

Como ensaios laboratoriais podem referir-se o teste de peneiração, o teste de sedimentação e o teste de teor de humidade.

A análise granulométrica identifica a quantidade, em percentagem de massa, de cada um dos constituintes. Esta análise é realizada a partir de dois processos distintos através dos quais se obtém uma curva granulométrica que permite a classificação do solo. Existe a análise granulométrica por peneiração e por sedimentação. Na primeira, como o nome indica, são utilizados peneiros de diferentes dimensões, que dividem o solo pelas dimensões dos grãos. As dimensões dos peneiros, por sua vez, podem variar dependendo da norma utilizada. Segundo a norma alemã DIN 18123, abaixo de 0,002 mm é apenas argila, entre 0,002 e 0,06 mm são denominadas de silte, entre 0,06 e 2 mm são denominadas de areia e de 0,06 mm para cima é gravilha (Minke, 2001).

Para grãos inferiores a 0,002 mm é efectuado a análise granulométrica por sedimentação. Este ensaio tem por princípio básico a relação da velocidade de sedimentação com o tamanho da partícula. Quanto maior a partícula mais rapidamente esta se deposita no fundo do recipiente.

O teor de humidade na mistura está dividido em três tipos: a água de cristalização, presente na estrutura cristalina dos elementos; a água de absorção; e a água capilar (presente nos poros). Enquanto a água de absorção e capilar evapora quando a terra é aquecida a uma temperatura de 105 °C, para a água de cristalização evaporar é necessário um aquecimento entre os 400 e 900 °C. O teste de teor de humidade consiste no aquecimento da amostra a 105 °C até obter peso constante. Posteriormente, a amostra é pesada e a diferença de peso entre a amostra inicial e a amostra seca representa o peso água de absorção e capilar inicial da amostra. Logo, o teor de humidade inicial da amostra é obtido pelo quociente entre essa diferença de peso entre a amostra inicial e a amostra seca e o peso da amostra seca.

McHenry (1984) definiu uma mistura em percentagem de massa eficaz para a construção de cerca de 23% de areia grossa, 30% de areia fina, 32% de silte, 15% de argila e 10% de água. Quanto à matéria orgânica, esta deve ser mantida abaixo dos 10% para não se decompor e degradar as estruturas.

Todavia, quando o solo não apresenta as características ideais é possível corrigi-lo. Oliver (1998) acredita que para a taipa crescer como um material moderno não se deverá apenas aperfeiçoar a técnica mas sim a mistura utilizada. Assim, baseando os seus estudos em análises de engenharia standards, o resultado final é uma definição física e química das características necessárias.

2.3.3 ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ÁGUA E VAPOR DE ÁGUA E DA RESISTÊNCIA MECÂNICA

Para além dos ensaios acima descritos, que têm como principal objectivo o de caracterizar a composição do solo, existem outros ensaios que caracterizam o solo face ao seu comportamento a agressores externos, como a presença da água e do vapor de água, dos gradientes térmicos e a resistência as forças externas. Considera-se que estes ensaios são igualmente importantes pois aumentam o conhecimento do solo e caracterizam as suas vulnerabilidades. Na categoria da presença da água estuda-se a dilatação e retracção das amostras durante os períodos de humedecimento e de secagem; determinação da retracção linear; a determinação do limite líquido, do limite plástico e o índice de plasticidade e o limite de retracção. Relativamente à acção da capilaridade do material realizam-se os seguintes testes: determinação do coeficiente absorção capilar; capacidade de água capilar; teste de penetração de água; resistência a água corrente; resistência à erosão provocada pelas chuvas e geadas; e a definição do período de secagem. Quanto à presença do vapor de água existem também diversos testes como a difusão do vapor de água e a obtenção do teor de humidade de equilíbrio.

No que respeita à resistência das forças externas, existe ainda uma panóplia de testes utilizados para calcular a força de ligação, a resistência à compressão, a resistência à tracção, a resistência à flexão, a resistência à abrasão, o módulo de elasticidade e a resistência dos cantos ao impacto.

2.3.4 ENSAIOS PARA A CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

Ao longo do presente trabalho de investigação pretende-se estudar o comportamento térmico das paredes de taipa. Para esse fim, é necessário determinar as seguintes características:

- a condutibilidade térmica (λ). Esta característica dos materiais indica a capacidade que o material tem de conduzir calor (W/mK);

- o calor específico volumétrico (c_p). Define a quantidade de calor (kJ) necessária para aquecer 1 m^3 de determinada matéria em 1 K ($\text{kJ}/\text{m}^3\text{K}$);
- a difusividade térmica (α). Característica que mede a capacidade de um material de conduzir calor relativamente com a capacidade de armazenar calor térmico. Assim, a difusividade térmica resulta da divisão entre a condutibilidade térmica (λ) e o calor específico volumétrico (c_p);
- o coeficiente de transmissão térmica (U). Define a quantidade de calor transferido por m^2 de área superficial por $^\circ\text{C}$ de gradiente térmico ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$);
- o factor de amortecimento e o desfasamento temporal. Estes dois termos são utilizados quando as paredes exteriores têm uma inércia térmica muito elevada, como é o caso das construções em terra. A inércia térmica de um elemento leva a uma redução bastante significativa da amplitude térmica interior face à amplitude térmica exterior. Adicionalmente, a inércia térmica, cria um grande atraso das temperaturas máxima e mínima interiores relativamente às temperaturas máxima e mínima exteriores. A este atraso dá-se muitas vezes o nome de *time lag*.

Para a determinação das características térmicas são realizados diversos testes. No presente trabalho de investigação será levado a cabo uma monitorização *in situ* das temperaturas, dos fluxos de calor através da parede e da humidade relativa. A partir dos dados recolhidos será possível avaliar a inércia térmica dos elementos e será também possível calcular o coeficiente de transmissão térmica (valor-U). Para a determinação da condutibilidade térmica, da capacidade térmica volumétrica e da difusividade térmica será utilizado uma sonda portátil, que através da imposição de um impulso térmico, permite a medição.

2.7 COMPORTAMENTO TÉRMICO DA CONSTRUÇÃO EM TERRA – ESTADO DA ARTE

A relevância do estudo do comportamento térmico das construções em terra advém do ainda escasso conhecimento e número de estudos de investigação realizados neste domínio. Apesar da extensa bibliografia e actual interesse sobre o tema da arquitectura em terra em geral, os dados relativos às características do comportamento térmico de paredes em terra são reduzidos quer a nível mundial, quer a nível nacional.

Uma vez que a construção em terra utiliza um material com propriedades que variam de zona para zona, sendo possível encontrar casos com um grau de heterogeneidade muito elevado ao longo de um só elemento construtivo, nomeadamente no que diz respeito a construções antigas, é difícil definir valores precisos de condutibilidade térmica do material e de inércia térmica das construções. Apesar do presente estudo se cingir à solução de parede em taipa e em BTCs, a recolha bibliográfica é mais abrangente, incidindo não só em estudos efectuados utilizando a técnica construtiva da taipa e BTCs mas também em abobe. Tendo em conta estas variantes, em que a mistura de palha nos adobes e a utilização de outros materiais mais recentes em alvenarias de terra, como por exemplo, aglomerados de cortiça, alteram ainda mais as propriedades térmicas da terra, os valores da condutibilidade térmica do material diminuem devido às propriedades isolantes destes materiais em comparação com o uso de terra pura.

Nos últimos anos, têm sido realizados alguns estudos experimentais de monitorização *in situ*, ou em células de teste exteriores (sujeitas às solicitações climáticas exteriores) sobre o comportamento

térmico de soluções de construção em terra, destacando-se os trabalhos de Meneses et al. (2011), Soebarto (2009), Allinson e Hall (2010), Taylor e Luther (2003) e Goodhew et al. (2000).

Meneses et al. (2011) realizaram uma campanha experimental de monitorização de células de teste, à escala 1:4, sujeitas às solicitações climáticas exteriores. Construíram-se três células de igual dimensão com adobes de 15cm à escala real (3,75cm à escala 1:4) de espessura e com características diferentes na sua composição. Desses três diferentes tipos de adobes, num deles foi utilizado aglomerado de cortiça. Pretendia-se avaliar a inércia térmica e a condutibilidade da terra das paredes de adobe, comparando-se com os requisitos regulamentares mínimos. Os valores da condutibilidade térmica ($W/m \cdot ^\circ C$) obtidos através da monitorização das três células estavam compreendidos entre 0,59 (com aglomerado de cortiça) e 0,95 (cal hidratada, terra ligeiramente argilosa e areia). É de destacar o especial interesse desta pesquisa pelo facto de contemplar o estudo da introdução de materiais com propriedades isolantes na fabricação da alvenaria tendo como objectivo alcançar valores mínimos estipulados pela regulamentação térmica portuguesa para as soluções construtivas de paredes exteriores.

Soebarto (2009) apresentam os resultados obtidos através da monitorização de três casos de estudo com construção em taipa. Destes, um dos casos de estudo apresenta uma solução construtiva em dois panos com isolamento entre eles. Neste trabalho é assumido o valor de 1,25 $W/m \cdot K$ para a condutibilidade térmica da taipa (valor regulamentado pelo Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating (AIRAH, 2000) para uma taipa com massa volúmica de 1540 kg/m^3). Com este estudo, conclui-se que, na situação de Inverno, a diferença das temperaturas interiores das casas sem isolamento para a casa com isolamento podia variar em $5^\circ C$, enquanto na situação de Verão os valores eram similares nas três soluções.

Soebarto (2009) efectuou também uma simulação dos três casos de estudo apresentados e comparou os resultados obtidos com e sem isolamento chegando à mesma conclusão apresentada acima aquando a monitorização *in situ*.

Allinson e Hall (2010), por sua vez, analisaram o comportamento higrotérmico de taipa estabilizada (SRE – Stabilised Rammed Earth) através da simulação de um caso de estudo, previamente monitorizado *in situ*, utilizando o software WUFI Plus v1.2. Posteriormente, compararam o comportamento da parede de taipa estabilizada com outras soluções de revestimento (placa de gesso, placa de gesso pintada e folha metálica) e puderam concluir que a terra diminui significativamente a amplitude das flutuações da humidade relativa no interior dos espaços e reduz a frequência de períodos com grande humidade à superfície da parede. Sendo assim, a utilização da terra diminui a quantidade de energia utilizada nos processos de humidificação/desumidificação dos espaços interiores comparativamente com os outros materiais testados.

Taylor e Luther (2003) realizaram uma campanha experimental de um caso de estudo localizado na Austrália, tendo por fim, chegado à conclusão que a elevada massa, e logo inércia térmica das paredes de terra, neste caso com 300 mm de espessura, melhorava consideravelmente as suas propriedades térmicas, apesar da resistência térmica deste material ser bastante reduzido.

Por sua vez, Goodhew et al. (2000) apresentaram alguns valores para as propriedades térmicas da construção em terra, baseados na monitorização de três casos de estudo reais, numa altura em que a informação neste campo era escassa. Neste estudo obtiveram-se valores de coeficiente de transmissão térmica, U, entre 0,7 a 1,6 ($W/m^2 \cdot K$) para espessuras de parede entre 250 a 550 mm. Sendo a Grã-Bretanha um país extremamente exigente a nível da regulamentação térmica dos edifícios (valor U limite na onda de $0,35 \text{ W/m}^2 \cdot K$) os valores obtidos ficaram muito aquém dos requisitos mínimos.

Relativamente a pesquisas laboratoriais de avaliação das propriedades da terra adicionando outros materiais e estudos utilizando câmaras climáticas, é importante destacar os trabalhos desenvolvidos por Goodhew e Griffiths (2004) e Hall (2007).

Goodhew e Griffiths (2004), baseando-se na pesquisa de Goodhew et al. (2000), apresentaram soluções construtivas para paredes em terra tendo em conta os objectivos impostos pela regulamentação. Neste caso, os materiais isolantes são introduzidos na estrutura de paredes com uma solução de duplo pano com o isolamento no interior, contrariamente ao que acontece na experiência de Meneses et al. (2011), em que estes são misturados na terra. Os objectivos principais deste estudo eram determinar as propriedades térmicas de soluções sustentáveis de paredes utilizando os materiais isolantes e compará-las com as soluções tradicionais e ainda demonstrar de que forma seria possível adaptar a construção em terra às exigências mínimas regulamentares impostas na Grã-Bretanha. Por fim, chegaram a soluções construtivas de diferentes espessuras com valores de transmissão térmica bastante reduzidos, alcançando o valor máximo regulamentado ($0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Posteriormente, Hall (2007) utilizou duas câmaras climáticas por forma a compreender o comportamento higrotérmico da taipa estabilizada, em paredes com 300 mm de espessura. Foi possível avaliar, após submeter a parede a condições de precipitação e humidade, que a quantidade de humidade que penetra no interior da parede é bastante reduzida e que a percentagem de humidade relativa no interior da parede tem um aumento muito pouco significativo.

Outra solução em terra que tem apresentado um desenvolvimento crescente nos últimos anos são os blocos de terra comprimida (BTC), pré-fabricados através de prensagem manual ou mecânica, que surgem pela necessidade de acelerar o processo moroso da construção em terra e melhorar a qualidade técnica destas soluções.

No entanto, muitas das vezes, os solos não têm as características necessárias para serem utilizados na construção e conseguem cumprir os requisitos mecânicos e funcionais impostos pela regulamentação. É neste contexto que surgem os blocos de terra comprimida estabilizados (BTCE), ou blocos de terra estabilizada, que envolvem a adição de reduzidas percentagens de materiais cimentícios, conferindo, assim, uma maior coesão entre partículas.

A resistência à compressão e a durabilidade de BTCE estabilizados com materiais cimentícios, são as propriedades mais estudadas até à data (Morel e Pkla (2002); Morel et al. (2007); Cid-Falceto et al. (2012); Aubert et al. (2013)). Na restante bibliografia encontrada, os BTCE contêm outros constituintes para além de cimento. Tristão e Pimentel (2007) utilizaram cinza de casca de arroz; Eires et al. (2009) metacaulino e cal; Lima et al. (2012) cinzas de bagaço da cana-de-açúcar; Villamizar et al. (2012) cinzas de carvão e cascas de mandioca.

Silva et al. (2010), baseando-se nos estudos de Faria et al. (2008), propõem um método de ensaio para a resistência à compressão dos BTC, visando sistematizar a sua caracterização mecânica.

Martins et al. (2010), por sua vez, analisaram a absorção de água por capilaridade de tijolos de adobe. Walker (1995) estudou, a resistência mecânica, durabilidade e contracção de BTCE estabilizados com cimento. Faria et al. (2009) sugerem uma metodologia para determinação do módulo de elasticidade. Oti et al. (2009) propõem um método laboratorial e teórico para a determinação do valor da condutibilidade térmica e resistência térmica de alvenarias de terra crua.

Em geral, a diversa bibliografia consultada enfatiza as vantagens da utilização de BTCE na construção. Comparando com outros materiais, o BTCE apresenta maiores vantagens ecológicas e ambientais, promove a utilização de materiais locais reduzindo custos no transporte, apresenta menor impacto e

menores custos de expansão, cria economia local, gera menos emissões de CO₂ e a energia incorporada é mais reduzida. Por fim, a higroscopia do material pode trazer benefícios para um ambiente mais saudável, dado que permite uma melhor regularização da humidade no ambiente (Riza et al. (2010)).

Apesar dos estudos realizados e o crescente desenvolvimento de investigação nesta área, são ainda escassos os trabalhos que envolvem a caracterização detalhada do comportamento dos BTCE, nomeadamente tendo em conta o desempenho térmico e de durabilidade de novas soluções. Assim, justifica-se o maior desenvolvimento de estudos neste domínio, contribuindo para a consolidação do conhecimento na utilização de construções em terra.

3. DESCRIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No presente capítulo é feita uma descrição dos casos de estudo analisados no âmbito do presente trabalho de investigação. Inicialmente caracterizou-se o clima da região de Abrantes, zona onde estão localizados os casos de estudos. De seguida, apresenta-se o levantamento dos casos de estudo acompanhados da respectiva descrição arquitectónica, bem como da caracterização das soluções construtivas da envolvente.

3.2 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE CLIMÁTICA DE ABRANTES

Os três casos de estudo estão localizados na região Médio Tejo (NUT III), no concelho de Abrantes. Abrantes tem uma área total de cerca de 713 km² e está limitado a norte pelos concelhos do Sardoal e de Vila de Rei, a Este pelos concelhos de Gavião e Mação, a Sul pelos concelhos de Ponte de Sor e Chamusca e a Oeste pelos concelhos de Constância, Vila Nova da Barquinha e de Tomar (Figura 3.1.) Por sua vez, Abrantes é composto por 19 freguesias (Figura 3.1), sendo Alferrarede e o Pego as duas freguesias onde estão localizados os casos de estudo.



Figura 3.1 – Mapa de localização de Abrantes (Wikipédia Portugal).

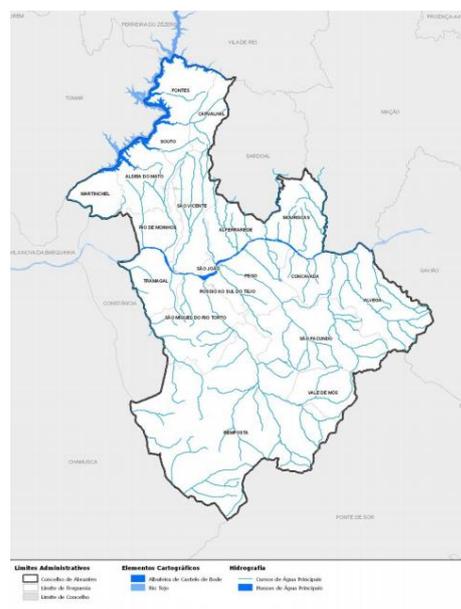


Figura 3.2 – Mapa hidrográfico do Concelho de Abrantes (IGP, CACP, Limites administrativos 2007, Cartografia numérica da CMA).

O rio Tejo tem um papel muito importante na morfologia da região de Abrantes uma vez que o divide em duas zonas, na zona norte e na zona sul do rio Tejo (Figura 3.2). Esta divisão verifica-se na própria morfologia do terreno pois se na margem norte o terreno é bastante acentuado com vales estreitos dos afluentes que seguem para o rio Tejo e para o rio Zêzere, na margem sul o terreno tem elevações mais suaves e apresenta vales largos. A zona central, por onde o rio corre, é caracterizada por uma suave inclinação.

Esta diferenciação na orografia do terreno tem, de certa forma, alguma influência no clima das freguesias onde se localizam os casos de estudo. Por um lado, um dos casos de estudo, localizado em Casais de Revelhos, Alferrarede, situa-se na margem norte do rio, logo está localizado numa zona mais elevada, mais distante do rio e menos abrigada dos ventos. Por outro lado, os outros dois casos de

estudo estão localizados na margem sul do Tejo, na zona da planície. A margem norte do rio tem uma orientação essencialmente Este devido aos declives existentes definidos pelas linhas de água dos rios que afluem no rio Tejo, enquanto a zona sul tem uma orientação que alterna entre o Norte e o Sul.

Não obstante as ligeiras diferenças climáticas entre as duas localizações estudadas, a região de Abrantes tem um clima Csa¹ segundo a classificação Köppen-Geiger, que corresponde à última revisão de Köppen em 1936 (IPMA, I.P.).

A forte massa volúmica de rios na região de Abrantes, nomeadamente o rio Tejo e o rio Zêzere, influenciam bastante as condições climáticas da região: amplitudes térmicas mais controladas; aumento de queda de precipitação; e temperaturas nocturnas mais baixas.

Recorrendo à ficha climática disponibilizada pelo IPMA é possível caracterizar o clima da região. Esta caracterização climática remete para dados recolhidos num período de 30 anos (1961-1990) na estação meteorológica de Alvega a cerca de 20 km do centro de Abrantes.

- **Temperatura do ar**

Pela Figura 3.3 pode concluir-se que o mês com a temperatura média mensal mais baixa é Janeiro seguido do mês de Dezembro. É também no mês de Janeiro que se fazem sentir as temperaturas máximas mais baixas, tanto no valor da temperatura máxima como na média dos valores máximos. Por sua vez, Julho e Agosto são os meses do ano mais quentes onde a temperatura máxima chega a atingir 43 °C em Julho e 42 °C em Agosto. Agosto é o mês com a média das temperaturas máximas mais elevadas, 32,1 °C.

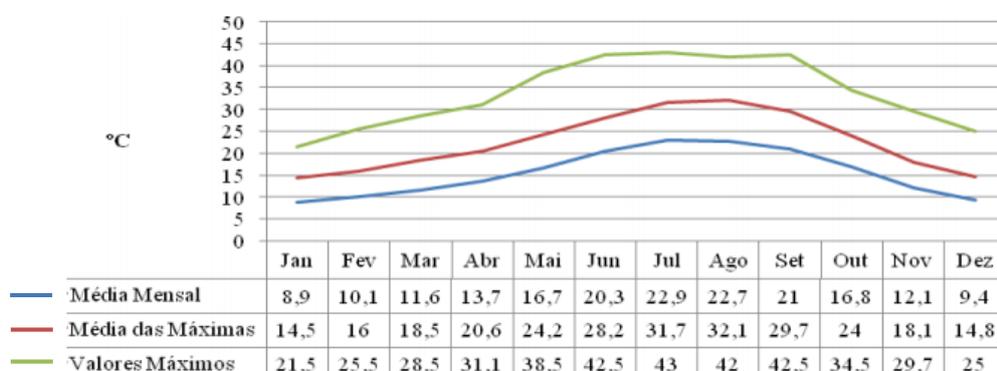


Figura 3.3 - Valores mensais da temperatura média, média das máximas e valores máximos no concelho de Abrantes (1961-1990) (IPMA).

- **Humidade Relativa**

Pela Figura 3.4 observa-se que os meses de Inverno, em maior ênfase para os meses de Dezembro e Janeiro, apresentam níveis de humidade relativa no ar bastante elevados, entre 76 % e 90 %. Existe uma redução gradual da humidade relativa do ar com o aumento da temperatura, nos meses de Verão. No

¹ A classificação Tipo C indica um clima temperado, por sua vez a classificação Cs indica um clima temperado com Verões secos. Assim, o subtipo Csa indica clima temperado com Verão quente e seco, influenciado pelo clima mediterrânico.

entanto a diferença entre a humidade relativa medida às 9h e às 18h é maior nos meses mais quentes, apresentando uma maior diferença nos meses de Julho e Agosto.

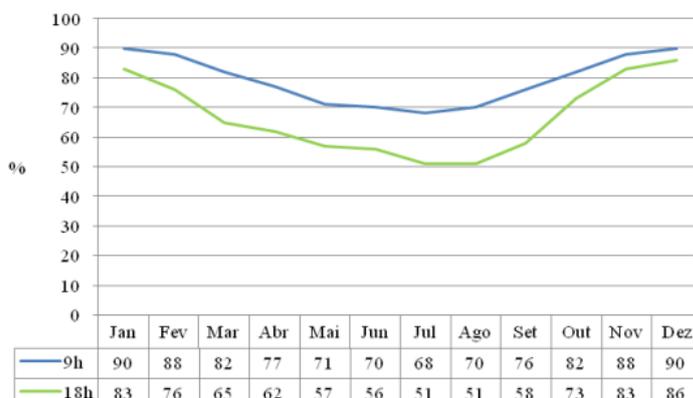


Figura 3.4 - Valores médios mensais da humidade relativa do ar às 9 e 18 horas no concelho de Abrantes (1961-1990) (IPMA).

• Precipitação

Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro são meses que apresentam valores mais elevados de precipitação total, sendo Novembro o mês que apresenta o valor mais elevado de precipitação diária (92 mm). Por sua vez, Julho e Agosto apresentam valores muito reduzidos de queda de precipitação, 5,5 e 5,2 mm respectivamente (Figura 3.5). Estes reduzidos valores de queda de precipitação, quando conjugados com as temperaturas elevadas dos respectivos meses, originam os valores de HR bastante baixos observados na Figura 3.4.

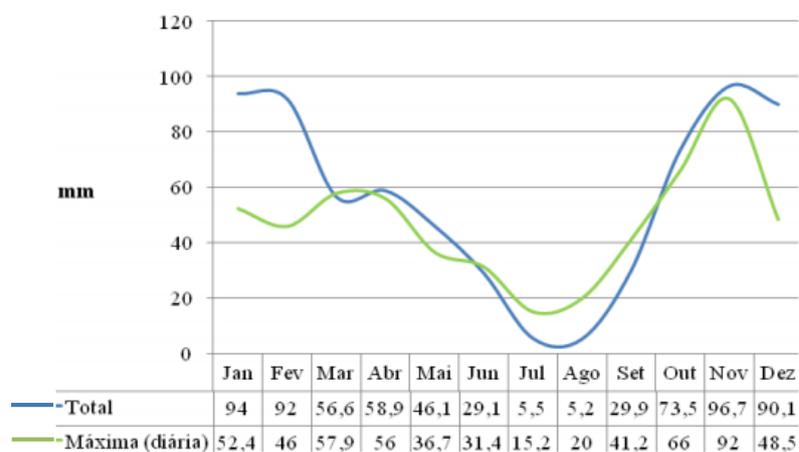


Figura 3.5 - Precipitação mensal e máximas diárias no concelho de Abrantes (1961-1990) (IPMA).

• Ventos

Os ventos que predominam na região de Abrantes são essencialmente os ventos Noroeste (NW), a Sudoeste (SW) e Nordeste (NE). Enquanto os ventos NW e NE são regulares ao longo do ano, os ventos rumo a SW têm maior intensidade nos meses de maior calor e são bastantes quentes e secos vindos do norte de África.

	N		NE		E		SE		S		SW		W		NW	
	FR	VM	FR	VM	FR	VM	FR	VM	FR	VM	FR	VM	FR	VM	FR	VM
Janeiro	0,1	2	20,8	7	1,5	5,4	14	5,9	1,1	7	18,8	7,2	0,8	6,9	6,5	7,3
Fevereiro	0,1	3	22,2	7,5	1,5	6,7	11,9	6,3	1,1	5,7	24,1	7,5	2	6,6	10,9	7,5
Março	0,2	3,5	27,1	9,2	1	6,3	8,4	6,3	0,3	5,5	23	7,7	2,5	7,7	21,6	8,9
Abril	0,5	4,2	22,9	9,9	0,6	6,9	7,5	7,1	0,3	7,8	25,5	8,5	4,1	8,5	29,7	9,5
Mai	0,5	5	15,5	10,5	0,9	9,6	5,2	7,2	0,4	4,4	27,3	9,4	3,8	9,9	41,7	10,5
Junho	0,4	5	12,5	9,7	0,6	7,7	4,9	7	0,4	7,3	28,9	9,1	4,5	10,1	41,8	10,5
Julho	0,4	5,1	10,2	10,3	0,2	11,3	2,6	6	0,6	5,6	27,2	9,3	6,8	10,2	45,9	10,4
Agosto	0,4	6,1	11,2	9,6	0,1	2,5	2,5	5,8	0,2	6,7	26,8	9,2	6,7	8,7	45,4	10,1
Setembro	0,6	3,8	14,7	7,6	0,8	9,8	5,8	5,8	0,8	6,6	27,6	7,2	5,4	7,9	31,4	8,4
Outubro	0,2	2,3	21,3	7,5	1,5	7,6	12,1	6,2	0,5	5	22,7	5,8	2,4	6,2	13,8	7,3
Novembro	0,2	3,3	21,1	7,5	1,9	7,5	13,3	5,3	0,9	4,8	18,7	6,6	1,2	5,4	8,8	6
Dezembro	0,2	1	25	7,3	1,8	6,4	13	6,1	0,4	6,9	16,8	7	1,3	5,4	6,4	6,5
Média	0	4	19	9	1	7	8	6	1	6	24	8	3	8	25	9

Figura 3.6 - Médias mensais da frequência (FR em %) e velocidade (VM em km/h) do vento no concelho de Abrantes (1961-1990) (IPMA).

3.2 A POPULAÇÃO E A CASA TRADICIONAL DE ABRANTES

Embora no passado, parte da população de Abrantes se tenha ocupado quer própria navegação fluvial (tripulantes) entre Lisboa e aquela cidade, quer na trânsfuga de mercadorias que abasteciam a região ou dela iam abastecer Lisboa, a maioria da população de Abrantes, até finais da década de 60, do século XX, estava fortemente ligada ao sector agrícola, essencialmente do cultivo de olivais para a produção de azeite e, em menor escala, o cultivo de vinhas. Trabalhavam como assalariados rurais e, de modo a complementarem o seu salário, cultivavam pequenas propriedades. Outro sector importante na vida da população de Abrantes é o sector da indústria, em particular, de fundição e metalomecânica (CMDFCI, 2008).

Em geral, a qualidade de vida era bastante precária e eram poucos os homens que viviam o ano inteiro em Abrantes, excepto se já não tivesse saúde para aguentar temporadas longas fora de casa. O abrantino, no fim do Inverno, era contratado para ir trabalhar no Ribatejo, Beiras, Alto Alentejo, costa alentejana, para trabalhos relacionados com o montado de sobreiro e azinheira, onde permanecia até o fim do Verão. As condições eram precárias e o trabalho extremamente pesado.

A mulher abrantina, por sua vez, aprendia desde muito cedo a fazer a lida da casa e tomava conta dos seus irmãos para a mãe ir trabalhar no campo. A escolaridade era bastante reduzida ou quase nula, pois era normal começar a trabalhar ainda adolescente, ajudando os pais na agricultura ou como doméstica em casas abastadas da região, para ajudar os pais.

Diversas mudanças ocorreram no estilo de vida da população. Na década de 50, do século passado, os mais jovens começaram a preferir trabalhar na indústria, pois esta oferecia uma qualidade de vida mais estável e com vencimentos regulares. Mais tarde, na década de 60, começou a dar-se o êxodo rural para se trabalhar, essencialmente, na construção civil em Lisboa². Durante a ausência do homem a família continuava a cuidar da propriedade e a subsistir da agricultura. Apesar da relativa melhoria a nível económico as condições de trabalho eram extremamente precárias mas, no entanto, eram suficiente para contribuir para a escolaridade dos filhos e para que estes aprendessem um ofício.

² Embora não refira, explicitamente, a região em causa, o filme "Os verdes anos" (1963), de Paulo Rocha, é ilustrativo deste êxodo da província para a capital, centrando-se, precisamente, na construção civil e nas actividades que, finda aquela, os seus protagonistas abraçam já sem regressarem às suas terras de origem.

Apesar das pequenas mudanças, a maioria dos habitantes de Abrantes sempre passaram por grandes dificuldades económicas reflectindo-se na construção das suas habitações. A falta de recursos económicos foi determinante para que a terra tenha sido o principal material de construção adoptado, durante algumas décadas, nesta região, em particular recorrendo-se à construção em taipa.

A casa tradicional da região de Abrantes é uma casa térrea de pequenas dimensões, normalmente, construídas em taipa (desde tempos imemoriais até às três primeiras décadas do séc. XX). As paredes de taipa eram utilizadas no exterior e no interior, sob o ponto de vista estrutural (paredes portante), as paredes divisórias, em tabiques, que consistia em fazer uma estrutura de madeira que posteriormente era preenchida ou com pedra, fragmentos de tijolo e tijoleira, terra com bastante argila, ou então eram construídas com tijolo burro. Posteriormente, tanto as paredes exteriores como as interiores eram sempre rebocadas e caiadas. Do telhado de duas águas saía uma volumosa chaminé de forma trapezoidal, que podia estar situada na água fronteira como na traseira e orientada paralelamente às empenas da casa. O beirado raramente ultrapassava os 3m de altura e, variando consoante as possibilidades económicas, a fachada principal pode ostentar um friso decorativo em relevo ou não. Ainda associado à capacidade económica do proprietário, a fachada principal era emoldurada por sôco/rodapé, pilastras aparentes e cornija, bem como, também, os vãos emoldurados por argamassa saliente do paramento cerca de 0,01 m, tudo caiado com corante misturado à cal, este conseguido com sulfato de cobre (azul e verde), óxido de ferro (amarelo e vermelho) ou cinza (pó de carvão).

3.3 CASOS DE ESTUDO – APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO

No presente capítulo são apresentados e descritos os casos de estudo utilizados na campanha experimental levada a cabo no presente trabalho de investigação. São apresentados os levantamentos efectuados e alguns registos fotográficos dos casos de estudo.

3.1.1 CASO DE ESTUDO 1

O primeiro caso de estudo, denominado Caso de estudo 1, situa-se na freguesia de Alferrarede, na localidade de Casais de Revelhos. Casais de Revelhos tem cerca de 800 habitantes (Censos 2011) e está localizado na zona a norte do rio Tejo, na região alta do concelho de Abrantes.

A habitação foi construída há cerca de 100 anos, por uma família de agricultores. Pela planta (Figura 3.7) observa-se uma clara divisão dos diferentes espaços: zona de estar e quartos na divisão central; a cozinha no compartimento à direita com ligação com a zona de estar e com uma porta directa para a rua; e, no compartimento à esquerda, um anexo onde se armazenavam os produtos agrícolas. As paredes de taipa (Figura 3.10), com 55 cm de espessura, abrigavam os seus habitantes dos quentes verões da região e as raras e reduzidas fenestraçãoes deixavam penetrar a luz e o ar necessário à salubridade do interior da habitação. Quer as paredes perimetrais, quer as paredes divisórias têm função portante, construídas em taipa e apenas as paredes divisórias dos quartos construídas em tijolo burro (Figura 3.12), sem função estrutural. Devido à queda do reboco exterior (Figura 3.10), foi possível perceber-se a constituição da taipa neste caso de estudo, verificando-se a presença de uma taipa bastante heterogénea. Enquanto na zona inferior da abertura se observa uma taipa mais homogénea onde se diferencia pouco os inertes, na zona superior verifica-se, do lado direito, a presença de seixo de dimensões relativamente elevadas, e do lado esquerdo, a existência de um aglomerado de tijolos. Esta distribuição heterogénea dos constituintes da parede evidencia a necessidade de se construir com os

materiais disponíveis e de mais fácil acesso. Verifica-se ainda, pela cor avermelhada da terra, a presença de argila na sua constituição³.

A fachada principal está orientada a Sul e é nela onde se localizam a maioria das aberturas, portas e janelas de caixilharia de madeira. Na fachada norte existem duas aberturas para o exterior, uma em cada um dos quartos. Em geral, as fachadas estão despojadas de qualquer tipo de decoração, apenas se observa a existência de uma cornija, pintada também a branco, a partir da qual arranca o telhado, de duas águas.

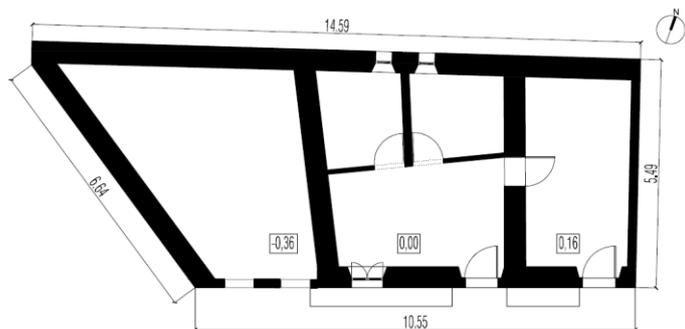


Figura 3.7 – Representação da planta do caso de estudo 1, Casais de Revelhos, Abrantes.

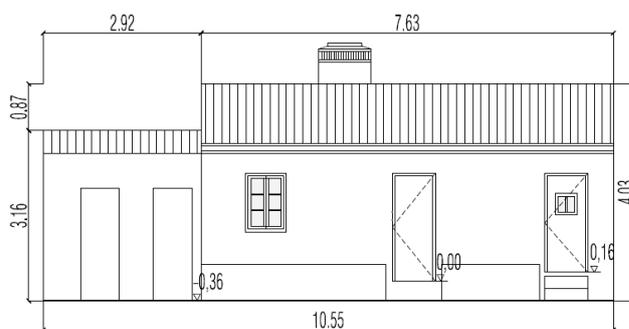


Figura 3.8 – Representação da fachada principal do caso de estudo 1.

O telhado é constituído por uma estrutura triangular (asnas, madres, varedo e ripado) revestida por telha cerâmica, sem qualquer forro inferior junto a esta (Figura 3.9). A Figura 3.11 apresenta ainda a ombreira da porta reforçada com tijoleira, para aumentar a sua resistência mecânica às solicitações à compressão exercidas pela verga do vão, onde descarrega a carga do telhado que apoia naquela zona e a taipa de preenchimento entre aquela verga e a cimalha.

Todas as paredes são caiadas, quer as exteriores, quer as interiores. O pavimento da habitação é em soalho de madeira na sala e quartos; o pavimento da cozinha é em argamassa e na zona da chaminé, sobreleva-se e é revestido a tijoleira; por fim, o pavimento do anexo, é apenas terra batida sem qualquer revestimento. No compartimento central da habitação existe um tecto horizontal, em madeira de forro, que cria um desvão não ventilado também em madeira; os outros dois compartimentos são em telha vã.

Por fim, existem dois poiais na fachada principal da casa, muito comum em fachadas em taipa, que têm como função a consolidação e protecção da parede⁴.

O presente caso de estudo encontrava-se em condições de degradação muito elevadas pelo que a experiência foi levada a cabo tendo em conta apenas a divisão central da habitação. Contudo, os procedimentos da campanha experimental são explicados no Capítulo 4.

³ A associação que se faz em a cor da terra e a presença da argila é apenas especulativa e baseada em relatos orais que nos foram transmitidos e não em investigações laboratoriais sobre a composição da terra existente na construção, investigação relevante mas que não se inseria no âmbito desta Dissertação.

⁴ Uma vez que, para o objecto desta Dissertação, a constituição e origem dos poiais não seria relevante, não se fez a prospecção inferior destes. Contudo, porque à taipa não é conveniente o contacto directo com o terreno, devendo ser sempre assente em fundação, ou cabeça de fundação, sobreelevada, construída em pedra argamassa com cal aérea e areia, pode colocar-se a hipótese destes poiais serem a própria fundação sobreelevada.



Figura 3.9 – Fachada principal do caso de estudo 1.



Figura 3.10 – Constituição da parede da fachada principal.



Figura 3.11 – Ombreira da porta principal reforçada com tijoleira.



Figura 3.12 – Parede divisória em tijolo de burro.

3.1.2 CASO DE ESTUDO 2

O segundo caso de estudo, denominado de Caso de estudo 2, situa-se na freguesia do Pego. O Pego está localizado a sul do rio Tejo, na zona da planície. É uma das freguesias de Abrantes com maior número de população residente, com 2431 habitantes, a seguir de Abrantes, Alferrarede, Tramagal e São Miguel do Rio Torto.

Contrariamente ao caso de estudo 1, a história do caso de estudo 2 não é conhecida, pelo que também não é conhecida a história da família que ali residia. Actualmente a casa encontra-se desabitada, tal como o caso de estudo 1, porém está em melhor estado de conservação que o caso de estudo anterior.

A habitação apresenta uma planta aproximadamente quadrangular (Figura 3.13) e as suas paredes exteriores são em taipa, de 50 cm de espessura, bem como uma das paredes divisória interiores que, estruturalmente, divide a habitação em duas partes e é, ao mesmo tempo, a parede central de apoio da estrutura da cobertura da edificação. Uma zona destinada à sala de estar, à direita da porta principal e a um quarto do lado esquerdo separadas por um longo e estreito corredor central que faz a ligação entre a porta de entrada e a cozinha. Pela existência de duas portas na divisória do quarto e de uma viga de madeira no tecto a meio da divisão pressupõe-se que, inicialmente, existiriam dois compartimentos. Na metade posterior da planta encontra-se a cozinha, que dá acesso ao quintal localizado nas traseiras da habitação, e uma despensa (Figura 3.19).

A fachada principal da casa está orientada a Noroeste. As aberturas são quase inexistentes, uma porta e duas janelas na fachada principal e uma porta e uma janela viradas para o pátio, na fachada orientada a sul. A fachada, e só esta, é emoldurada por rodapé, pilastras aparentes laterais e acusação de um topo de laje de esteira inexistente, bem como os próprios vãos, em argamassa saliente daquela fachada

protegendo-a de uma degradação precoce. Neste caso de estudo, para além duma cimalha, também parte dela pintada a preto existe um friso decorativo com motivos florais (Figura 3.16).

A restante envolvente vertical, duas empenas, a fachada tardez são simplesmente caiados. A caixilharia é de madeira pintada a branco e a porta é de ferro lacado a preto, da cor dos elementos decorativos da fachada. O pavimento da habitação é revestido a mosaicos com variados padrões no corredor. A cozinha é também revestida a mosaico, com a zona da chaminé sobrelevada em relação ao restante pavimento. Já o pavimento da sala é em argamassa e o do quarto em soalho de madeira. O tecto, horizontal, é em forro de madeira que cria um desvão, entre o tecto e a cobertura inclinada.

Do telhado ergue-se uma típica chaminé, volumosa, encastrada na empena lateral direita (Figura 3.15 e Figura 3.17). O telhado é constituído por estrutura de madeira apoiada na parede central e nas paredes de fachada e é revestido com telha cerâmica do tipo Marselha e beirado em telha de canudo.

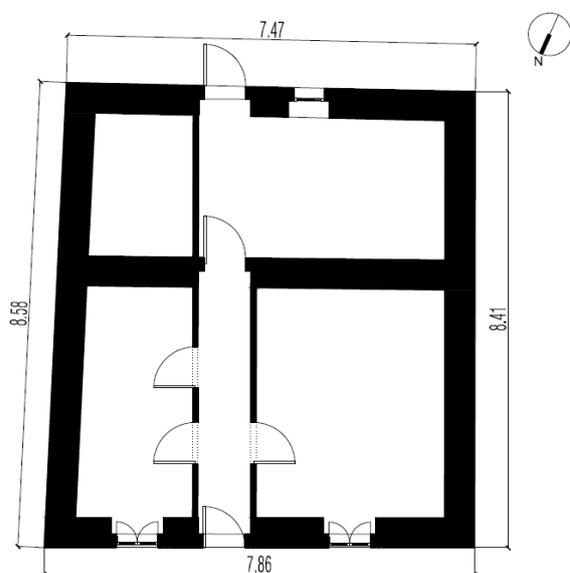


Figura 3.13 – Representação da planta do caso de estudo 2, Pego, Abrantes.

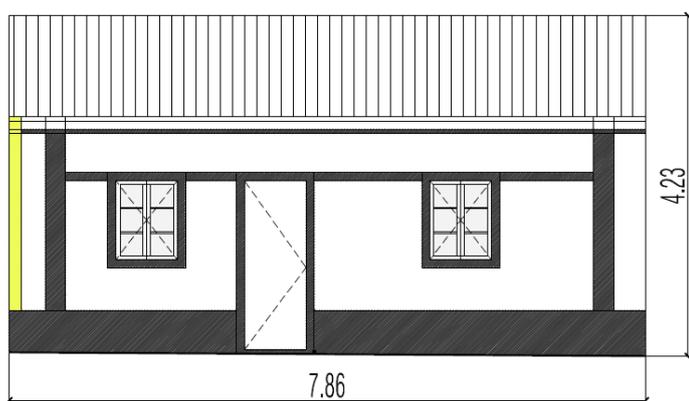


Figura 3.14 – Representação da fachada principal do caso de estudo 2.

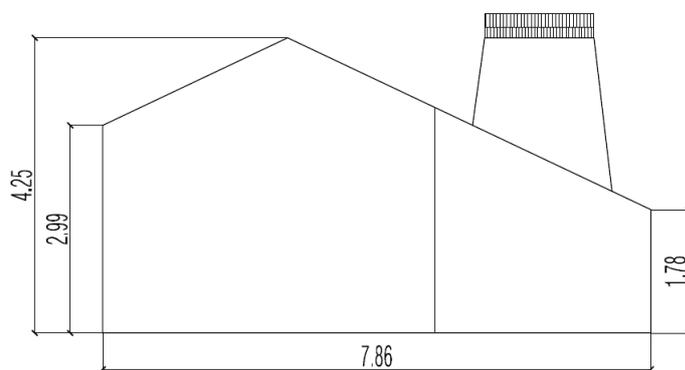


Figura 3.15 – Representação da empena lateral do caso de estudo 2 orientada a oeste.



Figura 3.16 – Fachada principal do caso de estudo 2.



Figura 3.17 – Empena lateral Oeste do caso de estudo 2.



Figura 3.18 – Cozinha. Ao fundo, local onde se preparava a refeição.



Figura 3.19 – Pátio interior e anexo.

3.1.3 CASO DE ESTUDO 3

O terceiro caso de estudo, denominado de Caso de Estudo 3, localiza-se também na freguesia do Pego. As paredes exteriores são em taipa, com 53 cm de espessura, bem como uma das paredes divisórias a meio da habitação. A entrada dá para um longo corredor que faz a distribuição para as divisórias da casa, culminando numa pequena divisória destinada à instalação sanitária. Na parte da frente da casa (Figura 3.20) encontra-se a sala, à direita, e dois quartos, à esquerda. Na parte de trás encontra-se um quarto, à direita, e a cozinha a esquerda onde existe uma porta de acesso ao quintal da casa.

A habitação tem um afastamento em relação à estrada dando lugar a um jardim dianteiro (Figura 3.21). No lado esquerdo desse jardim existe um pequeno anexo, normalmente localizado nas traseiras da habitação.

A fachada principal está orientada a sul onde existem duas janelas, uma para a sala outra para um dos quartos e não existe qualquer tipo de emolduramento, à excepção da cimalha pintada a azul. As ombreiras e vergas da porta, apesar de não apresentarem qualquer saliência em relação à fachada também são pintadas com cor azul, bem como a zona inferior da parede da fachada – sôco ou rodapé – que está mais susceptível aos salpicos da chuva e que, por isso, era executada em argamassa com propriedades mais hidrófugas que a restante argamassa do paramento exterior.

As fachadas são caiadas e a caixilharia de madeira. O pavimento de toda a habitação é todo constituído por argamassa e o tecto é também um tecto falso em madeira. O telhado de duas águas, tal como nos casos de estudo anteriores, assenta sobre uma estrutura de madeira e é revestido em telha cerâmica de canudo.

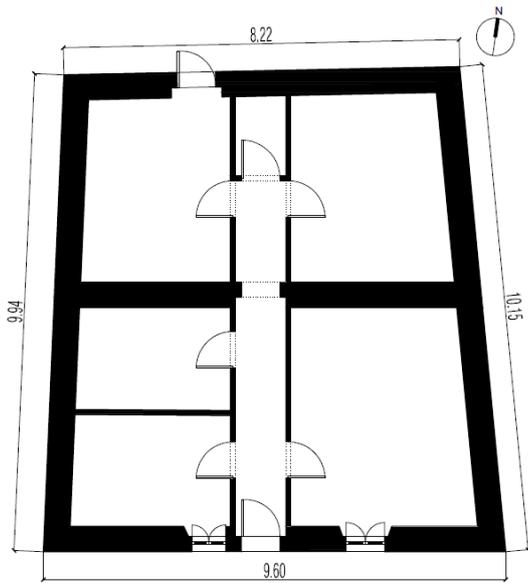


Figura 3.20 – Representação da planta do caso de estudo 3, Pego, Abrantes.

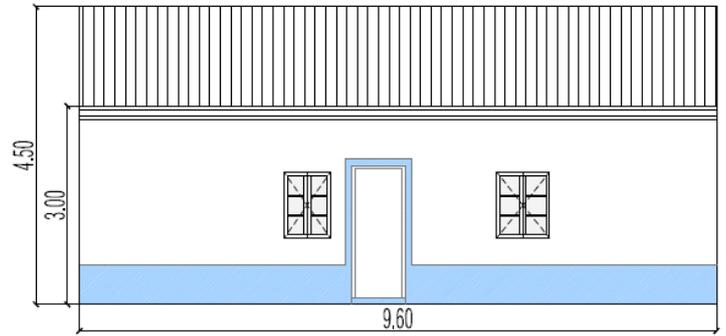


Figura 3.21 – Representação da fachada principal do caso de estudo 3.



Figura 3.22 – Fachada principal do caso de estudo 3 com vista do jardim e um pequeno anexo do lado esquerdo.

4. CAMPANHA EXPERIMENTAL DE MONITORIZAÇÃO TÉRMICA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo aborda a descrição da campanha experimental do trabalho de investigação desenvolvida. Inicialmente é referida a metodologia seguida no trabalho de campo, assim como, o equipamento requerido e o respectivo modo de utilização. Posteriormente são listados os dados recolhidos, efectuada a sua análise e apresentadas as conclusões mais relevantes.

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.2.1 PERÍODOS DE MONITORIZAÇÃO

Com o objectivo de estudar o comportamento térmico de construções em terra foram monitorizadas três edificações com paredes em taipa, designadas no presente estudo por CS1, CS2 e CS3, e localizadas na zona centro do país. Foram realizadas medições *in situ* do fluxo de calor, das temperaturas ambiente exterior e interior e das temperaturas superficiais na parede, da humidade relativa do ambiente e superficial e da radiação solar. De forma a possibilitar uma percepção geral do comportamento térmico das construções em estudo, realizaram-se duas campanhas experimentais nas situações extremas do clima, respeitantes aos períodos de Inverno e de Verão. Na Tabela 4.1 apresentam-se os períodos de monitorização. A duração total de cada uma das campanhas foi de 51 dias, 23 horas e 40 minutos a de Inverno e a de Verão de 40 dias, 1 hora e 20 minutos.

Tabela 4.1 – Períodos de monitorização.

		CS1	CS2	CS3
Inverno	Início	4 de Fevereiro, 12h20	12 de Fevereiro, 15h00	8 de Março, 14h10
	Fim	12 de Fevereiro, 10h30	8 de Março, 11h20	28 de Março, 12h00
	Duração	7 dias, 22 horas e 10 min.	23 dias, 20 horas e 20 min.	19 dias, 21 horas e 50 min.
Verão	Início	25 de Maio, 12h30	15 de Junho, 14h40	*N.A
	Fim	15 de Junho, 15h30	4 de Julho, 13h00	*N.A
	Duração	21 dias e 3 horas	18 dias, 22 horas e 20 min.	*N.A

* N.A – Não aplicável. Por indisponibilidade dos proprietários da habitação do CS3, não foi possível realizar a campanha de Verão.

Os períodos de monitorização, em cada caso de estudo, foram condicionados pela disponibilidade do equipamento de medição e da deslocação ao local e, ainda, pelo tempo mínimo necessário à obtenção de uma base de dados suficiente para uma caracterização adequada do comportamento térmico das situações analisadas.

A norma internacional, ISO 9869:1994, que descreve o processo para o cálculo da resistência térmica (R_t) e do coeficiente de transmissão térmica (U) através de medições *in situ*, recomenda o cumprimento de três especificações:

- numa situação de temperaturas consideradas estabilizadas, a duração mínima para realização do ensaio, deve ser de 72 horas (3 dias), caso contrário, deverá ser incrementado até sete dias;
- os valores devem ser obtidos de um modo contínuo, sem qualquer tipo de interrupção do processo;
- a recolha de dados deve ser efectuada por períodos de tempo regulares, estabelecidos em função do método utilizado para a análise dos dados. Normalmente, este intervalo é de 30

min a 1h para o método da média progressiva, podendo ser menor para o método dinâmico (ver subcapítulo 4.2.2).

Nas campanhas experimentais realizadas no âmbito do presente trabalho, nos três casos de estudo, foram consideradas as recomendações referidas. No início da aquisição dos dados, a 2 de Fevereiro, a casa do primeiro caso de estudo (CS1) encontrava-se com as portas abertas e, portanto, estava exposta a fortes correntes de ar e, assim, apenas se consideraram válidos os valores a partir de dia 4 de Fevereiro (Campanha de Inverno, CS1, Tabela 4.1), data a partir da qual o registo das temperaturas interiores indica estabilidade. Quanto à segunda especificação, refira-se que as interrupções de energia na região de Abrantes são frequentes, pelo que se registaram alguns períodos de interrupção na recolha de dados durante as campanhas.

Por forma a adquirir uma adequada base de dados para o cálculo dos valores de resistência térmica (R_t) e do coeficiente de transmissão térmica (U) foi registada uma extensa amostra de dados climáticos referentes aos ambientes exterior e interior (temperatura, radiação solar e humidade relativa), às temperaturas superficiais e aos fluxos de calor através da parede de alvenaria de Terra, e assim poder avaliar o comportamento térmico cíclico da construção ao longo dos dias e poder efectuar uma análise comparativa dos resultados, entres os três casos. Para tal foi adoptado, em todas as campanhas experimentais, uma taxa de aquisição de dados de 10 em 10 minutos (como se descreve em 4.2.1).

4.2.2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Nos três casos de estudo, os elementos construtivos admitidos para monitorização nas campanhas, foram as paredes exteriores construídas através da técnica tradicional de taipa. Como descrito no capítulo anterior, estas casas foram construídas, por volta de 1900, numa época em que as condições económicas eram adversas e eram aplicados na construção os materiais disponíveis no local. Assim, apesar do pressuposto que a construção em taipa é, normalmente, considerada homogénea, torna-se difícil *à priori* conhecer as propriedades das paredes.

No CS1, durante a campanha de Inverno, uma parte da camada de revestimento (argamassa de terra caiada) cedeu devido às fortes tempestades e rajadas de vento que se fizeram sentir. Na Figura 3.10 pode verificar-se que a constituição da parede não é homogénea, podendo ser identificadas zonas com uma maior quantidade de elementos de maior dimensão, como seixos e fragmentos de tijolo, e outras com uma maior presença de elementos finos (areias e argilas).

Apesar da heterogeneidade presente neste caso, dado que não foi possível alocar um maior número de equipamentos, apenas se admitiu o registo de dados num único ponto da parede. Complementarmente, utilizou-se um outro tipo de equipamento, o ISOMET 2114 utilizando a sonda de superfície, que permite a medição directa da condutibilidade térmica (λ) dos materiais, possibilitando assim a obtenção das características térmicas da parede. A condutibilidade térmica foi medida apenas do lado interior da parede de taipa.

Tendo em consideração a descrição dos casos de estudo no capítulo 3, pode-se assumir uma uniformidade nos elementos construtivos nos três casos de estudo. Os três casos de estudo apresentam:

- paredes exteriores: 2 cm de reboco (exterior), 50-55 cm de taipa, 0,5 cm de reboco (interior);

- cobertura: Estrutura em madeira revestida a telha cerâmica e com forro em contraplacado de madeira;
- janelas: caixilharia de madeira e vidro simples com portadas de madeira maciça;
- porta: madeira maciça com 4 cm de espessura.

Os casos de estudo foram escolhidos apenas com o critério de pertencerem à mesma localização geográfica (região de Abrantes) e que estes se encontrassem numa mesma condição de habitabilidade (os três casos encontram-se desabitados). A sua selecção teve como base contactos pessoais e a disponibilidade e abertura dos habitantes da região para disponibilizar o acesso às mesmas. Esta condicionante fez com que a orientação das fachadas e a localização das zonas de medição no pano da parede não fossem sempre as mesmas, nem por vezes as ideais.

Em cada caso, na selecção das fachadas a monitorizar foram considerados diversos aspectos: a orientação solar, os factores de sombreamento exteriores, o comprimento das sondas e a exposição das sondas a eventuais acções de vandalismo, entre outras. Sempre que possível, deu-se preferência à fachada orientada a Sul, por ser aquela que está, durante um período de tempo maior, exposta à radiação solar.

Para cada caso de estudo descreve-se o equipamento utilizado e identifica-se a localização das sondas e pontos de medição. Na monitorização dos distintos casos foram adquiridos os seguintes dados:

- temperatura do ambiente exterior (T_e);
- temperatura do ambiente interior (T_i);
- radiação global em plano vertical (R_d);
- humidade relativa exterior (H_{Re});
- humidade relativa interior (H_{Ri}).

Foram, ainda, efectuadas as medições na parede exterior seleccionada em cada caso de estudo dos seguintes parâmetros:

- temperatura superficial interior e exterior da parede de taipa (T_{si} , T_{se});
- temperatura superficial interior da cobertura (T_c);
- fluxo de calor interior e exterior da parede de taipa (F_i e F_e);
- humidade superficial da parede.

Adicionalmente, foram medidos no CS1 e CS3:

- temperatura superficial interior do envidraçado (T_v);
- fluxo de calor interior no pano envidraçado (F_v) apenas em CS1.

No CS2 foram registados:

- temperatura superficial interior da parede de taipa orientada a Norte (T_{sin}) apenas em CS2;
- fluxo de calor interior da parede de taipa orientada a Norte (F_{in}).

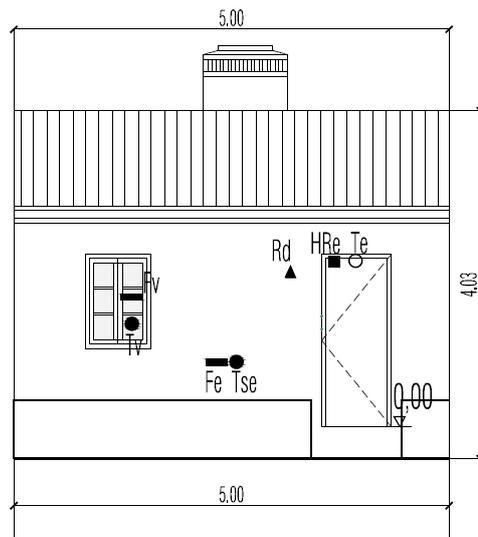
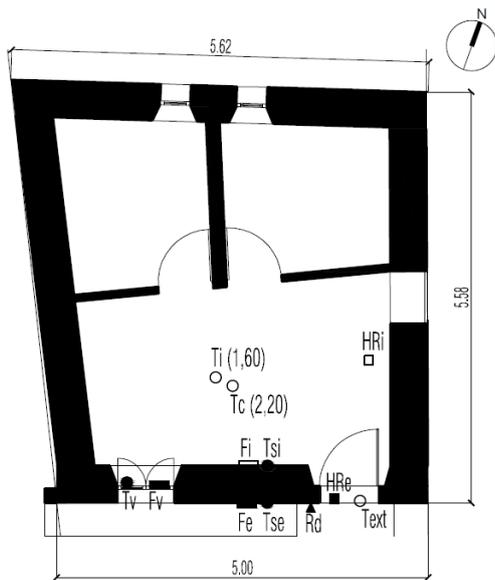
Para a medição destes parâmetros foi necessária a instalação de quatro tipos de sensores/sondas: sensores de temperatura (termopares e sensores de temperatura PTC), fluxímetros, piranómetros e termohigrómetros. Os termohigrómetros têm um sistema de aquisição de dados incorporado, enquanto as restantes sondas necessitam de ser conectadas a um sistema de aquisição de dados externo (*datalogger*). De seguida apresenta-se uma lista dos equipamentos utilizados, as suas características e o principal objectivo da sua utilização:

- **Sistema de aquisição de dados:** foi utilizado o *datalogger* NCE 2520-00 Network Control Engine da Metasys® com uma gama de medição temperatura de 0 °C a 50°C e de humidade relativa de 10% a 90%. O acesso ao equipamento para efeitos de monitorização e controlo pode ser efectuado de um modo remoto, via Internet. Permite descarregar os dados registados directamente a partir do *software*, sem que seja necessário estabelecer uma ligação física entre um computador e o dispositivo. O *datalogger* foi programado para efectuar medições com intervalos de tempo de 1 minuto e registar as médias desses valores de 10 em 10 minutos.
- **Conversores de sinal:** foram aplicados dispositivos, 4 DIGINORM 10R e 2 MC-10, para efectuarem a conversão dos sinais dos sensores que são baixo nível, da ordem dos micro-volt, em sinais padronizados, de 4 a 20mA, para serem captados pelo *datalogger*.
- **Sensores de temperatura:** dois tipos de sensores, termopares do Tipo T e sensores de temperatura PTC. Foram utilizados 3 termopares do Tipo T, com 0.2 mm de espessura, revestidos por isolamento eléctrico e soldados por descarga eléctrica, com erros estimados da ordem de $\pm 0.2^\circ\text{C}$ para temperaturas até 100°C e $\pm 0.5^\circ\text{C}$ para 400°C . Estes sensores, fabricados no DECivil-IST (Gomes, 2010), permitem a medição das temperaturas superficiais da parede (interior e exterior) e do envidraçado. Para a medição das temperaturas ambientes exterior e interior e da temperatura superficial da cobertura, foram utilizados 3 sensores de temperatura PTC (1000Ω a 20°C), de dimensões de $81 \times 81 \times 31$ mm, com uma gama de medida entre -50°C a 100°C e uma precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.
- **Fluxímetros:** foram disponibilizados para a campanha 3 fluxímetros. O Hukseflux HFP01 com sensor de termopilha e uma gama de medição entre -2000 e 2000 W/m^2 , foi utilizado na medição contínua do fluxo de calor na superfície interior da parede; os 2 fluxímetros adicionais foram aplicados na medição contínua dos fluxos de calor na superfície exterior da parede e na superfície interior do envidraçado. Relativamente a estes últimos dois fluxímetros adquiridos pelo DECivil, em 1986, não foi possível encontrar qualquer informação sobre os mesmos, tendo as suas constantes de calibração sido estimadas por comparação com os resultados do fluxímetro Hukseflux, quando sujeitas às mesmas condições.
- **Piranómetro:** recorreu-se a 1 piranómetro com células fotoeléctricas LI-COR LI-200SA, com um erro absoluto máximo estimado de 5%, um erro típico de 3% e erro de co-seno inferior a $\pm 5\%$, para ângulos de incidência inferiores a 80° . Este dispositivo foi utilizado na medição da radiação solar em plano vertical na fachada.
- **Termohigrómetros:** foram utilizados dois termohigrómetros para a medição da humidade relativa do ar, no interior e no exterior. O termohigrómetro Gemini Tinytag Plus 2 TGP-4500, aplicado no exterior é caracterizado por registar temperaturas numa gama entre -25°C e 85°C , apresentar um erro máximo de 0.9°C , e uma gama de humidade relativa entre 0 e 100%, com uma precisão de $\pm 3\%$ a 25°C . No interior, foi utilizado o termohigrómetro Rotronic HydroLog-D, com uma gama de temperatura entre -50°C e 200°C e de humidade relativa entre 0 e 100%, instalado no interior da habitação.
- **Sonda ISOMET 2114:** foi utilizado o equipamento ISOMET 2114 que permite, por um método transiente de imposição de um impulso térmico a medição: da condutibilidade térmica (λ) do material entre $0,015$ e $0,70 \text{ W/m.K}$, com um erro máximo de $5\% + 0.001 \text{ W/m.K}$ e, entre $0,70$ a $6,0 \text{ W/m.K}$, com um erro máximo de 10%; a difusividade térmica (α); o calor específico volumétrico (c_p) de $4,0 \times 10^4$ a $4,0 \times 10^6 \text{ J/m}^3.\text{K}$, com um erro máximo de $15\% + 1,10^3 \text{ J/m}^3.\text{K}$; e a temperatura entre -15°C e 50°C , com um erro máximo de 1°C .

a) Caso de Estudo 1

No primeiro caso de estudo a parede monitorizada foi a parede orientada a Sul que corresponde à fachada principal da habitação. Apesar do revestimento ter cedido durante o período de monitorização de Inverno, não interferiu directamente com o registo dos valores, uma vez que a zona monitorizada se encontra a cotas inferiores ao destacamento do revestimento.

A Figura 4.1 e a Figura 4.2 representam, de uma forma esquemática, a localização em planta e em alçado de todos os pontos de medição na fachada, durante as campanhas de Inverno e Verão, uma vez que os pontos de medição se mantiveram inalterados em ambas as campanhas. A Figura 4.4, por sua vez, apresenta alguns registos fotográficos dos sensores instalados.



- Legenda:
- Sensores de Temperatura PTC
 - Termopares
 - ▭ Fluxímetro (Hukseflux)
 - Fluxímetros
 - Termohigrómetro (Rotronic)
 - Termohigrómetro (TinyTag)
 - ▲ Piranómetro

Figura 4.1 – Planta do CS1 com a localização das sondas.

Figura 4.2 – Alçado Sul com a localização das sondas.



Figura 4.3 – Registos fotográficos da fachada orientada a Sul.



a



b



c



d



e



f

Figura 4.4 - Equipamentos instalados no caso de estudo 1: a. *Datalogger* com conversores de sinal; b. Gemini Tinytag Plus 2 TGP-4500; c. Rotronic HydroLog-D; d. Termopar Tipo T e Fluxímetro Hukseflux HFPO1 na superfície interior da parede (da esquerda para a direita); e. Sensor PTC na cobertura e temperatura ambiente (da esquerda para a direita); f. Prato termofluxímetro no envidraçado e superfície da parede exterior e termopar Tipo T na superfície do envidraçado; termopar Tipo T na superfície da parede; Piranómetro; Gemini Tinytag Plus 2 TGP-4500 e sensor PTC para a medição da temperatura ambiente exterior (da esquerda para a direita).

b) Caso de Estudo 2

No caso de estudo 2, CS2, a fachada orientada a Sul não corresponde à fachada principal da habitação. A fachada principal encontra-se orientada a Norte e a fachada Sul confina com um pátio nas traseiras da habitação. Para efeitos de sombreamento, a fachada Sul está bastante resguardada por duas árvores e por uma pala horizontal que, pela sua extensão, impede que a radiação solar incida directamente na fachada. Assim sendo, a temperatura ambiente exterior e, principalmente, a temperatura superficial da parede e envidraçado na fachada Sul, apresentariam valores bastante inferiores aos que seriam obtidos caso não houvesse qualquer barreira física. Consequentemente seria difícil a comparação com os dados obtidos nas fachadas Sul dos outros casos de estudo, onde não se verifica qualquer tipo de protecção solar.

Adicionalmente, um outro inconveniente relativo à não incidência directa de radiação solar na fachada, é avaliação da influência da inércia térmica da construção que, assim, não seria tão notória. Neste contexto, optou-se por monitorizar a fachada Oeste. Assim, da parte da tarde (12h-15h), na fachada orientada a poente, a radiação incidente é mais intensa que no período de manhã e o fluxo de calor das primeiras horas do dia é reduzido não alterando significativamente a temperatura ambiente interior da habitação.

Na monitorização do caso CS2 verificou-se ainda um problema relativo ao comprimento dos fios das sondas. Como a fachada Oeste não apresenta nenhuma abertura para o exterior, foi necessário recorrer à passagem dos fios através da janela da fachada Norte. Por este motivo, as sondas tiveram que ser colocadas próximas de uma das extremidades do pano da parede Oeste, o que, segundo a norma ISO 9869 (1994), não é muito aconselhável devido à existência de possíveis pontes térmicas.

O facto de ter sido feita a monitorização da fachada Oeste, numa zona adjacente à fachada Norte, possibilitou também a colocação de um fluxímetro, na face interior da parede de taipa com orientação Norte. A fachada Norte tem a particularidade de, comparativamente às restantes, não ter incidência directa de radiação solar ao longo do dia. Logo, foi possível analisar o comportamento térmico da parede de taipa orientada a Norte sem a influência da radiação solar. Refira-se ainda que o fluxímetro foi colocado na fachada Norte apenas durante a campanha de Inverno, pois não houve possibilidade para a sua instalação na campanha de Verão.

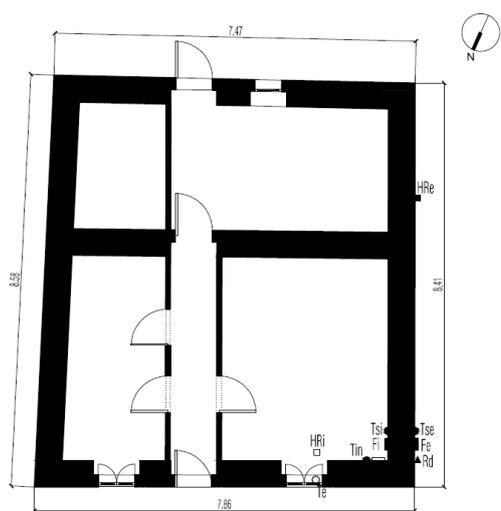


Figura 4.5 - Planta do CS2 com a localização das sondas.

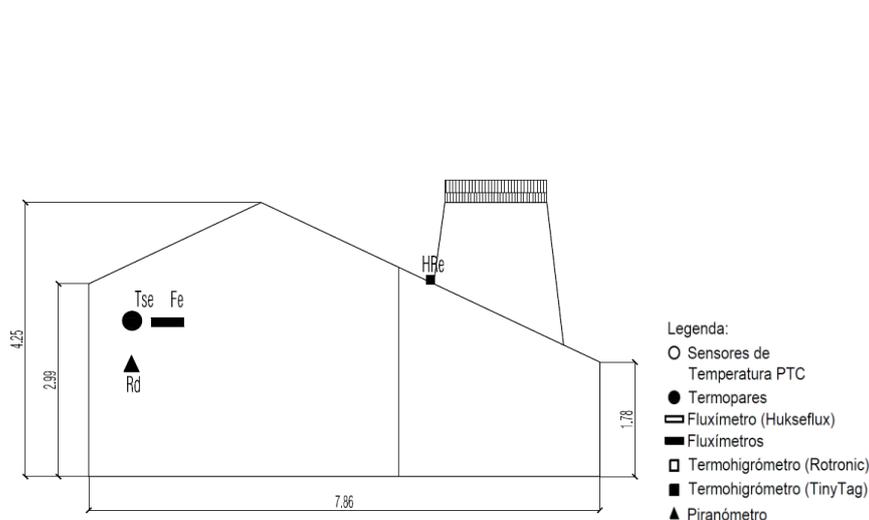


Figura 4.6 - Alçado Oeste com a localização das sondas.

As Figura 4.5 e Figura 4.6 representam de forma esquemática a localização, em planta e em alçado, dos pontos de medição na fachada durante as campanhas de Inverno e Verão, uma vez que os pontos de medição se mantiveram inalterados em ambas as campanhas. E a Figura 4.7 apresenta alguns registos fotográficos dos sensores instalados.



Figura 4.7 - Equipamentos instalados no caso de estudo 2: a. Fachada orientada a Norte com sensor PTC na exterior da janela (Te); b. Fachada orientada a Oeste com Piranómetro, Termopar Tipo T (Tse) e Fluxímetro exterior (Fe) e Gemini Tinytag Plus 2 TGP-4500 (da esquerda para a direita); c. Fachada orientada a Oeste com Piranómetro, Termopar Tipo T (Tse) e Fluxímetro exterior (Fe) (da esquerda para a direita); d. Termopar Tipo T (Tsi) e Fluxímetro (Fi) Hukseflux HFP01 na superfície interior da parede orientada a Oeste e Termopar Tipo T (Tsin) e Prato termofluxímetro (Fin) na fachada orientada a Norte (da esquerda para a direita).

c) Caso de Estudo 3

No terceiro e último caso de estudo (CS3), foi também possível monitorizar a fachada Sul que corresponde à fachada principal da habitação, tal como aconteceu no CS1.

A Figura 4.8 e a Figura 4.9 representam de forma esquemática a localização, em planta e em alçado, dos pontos de medição na fachada durante as campanhas de Inverno e Verão, uma vez que os pontos de medição se mantiveram inalterados em ambas as campanhas. A Figura 4.10 apresenta alguns registos fotográficos dos sensores instalados.

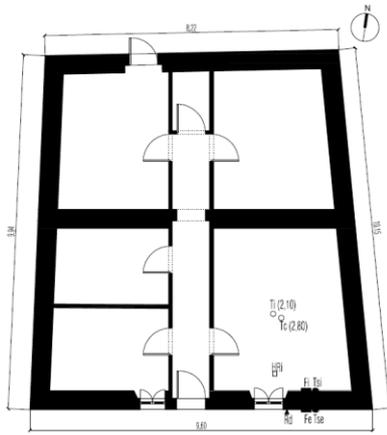


Figura 4.8 – Planta com a localização das sondas.

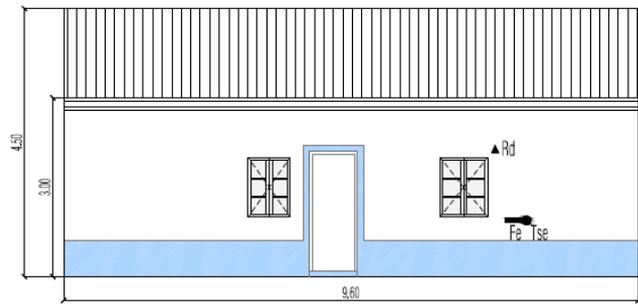


Figura 4.9 – Alçado Sul com a localização das sondas.

- Legenda:
- Sensores de Temperatura PTC
 - Termopares
 - ▭ Fluxímetro (Hukseflux)
 - ▬ Fluxímetros
 - Termohigrómetro (Rotronic)
 - Termohigrómetro (TinyTag)
 - ▲ Piranómetro



a



b



c



d

Figura 4.10 - Equipamentos instalados no caso de estudo 3: (a) Piranómetro (Rd) e Fluxímetro Hukseflux HFP01 (Fe), Termopar Tipo T (Tse) na superfície exterior da parede (da esquerda para a direita); (b) Piranómetro (Rd) e Prato termofluxímetro (Fe), Termopar Tipo T (Tse) na superfície exterior da parede (da esquerda para a direita); (c) Sonda PTC na cobertura (Tc), Rotronic HydroLog-D, Termopar Tipo T (Tsi) e Fluxímetro Hukseflux HFP01 (Fi) na superfície interior da parede (da esquerda para a direita); (d) Termopar Tipo T e Fluxímetro Hukseflux HFP01 na superfície interior da parede (da esquerda para a direita).

4.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este subcapítulo apresenta os resultados obtidos na campanha experimental e a sua análise e discussão.

A análise inicial foca o comportamento do fluxo de calor e da temperatura ambiente, em função das horas do dia e da radiação solar incidente. Esta análise, realizada para cada um dos casos de estudo, baseia-se na identificação dos dias em que se registaram as condições mais adversas em cada estação, denominados de Dias Tipo: o dia com temperatura média mais baixa, na campanha de Inverno; e o dia com temperatura média mais alta, na campanha de Verão. A posterior discussão dos dados realiza-se com base nos gráficos elaborados.

Numa segunda análise é determinado o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) das paredes de taipa a partir dos valores de condutibilidade térmica medidos *in situ* por um método transiente, em cada caso de estudo.

Por último, com base no cálculo da média dos fluxos de calor e das temperaturas ambiente e superficiais, utilizando o método da média progressiva da ISO 9869 (1994), calculou-se, ainda, o coeficiente de transmissão térmica. Este método revelou-se, no entanto, pouco adequado para os casos de estudo em análise.

4.3.1 ANÁLISE DE DADOS - OS DIAS TIPO

Como referido, as diferentes grandezas são medidas de minuto a minuto e registadas as suas médias em cada 10 minutos pelo sistema de aquisição (*data logger* NCE25). Na campanha de Inverno, foram recolhidos 86363 dados no total, repartidos do seguinte modo:

- **Caso de Estudo 1** – total de 13 704 dados (1142 dados em cada um dos 12 pontos de medição)
- **Caso de Estudo 2** – total de 41 100 dados (3425 dados em cada um dos 12 pontos de medição)
- **Caso de Estudo 3** – total de 31 559 dados (2869 dados em cada um dos 11 pontos de medição)

Relativamente à campanha de Verão, foram recolhidos 66225 dados:

- **Caso de Estudo 1** – total de 36228 dados (3019 dados em cada um dos 12 pontos de medição)
- **Caso de Estudo 2** – total de 29997 dados (2727 dados em cada um dos 11 pontos de medição)

Dada a extensa quantidade de informação adquirida, apenas são apresentados, ao longo deste subcapítulo, os dados necessários a uma adequada compreensão do comportamento térmico das paredes em taipa, nos dias designados de Dias Tipo. As Tabelas 4.2 a 4.4, apresentam os valores médios, máximos e mínimos de todos os parâmetros monitorizados ao longo das duas campanhas, registados nos casos de estudo 1, 2 e 3, respectivamente.

Nos Anexo I, Anexo II e Anexo III representam-se, graficamente, todos os valores de cada parâmetro medido relativos a cada campanha de monitorização para cada caso de estudo.

Tabela 4.2 – Valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros obtidos experimentalmente durante ambas as campanhas (Inverno e Verão) no caso de estudo 1.

Caso de Estudo 1		Inverno			Verão		
		Máx	Mín	Médio	Máx	Mín	Médio
Temperatura Ambiente [°C]	Te	23.37	0.37	10.00	32.30	8.72	16.76
	Ti	13.88	8.38	10.51	24.06	14.11	18.15
Temperatura Superficial da Parede [°C]	Tse	20.65	4.11	9.88	29.73	11.27	18.15
	Tsi	11.97	8.36	10.04	27.73	13.63	16.57
Temperatura Vidro [°C]	Tv	21.77	2.79	10.05	34.75	7.52	16.92
Temperatura Cobertura [°C]	Tc	15.16	6.51	10.13	27.25	13.41	18.51
Fluxo Exterior [W/m ²]	Fe	357.20	-71.12	36.96	292.10	-74.67	-7.01
Fluxo Interior [W/m ²]	Fi	17.97	-5.56	3.62	8.93	-25.61	-1.39
Fluxo Vidro [W/m ²]	Fv	234.28	-33.58	30.11	50.38	-19.29	-4.10
Radiação Solar [W/m ²]	Rd	1033.53	0	188.55	570.80	0	32.70
Humidade Relativa [%]	HRe	96.00	31.90	72.77	-	-	-
	HRi	82.44	65.56	72.83	76.44	36.69	61.35

Tabela 4.3 – Valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros obtidos experimentalmente durante ambas as campanhas (Inverno e Verão) no caso de estudo 2.

Caso de Estudo 2		Inverno			Verão		
		Máx	Mín	Médio	Máx	Mín	Médio
Temperatura Ambiente [°C]	Te	19.23	-0.65	9.96	41.66	12.52	23.08
	Ti	14.25	5.99	9.97	30.12	17.01	22.90
Temperatura Superficial da Parede [°C]	Tse	19.98	0.93	9.23	39.59	12.56	22.39
	Tsi	15.11	3.02	9.33	32.47	16.18	23.08
Temperatura Superficial da Parede Norte [°C]	Tin	14.64	4.51	9.69	28.84	16.77	22.92
Temperatura Cobertura [°C]	Tc	14.62	5.66	9.99	31.41	16.71	23.30
Fluxo Exterior [W/m ²]	Fe	398.88	-64.21	29.15	297.50	-104.09	12.46
Fluxo Interior [W/m ²]	Fi	23.64	-17.39	6.04	23.20	-19.74	-3.12
Fluxo Interior Parede Norte [W/m ²]	Fv	13.79	-8.31	0.67	-	-	-
Radiação Solar [W/m ²]	Rd	889.03	0	97.07	829.34	0	91.36
Humidade Relativa [%]	HRe	100	29.3	78.50	-	-	-
	HRi	92.25	79.31	86.76	77	45.5	67.81

Tabela 4.4 – Valores médios, máximos e mínimos dos parâmetros obtidos experimentalmente durante a campanha de Inverno no caso de estudo 3.

Caso de Estudo 3		Inverno		
		Máx	Mín	Médio
Temperatura Ambiente [°C]	Te	18.61	1.81	11.27
	Ti	14.28	9.25	11.89
Temperatura Superficial da Parede [°C]	Tse	26.69	3.91	12.10
	Tsi	13.48	9.50	11.79
Temperatura Superficial da Parede Norte [°C]	Tin	38.09	2.38	13.48
Temperatura Cobertura [°C]	Tc	14.58	7.48	11.59
Fluxo Exterior [W/m ²]	Fe	356.24	-66.73	22.97
Fluxo Interior [W/m ²]	Fi	12.27	-1.98	3.01
Radiação Solar [W/m ²]	Rd	757.46	0	96.46
Humidade Relativa [%]	HRe	100	21.10	79.72
	HRi	88.88	75.94	84.19

Da análise de dados das Tabelas 4.2 a 4.4 é possível avaliar de um modo aproximado quais as condições climáticas e consequente comportamento da construção. Contudo, os valores apresentados revelam-se ainda insuficientes para a obtenção de conclusões concretas e acertadas. Apenas com a análise de um ciclo diário completo, se podem apresentar conclusões mais sustentadas.

De seguida, é explicado o processo de identificação e análise dos Dias Tipo. Assim, definiu-se:

- **Dia Mais Frio (DF)**, o dia que apresenta o menor valor de temperatura média diária exterior (Te);
- **Dia Mais Quente (DQ)**, aquele que apresenta o maior valor de temperatura média diária exterior (Te);
- **Dia de menor Radiação (DmR)**, dia em que é registado o menor valor de radiação solar média diária (Rd);
- **Dia de Maior Radiação (DMR)**, dia relativo ao maior valor de radiação solar média diária (Rd).

Para a identificação dos Dias Tipo, foram calculados os seus valores médios diários. Para cada caso de estudo elaborou-se uma tabela (Tabelas 4.5, 4.6, 4.7, 4.11 e 4.12) com os resultados obtidos das médias diárias da Radiação Solar (Rd), da Temperatura Ambiente Exterior (Te) e Temperatura Ambiente Interior (Ti) para cada um dos casos de estudo. Embora, os valores de Ti não sejam necessários para a identificação dos dias Tipo, são também apresentados com o intuito de esclarecer a relação entre as temperaturas ambiente interior da construção (não habitada) e temperatura ambiente exterior e a radiação solar incidente. No Anexo IV são apresentados os resultados para os dias com maior radiação e menor radiação em ambas as campanhas de Verão e Inverno.

Os dados relativos aos Dias Tipos são apresentados em forma de gráfico representativos dos valores recolhidos durante as duas campanhas, em particular relativamente às grandezas de fluxo de calor, radiação solar e temperatura sendo, então, efectuada a sua análise.

Assim, para cada campanha de monitorização são apresentados três tipos de gráficos representativos:

- **Temperatura ambiente e radiação solar.** O gráfico representa a variação das temperaturas ambiente, exterior e interior, com a variação da radiação solar ao longo das 24h diárias do Dia Tipo. Com base no gráfico é possível avaliar a evolução da temperatura do ambiente interior ao longo do dia, considerando a variação da radiação solar incidente e da temperatura do ambiente exterior.
- **Fluxo de calor e radiação solar.** Representa a variação dos fluxos de calor, do lado interior e do lado exterior, da parede de taipa com a variação da radiação solar ao longo das 24h diárias do Dia Tipo. Através deste gráfico é possível compreender a variação dos fluxos de calor ao longo de um ciclo diário em função da radiação solar. Ao longo do trabalho considerou-se como sentido positivo o sentido do fluxo de calor do exterior para o interior e como sentido negativo o fluxo de calor do interior para o exterior.
- **Perfil horizontal de temperatura.** Representa, num corte transversal da parede de taipa, o perfil longitudinal de temperatura a partir das temperaturas ambiente (T_e e T_i) das temperaturas superficiais na parede (T_{se} e T_{si}) registadas em determinadas horas do dia. Com o objectivo de se poder caracterizar diferentes períodos do dia, definiram-se as seguintes horas-chave: 3h00, 8h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 20h00 e 23h00. A partir dos pontos representativos das quatro temperaturas, são traçadas três rectas com diferentes inclinações, que identificam a evolução das temperaturas na espessura da parede, desde o exterior até ao interior da habitação. O declive da recta entre, T_{se} e T_{si} , determina o sentido e a intensidade do fluxo de calor através do elemento construtivo. Quanto maior o valor do seu declive, maior é o fluxo de calor verificado entre os ambientes. Para declives próximos de zero, o fluxo é quase nulo. No caso de paredes de elevada inércia térmica, como as de taipa, pode acontecer que exista fluxo do interior da parede para os dois ambientes (exterior e interior), ou vice-versa. Nessas situações, é necessário efectuar análise dos declives das rectas definidas por T_e e T_{se} e por T_{si} e T_i .

Para uma melhor compreensão da análise de resultados, a apresentação de valores através de gráficos e a respectiva discussão foram organizados, de seguida, por campanha experimental.

4.3.1.1 CAMPANHA DE INVERNO

De seguida são apresentados os resultados obtidos na campanha experimental de Inverno e a realizada a análise do Dia Tipo identificado.

Tabela 4.5 – Valores médios diários da radiação solar e das temperaturas ambiente exterior e interior da campanha de Inverno do caso de estudo 1.

	Rd (W/m ²)	Te (°C)	Ti (°C)		
				Radiação Solar	Temperatura
				- RS	-T
					
				+RS	+T
04*	-	-	-		
05	242.98	12.94	11.69		
06	165.75	10.37	11.11		
07	258.60	10.43	10.68		
08	252.75	10.35	10.69		
09	251.34	9.71	10.59		
10	23.03	6.42	9.41		
11	146.47	7.89	9.45		
12*	-	-	-		

*Dias com descontinuidade na aquisição de dados

As Tabelas 4.5-4.7 listam os valores médios diários da radiação solar e das temperaturas ambiente exterior e interior, relativos à campanha de Inverno. Nos dias assinalados por * a aquisição de dados não se verificou de um modo contínuo ao longo das 24h diárias. Esta situação relaciona-se com o facto de ter coincido com os dias de montagem e desmontagem dos equipamentos, ou a uma momentânea falha de corrente eléctrica. Assim, estes dias não foram considerados na identificação dos Dias Tipo.

Da análise de dados da Tabela 4.5 observa-se que, ao longo do período de monitorização, quando a radiação solar (Rd) sofre uma grande alteração, o valor médio da temperatura ambiente exterior (Te) também é alterado. Observa-se uma queda da Te em 2°C, do dia 5 para o dia 6 e, uma maior queda, entre os dias 9 e 10 de Fevereiro. No entanto, a temperatura ambiente interior (Ti), apesar de registar igualmente uma diminuição de temperatura constante até o dia 10 de Fevereiro, não é tão vulnerável à radiação solar (Rd) pois, como a parede de taipa tem uma inércia térmica elevada e uma reduzida área de envidraçado, consegue manter-se relativamente estável ao longo dos dias.

Tabela 4.6 - Valores médios diários da radiação solar e das temperaturas ambiente exterior e interior da campanha de Inverno do caso de estudo 2.

	Rd [W/m ²]	Te (°C)	Ti (°C)
	12*	-	-
	13	165.38	12.94
	14	166.23	9.96
	15	158.70	8.89
	16	61.65	9.27
	17	16.34	10.40
	18	54.63	11.38
	19	70.23	10.08
	20	63.18	10.64
	21*	-	-
	22	60.95	10.75
	23	151.93	9.20
	24*	-	-
	25	181.78	6.43
	26	185.20	6.46
	27	42.41	4.40
	28	104.95	7.86
	01	178.33	6.60
	02	82.15	9.21
	03	18.09	10.17
	04	21.07	10.85
	05	50.99	13.28
	06	64.31	14.30
	07	89.05	15.19
	08*	-	-

Radiação Solar

- RS



+RS

Temperatura

-T



+T

*Dias com descontinuidade na aquisição de dados

Verifica-se que o efeito da inércia térmica se faz sentir ao longo de um ciclo diário; porém, esta conclusão poderá ser mais perceptível com base na recolha de dados relativa a vários ciclos contínuos. Por exemplo, avaliando os valores médios dos dias 5, 6 e 7 de Fevereiro da Tabela 4.5, nota-se que a radiação solar no dia 5 é bastante inferior à registada nos outros dias; no entanto, a média da temperatura ambiente exterior e interior (Te e Ti) não descem tanto como no dia 11 de Fevereiro. A elevada inércia térmica das paredes de taipa é ainda evidenciada pela diferença entre os valores médios da temperatura ambiente interior (Ti), verificada nos dias 10 e 11 de Fevereiro, apesar das médias da radiação solar (Rd) e da temperatura ambiente exterior (Te) serem superiores no dia 11 de Fevereiro.

Importa lembrar que os três casos de estudo não se encontram habitados, pelo que qualquer alteração das temperaturas ambiente interiores (Ti) se deve apenas às trocas de calor por condução, convecção e radiação com o exterior, através da envolvente opaca e envidraçada e da ventilação pelo telhado, janelas e porta que se encontravam em mau estado de conservação. No caso das habitações estarem habitadas e climatizadas a elevada inércia térmica iria, para além da atenuação das variações de temperatura, contribuir para a manutenção da temperatura de conforto no interior da habitação, mesmo após o sistema de climatização ser desligado.

Também no caso de estudo 2, a radiação solar média diária sofre grandes oscilações (Tabela 4.6). Enquanto no caso de estudo 1 (CS1) o valor máximo da radiação média diária foi de 258,60 W/m², no caso de estudo (CS2) foi bastante mais baixo, de 185,20 W/m². A razão principal para se terem registado valores mais baixos deve-se ao facto de se estar a monitorizar a parede Oeste e não a parede Sul como nos outros dois casos. Logo para essa parede Oeste espera-se uma maior intensidade de radiação solar incidente (Rd) apenas da parte da tarde, enquanto nos outros casos com fachada orientada a Sul, esta verifica-se num período de tempo mais alargado.

As temperaturas do ambiente exteriores registadas no CS2 são, por sua vez, superiores às registadas nos outros dois casos de estudo. O valor máximo de temperatura exterior (Te) média diária no CS2 foi de 15,30 °C, enquanto no CS1 e CS3 foi de 12,94 °C e 14,25 °C, respectivamente.

Verifica-se pela Tabela 4.6 que as temperaturas médias diárias exterior (Te) e da interior (Ti) têm uma evolução semelhante. Quando Te baixa a Ti também baixa e o contrário também se verifica. Por exemplo, de 25 de Fevereiro a 1 de Março, a Te registou valores muito baixos e no período seguinte, de 1 a 7 de Março, esta registou os valores mais elevados do período de monitorização, assim como a Ti. Contudo, a evolução e a relação entre os valores médios da Rd e de Te já não são tão evidentes, pois os dias mais frios foram os dias onde se registaram maior incidência de Rd e o dia mais quente não registou grande incidência de Rd.

Tabela 4.7 - Valores médios diários da radiação solar e das temperaturas ambiente exterior e interior da campanha de Inverno do caso de estudo 3.

	Rd [W/m ²]	Te (°C)	Ti (°C)
08*	-	-	-
09	110.66	12.07	12.71
10	78.80	11.06	12.32
11	102.01	10.92	12.16
12	95.49	10.67	12.01
13	205.26	7.80	10.87
14	204.63	9.22	10.59
15	192.81	10.91	11.24
16	49.91	11.18	11.78
17	28.30	11.45	11.85
18	119.05	9.77	11.13
19	16.14	7.94	10.72
20	159.94	11.35	10.86
21	130.64	12.50	11.64
22	137.32	12.93	12.38
23	35.73	10.68	11.94
24	108.77	11.59	11.79
25	21.62	13.05	12.36
26	25.05	14.25	13.20
27	69.54	13.84	13.39
28*	-	-	-

Radiação Solar

- RS



+RS

Temperatura

-T



+T

*Dias com descontinuidade na aquisição de dados

A Tabela 4.7 apresenta os valores médios diários da temperatura exterior e interior e de radiação solar incidente na fachada a sul do CS3 monitorizada. Da análise da Tabela 4.7, verifica-se que a radiação solar (Rd), na grande maioria dos dias, registou valores médios baixos, comparativamente aos outros dois casos de estudo, havendo quatro dias, dos dezanove monitorizados, com valores na gama mais reduzida, definida com cor branca. Relativamente à evolução da Te média diária verifica-se a existência de dois picos onde a temperatura atingiu valores médios muito baixos, dia 13 e dia 19, sendo que existe sempre uma evolução progressiva da média, seja para o valor mais baixo ou mais alto. Apenas do dia 19 para o dia 20, observa-se uma subida brusca na temperatura exterior pois a radiação solar também sofreu uma grande alteração no seu valor médio de um dia para outro.

Quanto à temperatura interior, esta manteve-se sempre entre os 10,59 °C e os 13,39 °C, mesmo tendo a Te baixado até aos 7,80 °C. Os valores médios mínimo e máximo da Ti dão-se, exactamente, um dia após os valores médios mínimo (13 de Fev.) e máximo (26 de Fev.) da Te, dias 14 e 27 de Fevereiro, respectivamente. Este fenómeno justifica-se pela inércia térmica das paredes, já referido nos casos de estudo anteriores.

Ao longo deste capítulo, o Dia Tipo é referido pela nomenclatura: Dia mais Frio – DF. Assim, pela análise das Tabela 4.5, Tabela 4.6 e Tabela 4.7 podem identificar-se os seguintes Dias Tipo:

- CS1 - 10 de Fevereiro de 2013;
- CS2 - 27 de Fevereiro de 2013;
- CS3 - 13 de Março de 2013.

Pontualmente, para efeitos de comparação, são referidos o dia de maior radiação (DMR) e dia de menor radiação (DmR), relativos aos dias:

- CS1 – 7 de Fevereiro de 2013 (DMR); 10 de Fevereiro de 2013 (DmR);
- CS2 – 26 de Fevereiro de 2013 (DMR); 17 de Fevereiro de 2013 (DmR);
- CS3 – 13 de Março de 2013 (DMR); 19 de Março de 2013 (DmR).

De seguida, pretende-se descrever os dias, definidos como o Dia mais Frio durante a campanha de Inverno, para cada um dos casos de estudo. Nas Figura 4.11 e Figura 4.12 comparam-se a radiação solar, a temperatura ambiente interior e a temperatura ambiente exterior no DF nos três casos de estudo.

Pela Figura 4.11 e a Figura 4.12 verifica-se que os casos de estudo foram expostos a temperaturas exteriores semelhantes (Figura 4.12.b), apesar da radiação solar incidente (Figura 4.11) apresentar valores bastante elevados, nomeadamente em CS3. A temperatura máxima exterior situou-se entre 12 °C e 14 °C e a mínima entre -1 °C e 3 °C. Por sua vez, as temperaturas interiores diferem ligeiramente de um caso para outro, sendo o CS2 aquele com temperatura interior mais reduzida, em oposição ao CS3 com temperatura interior mais elevada. No entanto, comum em todos os casos de estudo é a redução bastante significativa da amplitude térmica diária interior face à amplitude térmica diária da temperatura exterior. A amplitude térmica diária da temperatura exterior é de cerca de 14 °C, enquanto a amplitude térmica da temperatura interior foi inferior a 2 °C.

A Figura 4.11 mostra, ainda, que o valor máximo da radiação solar em CS2 foi registado mais tarde do que nos CS1 e CS2, uma vez que a fachada monitorizada no CS2 é orientada a Oeste, enquanto nos restantes casos, CS1 e CS3, a fachada monitorizada é orientada a Sul.

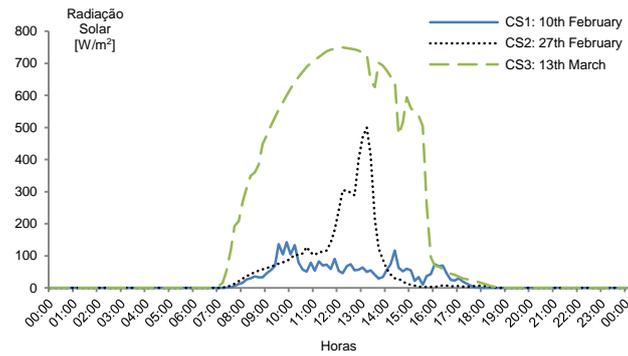


Figura 4.11 – Radiação solar incidente no plano vertical das fachadas registada no dia mais frio (DF).

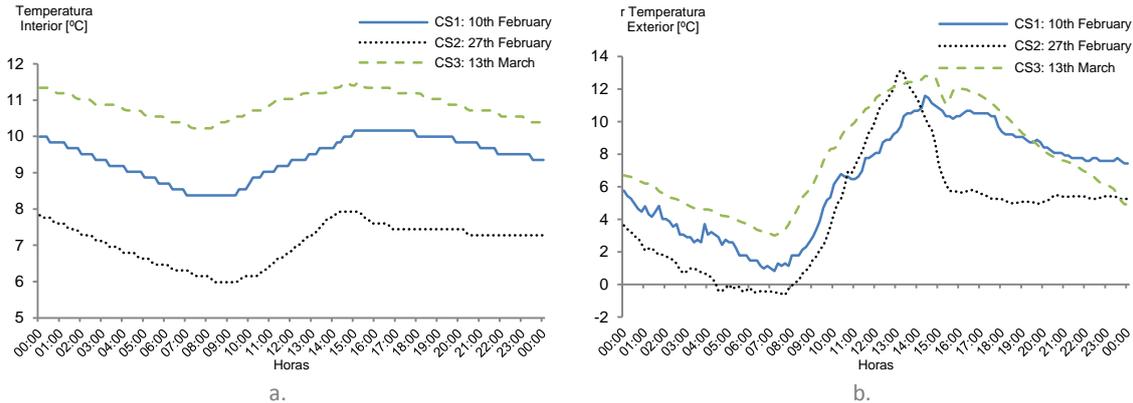


Figura 4.12 – Temperaturas no dia mais frio da campanha de Inverno. a. Temperatura interior; b. Temperatura exterior.

a) CS1 – 10 DE FEVEREIRO DE 2013

A Figura 4.13 apresenta as temperaturas ambiente exterior e interior e a intensidade da radiação solar. Pela análise da Figura 4.13, verifica-se que a temperatura ambiente exterior (T_e) registou um valor máximo de 11,6 °C, um mínimo de 0,82°C e uma média diária de 6,42 °C. Esta temperatura exterior, verificada no dia 10 de Fevereiro, quando comparada com as médias diárias dos outros dias, é consideravelmente mais baixa. No entanto, a temperatura interior (T_i) assinala um valor máximo de 10,16 °C, um mínimo de 8,38 °C e uma média de 9,41 °C. Estes valores da temperatura interior (T_i) situam-se muito abaixo do valor idealmente exigido como temperatura de conforto no Inverno (20 °C no RCCTE (2006) e de 18 °C no REH (2013)), no entanto, como a casa não está habitada (não se contabilizam os ganhos internos da habitação nem aparelhos de climatização) não é possível fazer uma comparação realista entre a situação regulamentar e o caso de estudo.

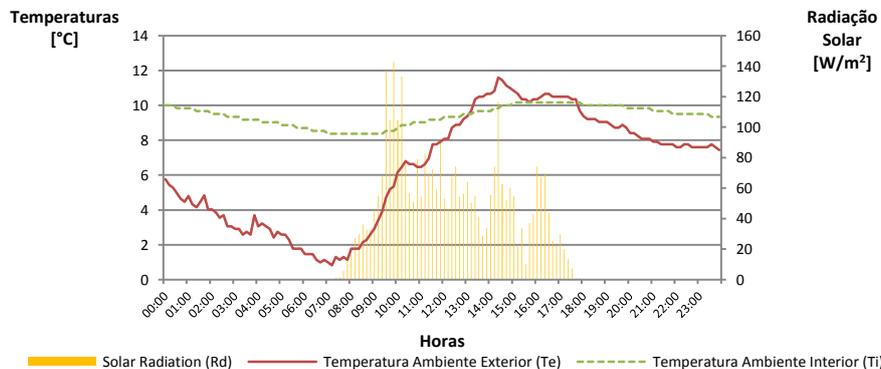


Figura 4.13 – Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior no dia 10 de Fevereiro de 2013 no dia mais frio (DF) no CS1.

Apesar de se verificar que durante o dia a temperatura exterior (Te) admite uma grande amplitude térmica, de aproximadamente 11 °C, a temperatura interior (Ti) mantém-se contudo relativamente estável, com uma amplitude térmica de apenas 1,8 °C (quase 6 vezes inferior). A sua justificação assenta na elevada inércia térmica da construção em terra que armazena calor nas suas espessas paredes de terra, de cerca de 0,50 a 0,55 m de espessura, libertando-o mais tarde, e assim, consegue manter a temperatura interior (Ti) relativamente constante apesar das oscilações da temperatura exterior (Te).

Tabela 4.8 – Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 10 de Fevereiro de 2013 (DF) no CS1. Hora dos valores máximos e mínimos e atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS1	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo (°C)	Hora	Atraso
Te	11,60 (°C)	14h20	-	0,82 (°C)	7h00	-
Ti	10,16 (°C)	15h00	0h40	8,38 (°C)	7h00	0
Rd	142,83 (W/m ²)	9h50	-	-	-	-
Fe	67,64 (W/m ²)	14h20	-	-67,21 (W/m ²)	3h00	-
Fi	6,03 (W/m ²)	7h00	16h40	-7,58 (W/m ²)	16h40	13h40

A elevada inércia térmica das construções em terra explica ainda o atraso das temperaturas máximas e mínimas do ambiente interior relativamente às temperaturas máximas e mínimas do ambiente exterior. De facto, apesar de se verificar que durante o dia a temperatura exterior (Te) admite uma grande amplitude térmica, de aproximadamente 11 °C, a temperatura interior (Ti) mantém-se contudo relativamente estável, com uma amplitude térmica de apenas 1,8 °C (quase 6 vezes inferior). A sua justificação assenta na elevada inércia térmica da construção em terra que armazena calor nas suas espessas paredes de terra, de cerca de 0,50 a 0,55 m de espessura, libertando-o mais tarde, e assim, consegue manter a temperatura interior (Ti) relativamente constante apesar das oscilações da temperatura exterior (Te).

Tabela 4.8 identifica-se um máximo da temperatura exterior (Te), às 14h20, hora a partir da qual a temperatura exterior começa a baixar, enquanto o máximo da temperatura interior (Ti), se verifica apenas às 15h00 e se prolonga até às 17h50, momento a partir do qual a temperatura interior (Ti) começa a reduzir. Relativamente à temperatura mínima, no caso da temperatura exterior (Te), foi registada às 7h10, aproximadamente à mesma hora em que se registou o nascer do Sol (7h00); por sua vez, a temperatura interior (Ti) mínima registou-se no intervalo entre as 7h00 e as 9h30. Este faz com que a temperatura interior (Ti) nunca atinja picos extremos e que a amplitude térmica interior seja bastante reduzida.

Pode, ainda, concluir-se que o dia 10 de Fevereiro corresponde a um dia de reduzida incidência da radiação solar, sendo esta predominantemente difusa, característica de condições de céu nublado, apresentando aberturas pontuais, tendo-se verificado o valor máximo de 142,83 W/m² às 9h50. A radiação solar não teve assim grande influência na alteração das temperaturas ambiente e superficial exterior.

A Figura 4.14 apresenta os fluxos de calor nas superfícies exterior e interior da parede e a intensidade da radiação solar no DF (Figura 4.14.a.) e no DMR (Figura 4.14.b.). Verifica-se que o fluxo exterior tem, na grande maioria das horas diárias, sentido negativo, ou seja do interior para o exterior.

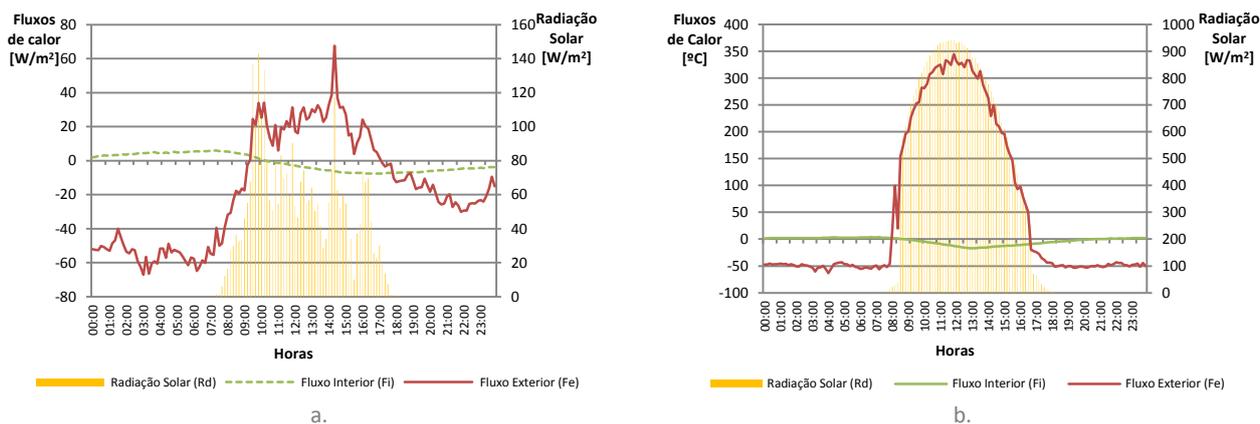


Figura 4.14 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior no CS1: a. no dia 10 de Fevereiro de 2013, dia mais frio (DF); b. no dia 7 de Fevereiro de 2013, dia de maior radiação (DMR).

No dia mais frio (DF) o incremento do fluxo de calor regista-se a par da radiação solar, observando-se os valores de “pico” nas horas em que a radiação aumenta repentinamente, associadas às “abertas” referidas. Tal como acontece com a temperatura interior (T_i) em relação à temperatura exterior (T_e), também o fluxo interior (Fi) começa a aumentar com um atraso relativamente ao fluxo exterior (Fe). Enquanto o valor máximo do fluxo exterior (Fe), se registou às 14h20, no valor de $67,64 \text{ W/m}^2$, o valor máximo do fluxo interior (Fi) de $6,03 \text{ W/m}^2$ registou-se às 7h00, verificando assim um atraso bastante significativo.

No dia com maior radiação (DMR) o valor do fluxo exterior atingiu valores de cerca de 350 W/m^2 enquanto o fluxo interior de $3,92 \text{ W/m}^2$. Esta grande diferença de valores entre o DF e o DMR pode ser explicado pela maior incidência de radiação solar. O Anexo IV apresenta os valores completos do DMR.

Da análise da Figura 4.14.a., verifica-se que o fluxo exterior (Fe) é negativo, no intervalo de tempo entre as 00h00 e as 9h20 e, posteriormente, a partir das 17h00 até ao final do dia. Portanto, apenas ao longo de 7h40, do dia em análise, se verifica uma transferência de calor no sentido do exterior para o interior, através da parede. Já o fluxo interior (Fi) apresenta um sinal negativo, apenas entre as 10h20 e as 24h00, facto que novamente, está relacionado com a elevada inércia térmica da parede. Como se observa na Tabela 4.8, em relação aos parâmetros do DF, o atraso entre os valores máximos do fluxo interior é de 16h40 e o intervalo registado entre os valores mínimos é de 13h40.

Efectivamente, nas construções com uma elevada inércia térmica, pode observar-se a situação em que o sentido do fluxo se verifica no sentido desde o interior da parede para ambos os ambientes, devido à libertação do calor armazenado na massa da parede. Esta situação é ilustrada na Figura 4.15 em que a evolução das temperaturas na secção da parede, T_e , T_{se} , T_{si} e T_i , facilita a compreensão do sentido do fluxo de calor.

Observando de um modo correlacionando os gráficos da Figura 4.13 e Figura 4.14 verifica-se que a evolução do gráfico do fluxo interior (Fi) acompanha a evolução do gráfico da temperatura interior (T_i). A par do incremento do fluxo interior (Fi) a temperatura interior (T_i) diminui, atingindo o seu valor mínimo às 7h00, instante que coincide com a hora de registo do valor máximo do fluxo interior (Fi). Por sua vez, à medida que o fluxo interior (Fi) diminui, a temperatura interior (T_i) aumenta, atingindo o valor máximo às 15h00 (mantendo-se aproximadamente constante até às 17h50) enquanto o fluxo interior (Fi) mínimo foi registado às 16h40.

Comparando a evolução da temperatura exterior (T_e) e do fluxo exterior (Fe), verifica-se que o comportamento é completamente distinto do anterior, uma vez que a temperatura exterior (T_e) tem

uma variação muito maior que a temperatura interior (Ti). Verifica-se, ainda, que à medida que aumenta a temperatura exterior (Te), o fluxo exterior (Fe) incrementa (considerando ainda que existe radiação solar directa a incidir sobre a parede), e quando a temperatura exterior (Te) diminui também o fluxo exterior (Fe) se reduz.

A Figura 4.15 apresenta o perfil horizontal das temperaturas a diferentes horas do dia. Para a análise da Figura 4.15 importa referir que o sentido positivo do fluxo, definido anteriormente na análise da Figura 4.14, corresponde ao declive negativo da recta (com valores de temperatura crescentes da esquerda para a direita). O sentido negativo do fluxo corresponde ao declive positivo da recta (com valores de temperatura decrescentes da esquerda para a direita).

Pela análise da Figura 4.15 verifica-se através do declive das rectas que, em nenhuma das horas do dia representadas no gráfico, o fluxo de calor tem o mesmo sentido desde o ambiente exterior até o ambiente interior.

De um modo geral, as temperaturas mais reduzidas foram registadas às 8h00, com excepção da temperatura superficial interior (Tsi), em que o valor mais reduzido se registou às 16h00. No entanto, é igualmente às 16h00 que se regista o valor mais elevado da temperatura interior (Ti). A diferença de temperatura entre Ti e Tsi, que é superior à registada para as restantes horas, justifica o valor mínimo do Fi às 16h00 (sentido do interior da habitação para o interior da parede). Em oposição, entre as 3h00 e as 8h00, observa-se que o declive das rectas entre a temperatura superficial interior (Tsi) e a temperatura interior (Ti) é bastante elevado, justificando o valor máximo do fluxo interior (Fi) nesse intervalo de tempo.

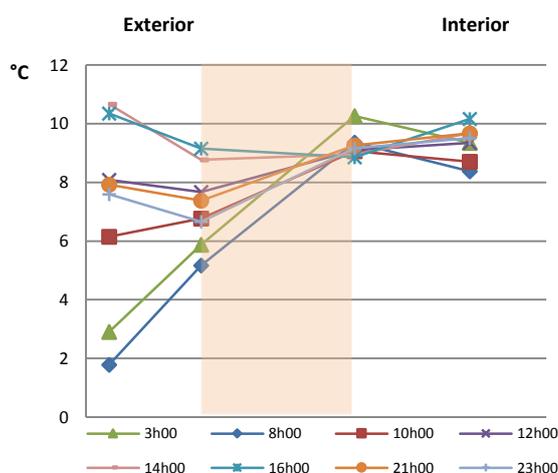


Figura 4.15 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DF no CS1.

Verifica-se ainda que os declives mais acentuados no interior da parede registam-se nas horas em que existe uma maior discrepância entre a temperatura interior (Ti) e a temperatura exterior (Te), por exemplo às 3h00 e às 8h00. Já nas horas de maior calor, 14h00 e 16h00, os declives das rectas são mais suaves, sendo que os declives no interior da parede são aproximadamente nulos, pois as temperaturas superficiais interior e exterior (T_{si} e T_{se}) têm valores muito próximos. Quando a recta é quase horizontal, o fluxo de calor tende para zero, no entanto, como se referiu anteriormente devido à forte inércia térmica e observando os valores das temperaturas ambiente exterior e interior (T_e e T_i) e os

declives das rectas Te-Tse e Tsi-Ti, no intervalo de tempo das 14h00 às 16h00, conclui-se que o fluxo tem sentido positivo em Te-Tse e sentido negativo em Tsi-Ti.

Observando a Figura 4.14 e a Figura 4.15 em simultâneo, verifica-se que a maioria dos valores estão em concordância, os fluxos medidos pelos fluxímetros correspondem aos declives das rectas dadas pelas diferenças de temperaturas. Verifica-se uma excepção às 10h, em que o fluxo na Figura 4.14 é positivo, enquanto que na Figura 4.15, o declive positivo da recta indica que o fluxo deveria ser negativo. Esta discordância de valores deve-se à incidência da radiação solar directamente sobre o fluxímetro, o que provoca um aquecimento muito mais rápido e, conseqüentemente, uma subida repentina do fluxo de calor. Logo, na Figura 4.15, como o declive é dado apenas pela temperatura ambiente exterior, conduz a que o fluxo observado a partir dos declives da recta seja diferente dos valores apresentados na Figura 4.14.

Importa ainda salientar que, partindo da análise do gráfico dos fluxos da Figura 4.14 e da evolução da temperatura superficial interior (Tsi) e da temperatura interior (Ti) da Figura 4.15, se pode concluir que o fluxo interior (Fi) tem pouca influência na variação da temperatura interior (Ti). A temperatura interior (Ti) varia, sobretudo, devido às trocas de calor através dos restantes elementos da envolvente: cobertura, porta e janela. Observando o comportamento da temperatura superficial interior (Tsi), verifica-se que o seu valor mantém-se próximo dos 9 °C, à excepção do valor registado as 3h00 (perto dos 10 °C), enquanto a temperatura interior (Ti) varia entre os 8,38 °C e os 10,16 °C. Como a superfície da parede se mantém sempre com temperaturas próximas, significa que o fluxo interior (Fi) varia quando a temperatura interior (Ti) também varia.

b) CS2 - 27 DE FEVEREIRO DE 2013

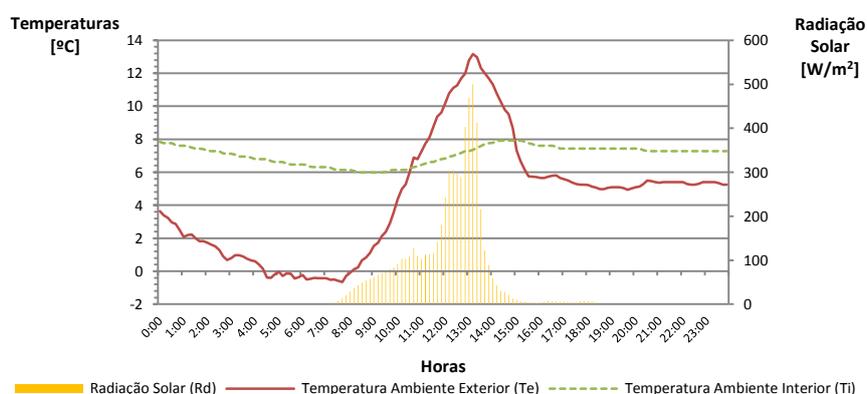


Figura 4.16 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior no dia 27 de Fevereiro de 2013 (DF) no CS2.

Tabela 4.9 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 27 de Fevereiro de 2013 no dia mais frio (DF) no CS2. Hora dos valores máximos e mínimos e atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS2	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo	Hora	Atraso
Te	13,15 (°C)	13h10	-	-0,65 (°C)	7h40	-
Ti	7,92 (°C)	14h20	1h10	5,98 (°C)	8h20	0h40
Rd	499,54 (W/m ²)	13h10	-	-	-	-
Fe	243,17 (W/m ²)	13h10	-	-42,62 (W/m ²)	1h30	-
Fi	-2,86 (W/m ²)	00h00	10h50	-22,88 (W/m ²)	12h00	10h30

A Figura 4.16 apresenta as temperaturas ambiente exterior e interior e a intensidade da radiação solar. No caso de estudo 2 (CS2), o Dia mais Frio registou um valor máximo da T_e 13,15 °C, um valor mínimo de -0,65 °C, correspondendo a um valor médio de 4,40 °C (Tabela 4.6 e Tabela 4.9). Este valor médio da temperatura exterior (T_e) é bastante reduzido quando comparado com os restantes dias e, até mesmo, com os outros casos de estudo. Quanto aos valores da temperatura interior (T_i), registaram-se um valor máximo de 7,92 °C, um valor mínimo de 5,98 °C e um valor médio de 7,06 °C. Mais uma vez, observou-se que, apesar da temperatura exterior apresentar uma grande amplitude térmica (de 12,5 °C), a temperatura interior tem uma amplitude bem mais reduzida (de apenas 1,94 °C).

O atraso dos valores extremos da temperatura interior relativamente aos da temperatura exterior é pouco significativo. O valor máximo de T_i é atingido apenas com 1h10 de atraso, das 14h20 às 15h10. O valor mínimo é atingido com 40 minutos de atraso, prolongando-se até às 9h20, hora em que o interior começa novamente a aquecer devido a incidência de radiação solar. Como verificado no caso de estudo 1 (CS1), no DF (Figura 4.13), a variação da temperatura interior (T_i) está também muito dependente das trocas de calor através dos vãos envidraçados, portas e pela cobertura.

Adicionalmente, a incidência de radiação solar também não foi muito intensa, tendo registado um valor médio de 42,41 W/m². Verifica-se um “pico” de incidência da radiação solar (R_d) entre as 13h00 e as 14h00, no entanto, na altura em que se esperava maior intensidade, a partir das 16h00 até ao pôr-do-sol, o valor da radiação solar é quase nulo, o que revela ter sido um dia bastante encoberto. Através dos dados climáticos da estação meteorológica de Abrantes foi possível também verificar que a partir das 14h43 se registou queda de precipitação até ao final do dia justificando assim os valores reduzidos da radiação solar.

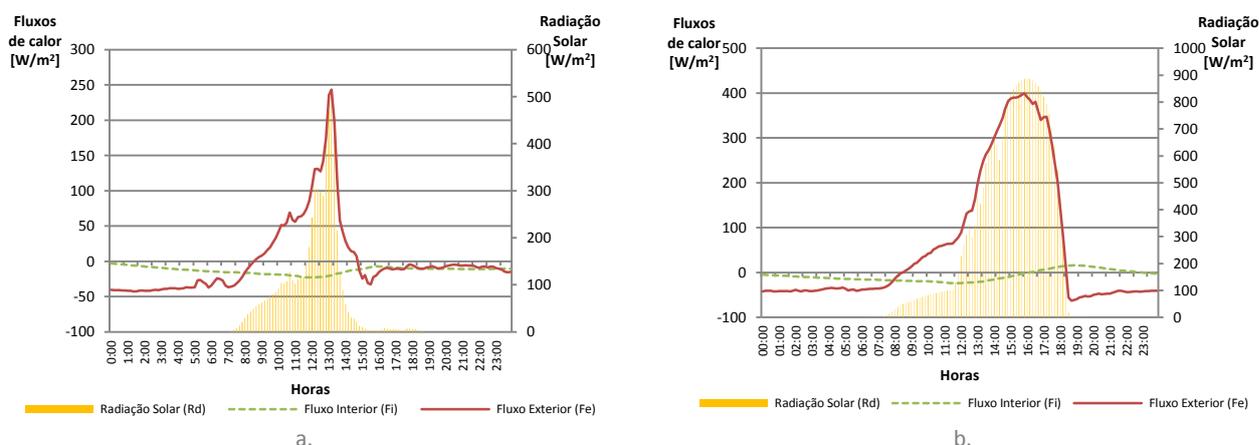


Figura 4.17 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior no CS2: a. no dia 27 de Fevereiro de 2013 dia mais frio (DF); b. no dia 26 de Fevereiro, dia maior radiação (DMR).

A Figura 4.17 apresenta o gráfico do fluxo de calor nas superfícies exterior e interior da parede e a intensidade da radiação solar. No dia mais frio (DF), os fluxos têm um sentido maioritariamente negativo (no sentido do interior para o exterior da habitação). Apenas quando se regista radiação solar é que o fluxo exterior regista valores positivos. Porém, mesmo havendo radiação, se esta tiver uma intensidade baixa, não é suficiente para que o fluxo seja positivo, pois a temperatura exterior (T_e) tem valores muito reduzidos. O fluxo exterior (F_e) registou neste Dia Tipo (DF) um valor máximo de 243,17 W/m² às 13h10 e um valor mínimo de -42,62 W/m² às 1h30 (Tabela 4.9). O fluxo interior (F_i) apresentou sempre sentido negativo, o que significa que a temperatura interior (T_i) é sempre superior à temperatura superficial interior (T_{si}). Quer isto dizer que a quantidade de calor absorvida pela parede não chega nunca a ser transferido para o interior e que a inércia térmica da habitação é elevada, pois, mesmo que a temperatura exterior tenha descido abaixo dos 0 °C a T_i manteve-se sempre constante. F_i registou um

valor máximo de $-2,86 \text{ W/m}^2$ às 00h00, e um valor mínimo de $-22,88 \text{ W/m}^2$ às 12h00, ou seja, com um atraso de 10h50 e 10h30 respectivamente. Observando a Figura 4.18, consegue-se ter uma melhor percepção das temperaturas T_e , T_{se} , T_{si} e T_i , complementando assim a análise da Figura 4.17.

Ao analisar a Figura 4.17 e ao comparar-se com os gráficos da Figura 4.13 e Figura 4.14 do caso de estudo 1, verifica-se que o fluxo de calor tem um comportamento diferente dos outros dois casos. O fluxo interior no CS1 acompanha a evolução da temperatura interior mas com sinal oposto, sendo que aumenta o seu valor quando T_i diminuiu e vice-versa, significando que a T_i varia sobretudo através das trocas pelos elementos envolventes com excepção das paredes. Neste caso, o fluxo interior (F_i) vai diminuindo à medida que a temperatura interior também diminui e atingem os seus valores mínimos às 12h00 e às 8h20, respectivamente. Logo, a diferença entre as temperaturas T_{si} e T_i está sempre a aumentar até às 12h.

No dia de maior radiação (Figura 4.17.b.), por sua vez, o F_e registou um valor máximo próximo dos 400 W/m^2 e o F_i de 16 W/m^2 (Anexo IV). Assim como no CS1, pode concluir-se que a radiação incidente influencia fortemente os valores do fluxo exterior.

Na Figura 4.18 pode observar-se com maior precisão a evolução das temperaturas ao longo das horas representadas.

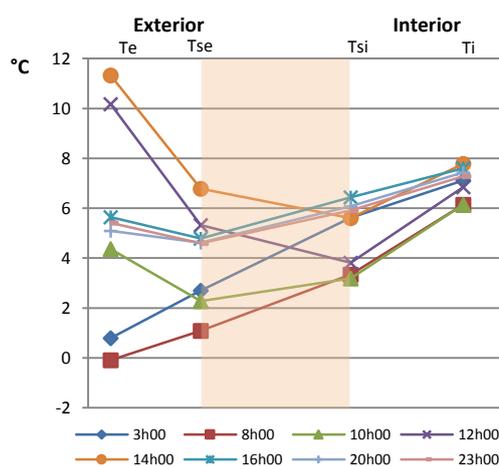


Figura 4.18 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 no DF, na campanha de Inverno, no CS 2.

A Figura 4.18 apresenta o perfil horizontal das temperaturas registadas ao longo do dia DF no CS2. Como verificado na Figura 4.17, o fluxo interior é sempre negativo, tendo maior intensidade entre as 8h e as 14h, o que também se confirma na Figura 4.18. As horas durante as quais o declive da recta é mais acentuado entre T_{si} e T_i são às 8h00, 10h00 e 12h00.

Neste caso, ao contrário do que se verificou no caso de estudo 1, T_{si} apresenta uma amplitude considerável, entre os $3 \text{ }^\circ\text{C}$ e os $7 \text{ }^\circ\text{C}$, aproximadamente. As horas em que se regista menor temperatura para a T_{si} correspondem às horas de maior declive das rectas T_{si} e T_i , 8h00, 10h00 e 12h00. Às 12h00 verifica-se que T_{si} , comparando com as 8h00 e 10h00, regista uma temperatura ligeiramente superior, porém o que contribui para o aumento do fluxo de calor interior nessa hora é o aumento de T_i .

Observando também os declives das rectas T_{se} - T_{si} , estes são na sua maioria positivos com a excepção das rectas das 12h00 e 14h00. Em geral, as temperaturas superficiais exterior e interior estão sempre próximas, com a excepção das 3h00, em que no exterior já arrefeceu bastante, a T_{se} ronda os $2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e

T_{si} mantêm-se perto dos 8 °C. Posteriormente, entre as 3h00 e as 8h00, a T_{si} diminui bastante o seu valor, voltando novamente a atingir um valor semelhante apenas às 16h00.

Existem duas horas, 8h00 e 10h00, em que o fluxo de calor tem um só sentido, do interior para o exterior, observando um declive maior entre T_i-T_{si}. Nas restantes, o fluxo é bidireccional, migra desde os ambientes exterior e interior para a parede, onde o calor está a ser absorvido.

Comparando o gráfico dos perfis horizontais das temperaturas (Figura 4.18) com o gráfico dos fluxos de calor (Figura 4.17), verifica-se que o valor de F_i está coerente com o declive das rectas T_{si}-T_i. Por sua vez, F_e apresenta valor negativo apenas às 3h00 e 8h00 na Figura 4.18, enquanto na Figura 4.17, às 16h00, 20h00 e 23h00, F_e também é negativo. Tal facto pode ser devido à temperatura superficial do fluxímetro ser inferior à temperatura ambiente registada, como se verificou no caso anterior.

c) CS3 – 13 DE MARÇO DE 2013

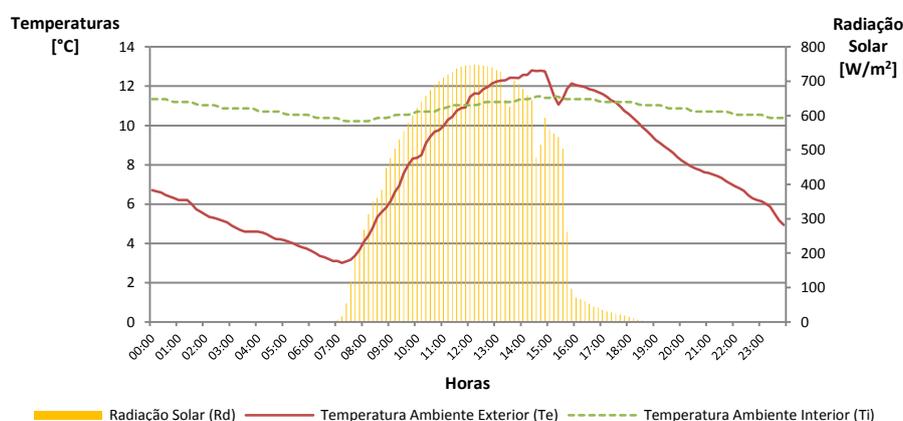


Figura 4.19 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior no dia 13 de Março de 2013, no dia mais frio (DF) no CS3.

Tabela 4.10 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior no dia 13 de Março de 2013 (DF) no CS3. Hora dos valores máximos e mínimos e atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS3	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo	Hora	Atraso
Te	12,80 (°C)	14h20	-	3,00 (°C)	7h10	-
Ti	11,49 (°C)	14h40	0h20	10,23 (°C)	7h20	0h10
Rd	749,52 (W/m ²)	12h10	-	-	-	-
Fe	268,86 (W/m ²)	13h40	-	-49,02 (W/m ²)	6h30	-
Fi	1,45 (W/m ²)	4h40	15h00	-6,25 (W/m ²)	14h20	7h50

A Figura 4.19 apresenta as temperaturas ambiente exterior e interior e a intensidade da radiação solar. Verifica-se, mais uma vez, uma grande amplitude térmica na Te e uma pequena amplitude em Ti. Enquanto a Te regista um valor máximo de 12,80 °C às 14h20, um valor mínimo de 3,00 °C às 7h10 e um valor médio de 7,80 °C; a Ti regista um valor máximo de 11,49 às 14h40, um valor mínimo de 10,23 °C e um valor médio de 10,87 °C. Estes valores traduzem-se numa amplitude térmica de 9,8 °C e de 1,26 °C para as temperaturas ambientes exterior e interior, respectivamente.

Pela Figura 4.19, observa-se que a T_e é superior a T_i durante apenas 5h40, das 11h30 as 17h10. Neste caso, o atraso registado não é acentuado, sendo de apenas 20 minutos para os valores máximos e de 10 minutos para os valores mínimos. Por sua vez, o atraso das temperaturas máximas relativamente ao valor máximo da radiação solar é de 2h10 para T_e e de 2h30 para T_i .

Através da evolução da radiação solar, pode concluir-se que o DF foi um dia estável, com uma grande intensidade de radiação. Registaram-se apenas dois momentos com valores inconstantes, por volta das 13h/13h30 e depois às 14h/14h30, que podem ser justificados pelo aparecimento de nuvens. Porém, em geral, foi um dia de céu limpo e temperatura baixa.

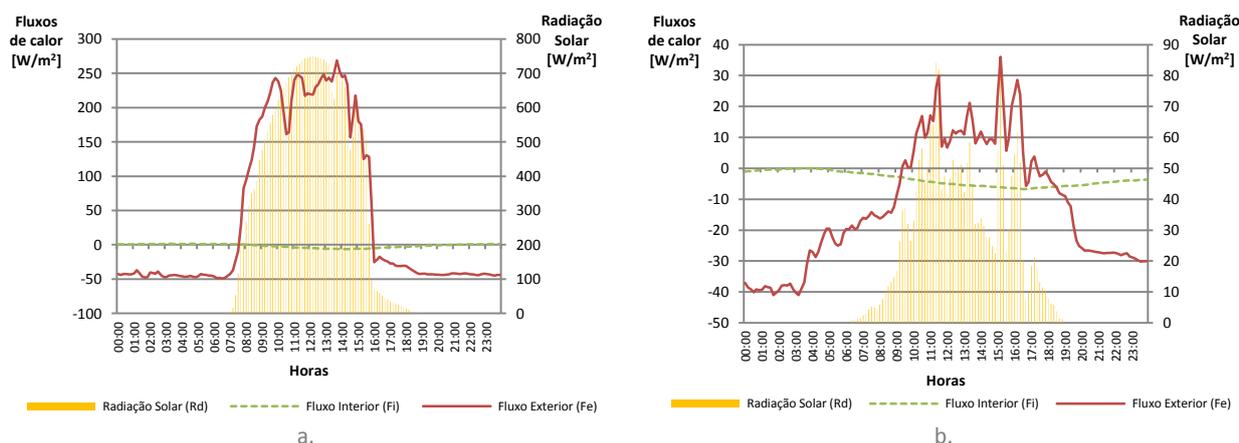


Figura 4.20 - Radiação solar e fluxos exterior e interior no CS3: a. no dia 13 de Março de 2013, dia mais frio (DF); b. no dia 19 de Março, dia de menor radiação (DmR).

A Figura 4.20 apresenta os fluxos de calor nas superfícies exterior e interior da parede e a intensidade da radiação solar. Verifica-se, mais uma vez, que o fluxo exterior é predominantemente negativo, ou seja, na maioria do ciclo diário o fluxo tem o sentido do interior para o exterior e que este é positivo apenas quando a radiação solar ultrapassa os 200 W/m^2 . O T_e acompanha, de um modo geral, o aumento da radiação solar incidente na fachada. Posteriormente, após o pôr-do-sol (cerca das 19h), nota-se uma quebra repentina no valor de T_e mantendo-se constante ao longo das horas da noite. T_e é positivo durante um período de 8h10, desde as 7h40 às 15h50.

Por sua vez, o T_i é quase nulo ao longo de todo o dia. Atinge um valor máximo de $1,45 \text{ W/m}^2$ às 4h40 e um valor mínimo de $-6,25 \text{ W/m}^2$ às 14h20. Estes valores bastante reduzidos devem-se ao facto da T_i também não ter variado muito. Como se verificou na Figura 4.20, a T_i teve uma amplitude de apenas $1,26 \text{ }^\circ\text{C}$. Tal como se observou nos outros casos de estudo, a T_i varia maioritariamente pelos ganhos e perdas através dos restantes elementos envolventes e não propriamente pelas paredes de taipa. O T_i apenas varia porque a T_e se altera e não o contrário, daí os sentidos dos fluxos serem opostos ao esperado se a T_i fosse influenciada pelo calor transmitido através das paredes. Observando a Figura 4.19 e a Figura 4.20, das temperaturas e dos fluxos, em simultâneo verifica-se que tanto T_e como T_i aumentam os seus valores acompanhando a curva de evolução da R_d , já T_i e T_e têm evoluções opostas entre si, como se pode verificar também nos casos anteriores.

Neste caso de estudo o dia mais frio (DF) corresponde ao dia de maior radiação (DMR) pelo que se verifica sempre um fluxo exterior bastante elevado, ao longo do ciclo diário (Figura 4.20.a.) No entanto, a Figura 4.20.b., apresenta os fluxos de calor exterior e interior relativos ao dia de menor radiação (DmR), onde T_e regista um valor máximo próximo de 40 W/m^2 . Valor bastante reduzido quando comparado com o valor de T_e do DF (de $268,86 \text{ W/m}^2$). Adicionalmente, verifica-se que o T_i regista um valor consideravelmente menor no DmR, que pode ser justificado com o reduzido fluxo exterior

registado ao longo do dia, contrariamente ao que acontece no DF. No Anexo IV, a temperatura ambiente interior (Ti) durante o DmR registou valores sempre superiores à temperatura ambiente exterior (Te), o que justifica também o sentido sempre negativo (sentido do interior para o exterior) do Fi.

Pode observar-se também que os fluxos têm quase na totalidade das horas sentidos opostos, apesar do valor reduzido de Fi. A elevada inércia térmica da parede faz com que o Fi tenha atrasos significativos, de 15h00 até atingir o valor máximo e de 7h50 até atingir o valor mínimo, relativamente aos valores de Fe.

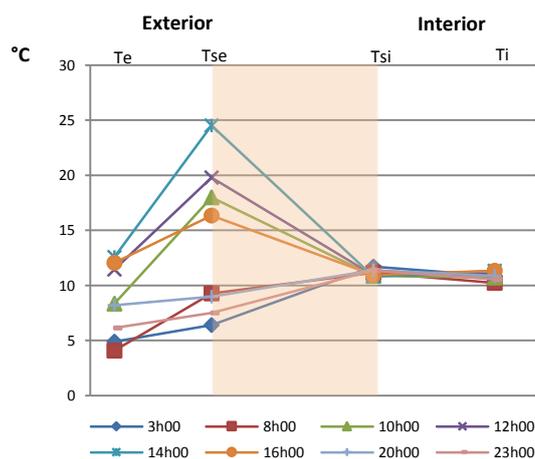


Figura 4.21 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DF e DMR no CS3.

A Figura 4.21 apresenta o perfil horizontal das temperaturas registadas ao longo do dia. Verifica-se, novamente, que o fluxo de calor nunca tem o mesmo sentido desde o exterior até ao interior, ou vice-versa. Contudo, pela figura, observa-se que em pelo menos um período do dia, por volta das 15h30 às 19h00 os fluxos são ambos negativos. Das horas representadas acima e que pertencem a este intervalo, tem-se as 16h00. A esta hora tanto Fe como Fi se apresentam no sentido negativo, porém no interior da parede o fluxo é positivo pois o declive da recta é negativo. Esta situação significa que o calor absorvido da Rd migra na direcção do exterior mas também na direcção da superfície da parede interior, Tsi, que é a temperatura mais baixa às 16h. Por sua vez, como o Ti também é superior a Tsi, o fluxo é negativo nesse troço.

Observa-se na Figura 4.21 dois acontecimentos distintos: o primeiro é relativo aos declives das rectas definidas entre Tsi e Ti o que vai de encontro ao observado na Figura 4.20 para os fluxos de calor interior; o segundo é relativo aos declives das rectas definidas entre Te e Tse que são todos positivos, o que significa que o fluxo tem sempre sinal negativo ao contrário do que se observou na Figura 4.20. O valor de Tse, devido à Rd directa, é muito superior a Te, enquanto Te atinge um valor máximo de 12,80 °C, Tse atinge quase 25 °C. No entanto, apesar de a Te ser inferior, devido à incidência directa de Rd no fluxímetro, o fluxo é positivo no intervalo de tempo das 7h40 às 15h50, como descrito previamente.

No interior da parede verificam-se maiores declives das rectas definidas por Tse e Tsi. A grande amplitude térmica de Tse, que varia entre, aproximadamente, 6 °C e 25 °C, e o valor estável de Tsi, próximo dos 10 °C, faz com que a diferença entre as temperaturas ao longo das horas diárias seja bastante variável.

4.3.1.2 CAMPANHA DE VERÃO

No presente item são apresentados os resultados obtidos na campanha experimental de Verão e a respectiva análise dos Dias Tipo identificados. Importa relembrar que não foi possível a realização da campanha de Verão no CS3.

Tabela 4.11 - Valores médios diários da radiação solar e das temperaturas ambiente exterior e interior da campanha de Verão do caso de estudo 1.

	Rd (W/m ²)	Te (°C)	Ti (°C)		
	25*	-	-		
Maio	26	44.37	13.66	17.30	
	27	30.25	14.84	16.49	
	28	39.76	13.67	16.46	
	29	25.97	14.09	15.99	
	30	32.60	15.61	15.96	
	31	34.03	18.60	17.21	
	1	33.15	20.28	18.37	
	2	33.99	21.75	19.94	
	3	34.20	22.69	21.14	
	4	43.22	21.57	21.44	
Junho	5	42.55	18.74	21.06	
	6	46.99	16.21	19.51	
	7	37.95	14.36	18.18	
	8	27.60	14.62	16.95	
	9	15.45	15.09	16.49	
	10	19.75	15.37	16.49	
	11	39.30	18.38	17.21	
	12	38.23	18.95	19.14	
	13	33.61	19.68	19.81	
	14	42.43	18.67	19.67	
	15*	-	-	-	

Radiação Solar

- RS



+RS

Temperatura

-T



+T

*Dias com descontinuidade na aquisição de dados

As Tabela 4.11 e 4.12 listam os valores médios diários da radiação solar e das temperaturas ambientes exterior e interior, relativos à campanha de Verão.

Pela escala de cores apresentada na Tabela 4.11, verifica-se que a maioria dos dias apresenta valores próximos, sem grandes alterações dos valores médios de um dia para outro. Comparando a Tabela 4.5 e a Tabela 4.11 verifica-se que existe uma grande discrepância entre os valores médios obtidos na campanha de Inverno e na campanha de Verão. Seria de esperar que, no Verão, com dias mais longos e de maior intensidade de radiação solar, a radiação solar (Rd) atingisse um valor médio superior, contudo os valores registam o contrário. Este facto pode ser explicado, por a radiação solar (Rd) medida ser a que incide em plano vertical e o sol no Verão terem um ângulo menor em relação ao eixo zenital. Assim, nas horas de maior calor, que ao mesmo tempo são as horas em que o sol tem uma altura solar maior, a radiação não incide tão perpendicularmente sobre o piranómetro.

A diferença do ângulo de incidência da radiação solar, da campanha de Inverno em relação à de Verão, conduz a que o valor máximo da média diária da radiação solar tenha sido de 46,99 W/m² (dia 6 de Junho), enquanto no Inverno, este valor seja 258,60 W/m² (dia 7 de Fevereiro).

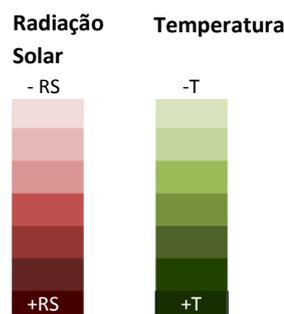
No CS2, pela Tabela 4.12 verifica-se que houve um período de fortes temperaturas e de forte incidência de radiação solar, ao contrário do que aconteceu no CS1 em que os valores médios, tanto da temperatura como da radiação solar, foram bastante baixos ao longo de todo o período monitorizado. Observa-se uma evolução gradual da temperatura exterior (Te) registando-se valores médios diários

entre 27 °C e 30 °C, de 24 a 30 de Junho. A radiação solar regista valores elevados porém não atingem as médias obtidas na campanha de Inverno, tal como se verificou em CS1.

Verifica-se ainda que a temperatura interior (Ti) foi superior à temperatura exterior (Te) até ter ocorrido uma vaga de calor, entre 24 e 30 de Junho. Apesar de a Ti, neste intervalo, elevar o seu valor médio, este valor não atinge valores muito elevados devido à forte inércia térmica das paredes de taipa. Nos restantes dias, como a amplitude térmica de Ti é muito reduzida, a sua média acaba por ser mais elevado do que Te, que tem uma maior amplitude térmica.

Tabela 4.12 - Valores médios diários da radiação solar e das temperaturas ambiente exterior e interior da campanha de Verão do caso de estudo 2.

	Rd [W/m ²]	Te (°C)	Ti (°C)		
	15*	-	-	-	
	16	64.95	19.24	19.99	
	17	58.28	17.56	19.32	
	18	52.16	16.09	18.27	
	19	95.72	17.54	18.14	
	20	99.86	18.10	18.26	
	21	115.05	19.41	19.15	
Junho	22	98.22	22.40	19.52	
	23	97.88	23.15	21.31	
	24	104.84	27.58	22.17	
	25	101.24	29.02	24.21	
	26	99.32	28.77	25.25	
	27	93.80	28.46	25.72	
	28	95.49	28.62	25.71	
	29	94.05	28.98	25.85	
	30	98.51	29.80	26.62	
	Julho	1	69.16	24.98	26.26
2		82.23	20.40	23.76	
3		98.90	26.19	23.03	
4*		-	-	-	



*Dias com descontinuidade na aquisição de dados

Ao longo deste item o Dia Tipo é referido pela nomenclatura previamente atribuída: Dia mais Quente – DQ. Assim, pela análise das tabelas, podem definir-se os seguintes Dias Tipo:

- CS1 – 3 de Junho de 2013;
- CS2 – 30 de Junho de 2013.

Pontualmente, para efeitos de comparação, são referidos o dia de maior radiação (DMR) e dia de menor radiação (DmR), relativos aos dias:

- CS1 – 6 de Junho de 2013 (DMR); 9 de Junho de 2013 (DmR);
- CS2 – 21 de Junho de 2013 (DMR); 18 de Junho de 2013 (DmR).

De seguida, pretende-se descrever os dias, definidos como o dia mais quente durante a campanha de Verão, para cada um dos casos de estudo. Inicialmente são apresentados três gráficos síntese (Tabela 4.13 e Tabela 4.13) comparando a radiação solar, a temperatura ambiente interior e a temperatura ambiente exterior entre os três casos. Posteriormente são analisados, para cada um dos casos de estudo, os gráficos de temperatura ambiente e radiação solar; fluxo de calor e radiação solar; e o perfil horizontal de temperaturas.

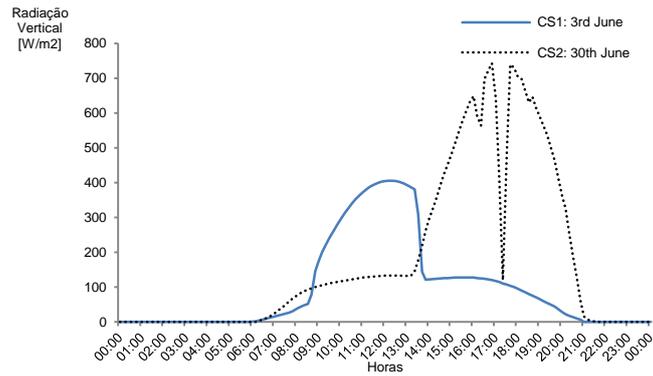


Figura 4.22 - Radiação solar incidente no plano vertical das fachadas registada no dia mais quente (DQ).

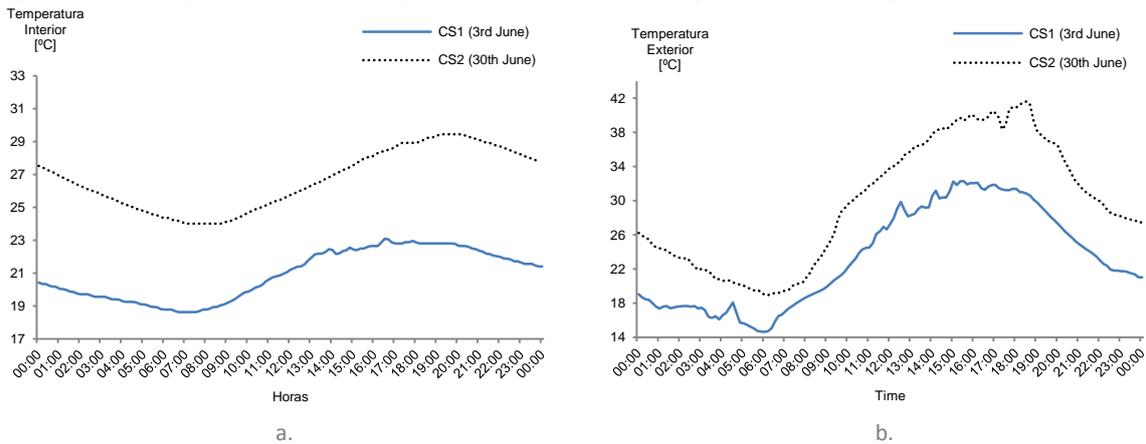


Figura 4.23 - Temperaturas no dia mais quente da campanha de Verão. a. Temperatura interior; b. Temperatura exterior.

Na campanha de Verão, os valores da temperatura ambiente exterior e da radiação solar estão em conformidade. Na Figura 4.23 b., verifica-se que, durante o dia mais quente (DQ), o CS2 esteve exposto a temperaturas muito elevadas durante todo o dia e uma elevada incidência de radiação solar (Figura 4.22). Conforme referido, a fachada monitorizada do CS2 está orientada a Oeste, o que explica os valores mais elevados durante a tarde. Verifica-se, ainda, que a radiação solar no CS1 sofreu uma grande queda, cerca das 13h, que pode ser explicado por uma tarde de céu nublado.

Nesta campanha, a temperatura exterior máxima (Figura 4.23.b.) atingiu cerca de 30 °C, no CS1, e 42 °C, em CS2, enquanto a temperatura exterior mínima registou 14 °C (em CS1) e 20 °C (em CS2). Correspondendo a uma amplitude térmica da temperatura exterior de cerca de 16 °C e 22 °C, em CS1 e em CS2 respectivamente. Relativamente às temperaturas do ambiente interior, CS2 apresenta valores superiores a CS1, visto a temperatura exterior ser, igualmente, superior. No entanto, verifica-se uma quebra significativa, em ambos os casos, da amplitude térmica da temperatura interior face à amplitude térmica da temperatura exterior.

a) CS1 – 3 DE JUNHO DE 2013

A Figura 4.24 apresenta as temperaturas dos ambientes exterior e interior e a intensidade da radiação solar. No Dia mais quente, dia 3 de Junho de 2013, registou-se, para a temperatura exterior (Te), um valor máximo de 32,30 °C (às 15h30), um mínimo de 14,65 °C e um valor médio de 22,69 °C. A temperatura interior (Ti) registou um valor máximo de 23,09 °C, um mínimo de 18,64 °C e um valor médio de 21,14 °C. Assim, Te e Ti apresentam, respectivamente uma amplitude térmica de 17,65 °C de

4,45 °C. A inércia térmica das paredes reduz a amplitude térmica interior e introduz um atraso entre as temperaturas mínima e máxima exteriores e interiores de 40 minutos e 1 hora, respectivamente.

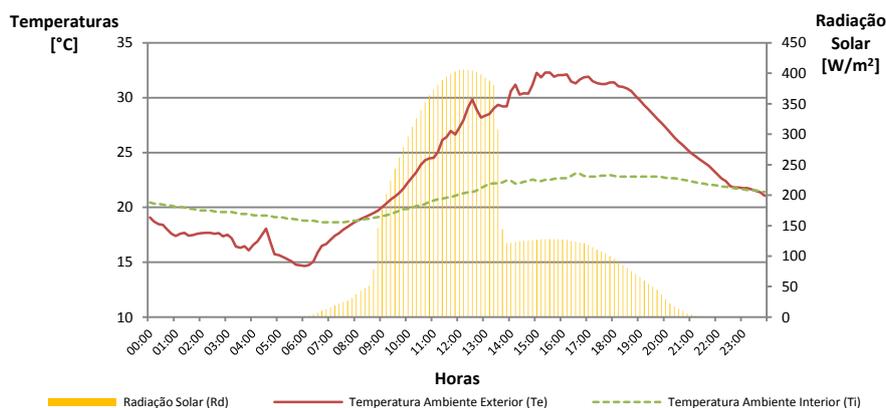


Figura 4.24 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior do dia 3 de Junho de 2013 (DQ) na campanha de Verão.

Tabela 4.13 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 3 de Junho de 2013 (DQ). Hora dos valores máximos e mínimos. Atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS1	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo	Hora	Atraso
Te	32,30 (°C)	15h30	-	14,65 (°C)	6h00	-
Ti	23,09(°C)	16h30	1h00	18,64 (°C)	6h40	0h40
Rd	405,92 (W/m ²)	12h10	-	-	-	-
Fe	268,99 (W/m ²)	12h30	-	-52,62 (W/m ²)	5h40	-
Fi	6,04 (W/m ²)	6h10	17h40	-11,13 (W/m ²)	16h30	10h50

Tal como verificado na campanha de Inverno, também nesta campanha os valores da temperatura interior (Ti), se encontram abaixo do valor da temperatura de conforto na estação de Verão indicado na REH (2013), que é de 25 °C. Assim, poderá assumir-se que, mesmo no dia mais quente, não há necessidade de arrefecer a habitação. Logo, os consumos energéticos de climatização para arrefecimento seriam nulos. No entanto, é necessário realçar o facto de a habitação estar desocupada e logo não estarem a ser contabilizados ganhos internos.

A radiação solar apresenta um crescimento estável até cerca das 13h00, hora em que se regista uma acentuada quebra na intensidade de Rd. O valor decresce de 308,08 W/m² para 144,07 W/m², num período de 10 minutos, entre as 13h30 e as 13h40. Conclui-se então, que a partir das 13h30 o céu ficou encoberto e a radiação que se regista é predominantemente difusa.

A Figura 4.25.a. apresenta os fluxos de calor nas superfícies exterior e interior da parede e a intensidade da radiação solar. No dia mais quente (DQ), o fluxo exterior (Fe) registou um valor máximo de 268 W/m² às 12h30, um valor mínimo de -52,62 W/m² às 5h40 e um valor médio de 10,20 W/m². O fluxo interior (Fi) registou um valor máximo de 6,04 W/m² às 6h10, um valor mínimo de -11,13 W/m² às 16h30 e um valor médio de -1,15 W/m².

No dia de maior radiação (DMR), a radiação também não apresenta valores muito elevados, apresentando inclusive um valor máximo inferior relativamente ao DQ, no entanto o valor médio diário

do DMR é superior. Observa-se, uma vez mais, uma forte influência da radiação solar incidente nos valores registados do fluxo de calor exterior.

Comparando os resultados de ambas as campanhas (Figura 4.14.a. e Figura 4.25.a.), o valor máximo do fluxo não difere grandemente de uma campanha para outra. Porém, o intervalo de tempo em que o fluxo exterior tem sentido positivo (sentido do exterior para o interior) é maior, pois o período com radiação solar também é maior. Enquanto na campanha de Inverno esse período era de cerca de 9 horas, na campanha de Verão, este é de 12h-13h aproximadamente.

Relativamente ao fluxo interior, os valores não diferem entre ambas as campanhas, sendo os gráficos das Figura 4.14.a. e Figura 4.25.a. bastante semelhantes. Assim, tal como na campanha de Inverno, o fluxo de calor exterior não atinge o interior da habitação através das paredes. Conclui-se, portanto, que mesmo na estação de Verão, as trocas de calor se dão maioritariamente através dos restantes elementos da envolvente.

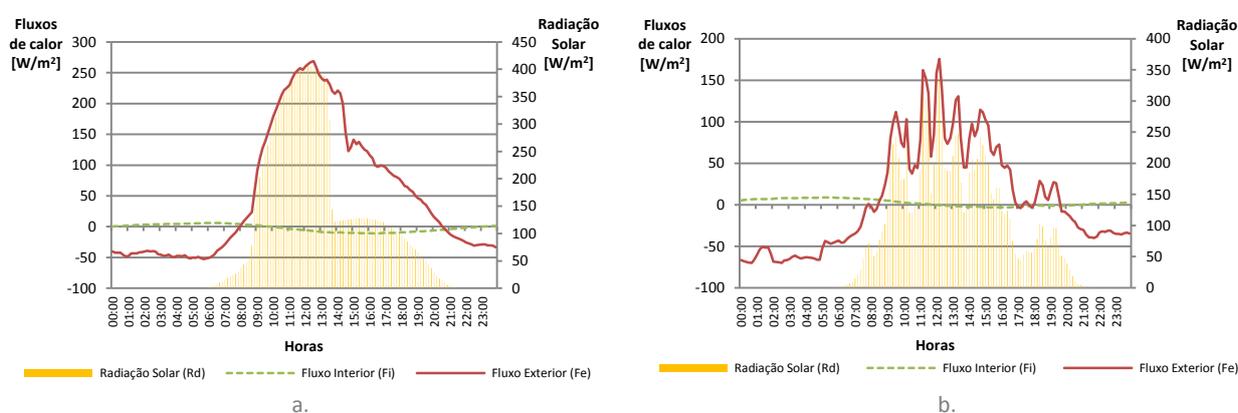


Figura 4.25 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior no CS1: a. no dia 3 de Junho de 2013, dia mais quente (DQ); b. no dia 6 de Junho, dia de maior radiação (DMR).

A Figura 4.26 apresenta o perfil horizontal das temperaturas a diferentes horas do dia. Contrariamente ao observado na campanha de Inverno, nesta estação, as temperaturas interiores (Ti) mantêm-se próximas dos valores mais baixos registados para a temperatura exterior (Te). Nas primeiras horas do dia, às 3h00 e às 8h00, o declive é próximo de zero. Nas horas onde se registaram temperaturas mais elevadas, o declive no interior da parede é bastante acentuado, visto a diferença entre as temperaturas superficiais exterior e interior (Tse e Tsi) ser igualmente elevada.

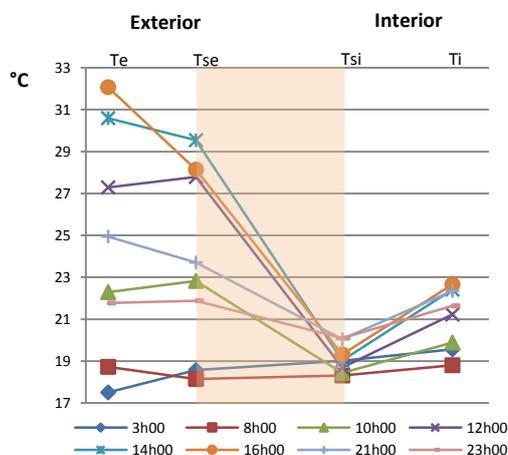


Figura 4.26 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DQ no CS1.

Uma vez mais, verifica-se que o fluxo de calor não tem o mesmo sentido desde o exterior até ao interior da habitação ou no sentido inverso, excepto às 3h00 em que o fluxo de calor tem sentido negativo. Nas restantes horas, como foram registadas as temperaturas mais baixas na superfície da parede interior (Tsi), o correspondente fluxo tem um sentido negativo, do interior da habitação (Ti) para a superfície interior da parede (Tsi); o fluxo tem um sentido positivo da superfície exterior da parede (Tse) para a superfície interior (Tsi) e entre a superfície exterior da parede (Tse) e o ambiente exterior (Te), assim, o fluxo vai variando consoante a hora do dia.

b) CS2 – 30 DE JUNHO DE 2013

A Figura 4.27 apresenta as temperaturas ambiente exterior e interior e a intensidade da radiação solar. No DQ registou-se para Te, um valor máximo de 41,66 °C às 18h30, um mínimo de 18,93 °C, e um valor médio de 29,80 °C. A Ti registou um valor máximo de 29,45 °C, um mínimo de 24,00 °C e um valor médio de 26,62 °C. Assim, Te e Ti têm uma amplitude térmica de 22,73 °C e de 5,45 °C, respectivamente. A inércia térmica das paredes amortece a amplitude térmica interior e impõe um atraso entre as temperaturas máxima e mínima exteriores e interiores entre 40 a 50 minutos.

Por ter havido um período de dias consecutivos com temperaturas exteriores médias bastante elevadas, a Ti subiu acima do valor de temperatura de conforto de referência do REH(2013), que é de 25 °C, durante a estação de arrefecimento. Ou seja, seria necessário arrefecer a habitação no DQ, mesmo não contabilizando os ganhos internos.

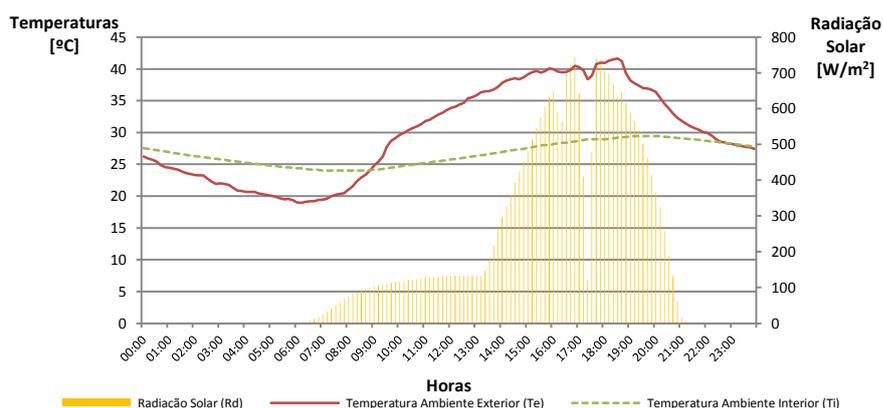


Figura 4.27 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior do dia 30 de Junho de 2013 (DQ) na campanha de Verão.

Tabela 4.14 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 30 de Junho de 2013 (DQ) na campanha de Verão. Hora dos valores máximos e mínimos. Atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS2	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo	Hora	Atraso
Te	41,66 (°C)	18h30	-	18,93 (°C)	6h10	-
Ti	29,45 (°C)	19h10	0h40	24,00 (°C)	7h00	0h50
Rd	742,94 (W/m ²)	16h50	-	-	-	-
Fe	287,82 (W/m ²)	16h00	-	-69,52 (W/m ²)	21h10	-
Fi	19,31 (W/m ²)	20h30	4h30	-12,81 (W/m ²)	11h10	14h00

Comparando DQ do CS2 (Figura 4.27) com os resultados do DQ do CS1 (Figura 4.24), o valor máximo de Te registado no CS1 é bastante inferior (32,30 °C) ao registado em CS2 (41,66 °C), uma diferença de quase 10 °C. Quanto às amplitudes térmicas são de 17,65 °C de 4,45 °C para Te e Ti, respectivamente.

Assim, mesmo com uma diferença de amplitude térmica de 5 °C da temperatura exterior entre o CS1 e o CS2, a diferença de amplitude térmica da temperatura interior é de apenas 1 °C.

A radiação solar apresenta dois períodos de crescimento estável. O primeiro, com uma intensidade bastante reduzida, que não ultrapassa os 200 W/m², e que representa a incidência de radiação solar (Rd) difusa na fachada Oeste. A partir das 14h00, regista-se um aumento repentino de Rd, chegando a atingir os 742,94 W/m². Este período representa a incidência de Rd directa na fachada Oeste, a fachada monitorizada. Por volta das 18h00 existe uma quebra abrupta de Rd, provavelmente pela passagem de nuvens, provocando uma ligeira redução da Te. Posteriormente, a Rd diminui gradualmente a sua intensidade até ao pôr-do-sol, por volta das 20h40. Foi um dia de forte intensidade de Rd e de temperaturas bastante elevadas.

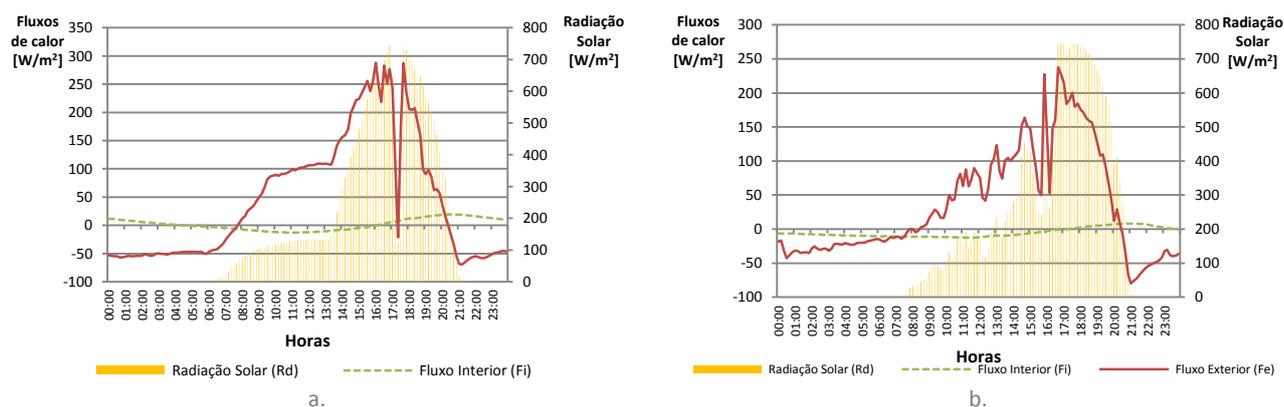


Figura 4.28 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior no CS2: a. no dia 30 de Junho de 2013, dia mais quente (DQ); b. no dia 18 de Junho, dia de menor radiação (DmR).

A Figura 4.28.a. apresenta os fluxos de calor nas superfícies exterior e interior da parede e a intensidade da radiação solar. No DQ, registou-se um valor máximo de Fe de 287,82 W/m² às 16h00, um valor mínimo de -69,52 W/m² às 21h10 e um valor médio de 13,87 W/m². Fi registou valor máximo de 19,31 W/m² às 20h30, um valor mínimo de -12,81 W/m² às 14h00 e um valor médio de 0,73 W/m². É possível observar pelo gráfico da Figura 4.28.a. que Fe tem sentido positivo durante um longo período, de aproximadamente 13h00, devido à forte radiação e temperaturas que se fizeram sentir neste Dia Tipo.

Tal como aconteceu na campanha de Inverno, também na campanha de Verão se verifica um comportamento diferente de Fi. Em CS2, o Fi máximo é atingido poucas horas depois (cerca de 4h30) de Fe. Enquanto em CS1 este atraso é de 17h40. Para além disso, em CS2 o Fi máximo é atingido poucas horas depois de Ti ter atingido também o valor máximo, às 19h10. Já em CS1 o Fi máximo é atingido às 6h10 enquanto Ti máximo se registou às 16h30. Assim se poderá indicar que a inércia térmica no caso de estudo 2 é inferior à inércia térmica do caso de estudo 1.

Pela Figura 4.28 observa-se que os valores da radiação solar (Rd) registaram valores máximos bastante próximos entre os dois casos de estudo. No entanto, verifica-se que o fluxo exterior de DQ (Figura 4.28.a.), o dia no qual se verificam temperaturas ambiente exteriores mais elevadas, é superior ao fluxo exterior de DmR (Figura 4.28.b.). Observa-se também, alguma instabilidade dos valores da radiação solar incidente e, conseqüentemente, do fluxo de calor exterior. Assim, uma vez mais, se verifica que o fluxo exterior varia consoante a variação da radiação solar. Relativamente ao fluxo interior não se observam diferenças significativas entre os dois casos.

A Figura 4.29 apresenta o perfil horizontal das temperaturas registadas ao longo do dia. Neste Dia Tipo, as temperaturas mantêm-se consideravelmente estáveis entre o ambiente interior e ambiente exterior, sendo possível observar que, praticamente todas as rectas têm um declive bastante reduzido, à

excepção de três situações. Na altura do dia com temperaturas mais elevadas, às 12h00, às 14h00 e às 16h00, as temperaturas elevam-se bastante, até cerca de 40 °C. O mesmo não acontece com a T_i , esta aumenta ligeiramente até cerca dos 30 °C às 21h00, porém às 23h00 verifica-se que a temperatura baixa novamente.

Como se observou, para a campanha de Inverno (Figura 4.15, Figura 4.18 e Figura 4.21), também na campanha de Verão a T_{si} no CS2 tem uma amplitude bastante significativa. Pela Figura 4.29 verifica-se que a T_{si} se eleva principalmente nas últimas horas do dia, ou seja, quando o calor absorvido pela parede durante todo o dia atinge a superfície da parede interior. Enquanto no caso de estudo 1, a T_{si} não subiu acima de T_i (Figura 4.15), o mesmo não aconteceu no caso de estudo 2. Pode concluir-se que no caso de estudo 2, o aquecimento do ambiente interior também está relacionando com o calor transmitido através das paredes de taipa.

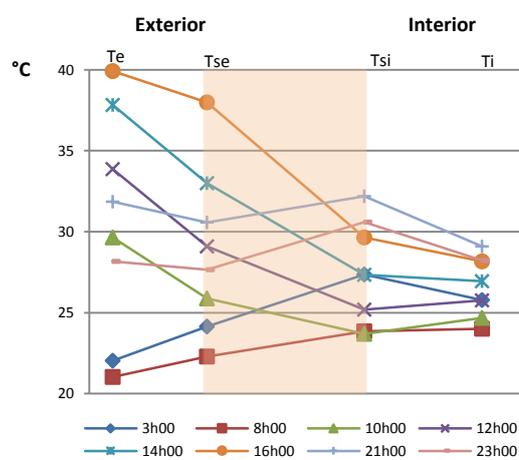


Figura 4.29 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DQ, na campanha de Verão, no caso de estudo 2.

4.3.1.3 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS CASOS DE ESTUDO

Neste subcapítulo apresentam-se as principais conclusões da análise descrita, comparando o comportamento dos 3 casos de estudo, durante as duas campanhas de monitorização efectuadas.

De um modo geral, e salientado o facto dos casos de estudo se encontrarem desabitados, pode concluir-se que o conforto térmico de construções em terra não é satisfatório durante a estação de aquecimento. Na campanha de Inverno, as temperaturas interiores encontram-se entre os 8,38 °C e 13,88 °C no CS1, entre 5,99 °C e 14,25 °C no CS2 e entre 9,25 °C e 14,28 °C no CS3. Estas temperaturas são muito inferiores à temperatura de conforto de referência para a estação de Inverno, que é de 18 °C, de acordo com a regulamentação térmica actualmente em vigor em Portugal (REH, 2013).

Em contrapartida, na estação de arrefecimento, o comportamento da construção em terra é bastante satisfatório ao nível do conforto térmico. No CS1 o valor máximo da temperatura interior é de 24,06 °C no CS1, quando no exterior a temperatura atingiu os 32 °C. Durante o período de monitorização de Verão do CS2, houve um longo período de temperaturas muito elevadas. De facto, verificou-se uma vaga de calor com início a 22 de Julho e que teve a duração de nove dias em determinadas regiões de Portugal, nomeadamente Abrantes, com temperaturas nocturnas próximo de 30 °C e diurnas de 40 °C. Assim, no CS2, as temperaturas interiores situaram-se entre os 30,12 °C e os 17 °C, e nos dias mais

quentes não se verificaram valores inferiores à temperatura de conforto de referência do REH para a estação de arrefecimento, que é de 25 °C.

No entanto, em todos os casos de estudo verificou-se uma atenuação elevada da amplitude térmica das temperaturas interiores face às exteriores. Mesmo havendo dias, representados anteriormente pelos Dias Tipo, em que as amplitudes da temperatura exterior atingiam quase 23 °C (DQ – 30 de Junho), a amplitude térmica da temperatura interior foi de apenas 5,45 °C (Figura 4.30). A Tabela 4.15 sintetiza os valores médios da temperatura ambiente exterior e interior e os valores das amplitudes térmicas da temperatura ambiente exterior e interior obtidos ao longo das duas campanhas.

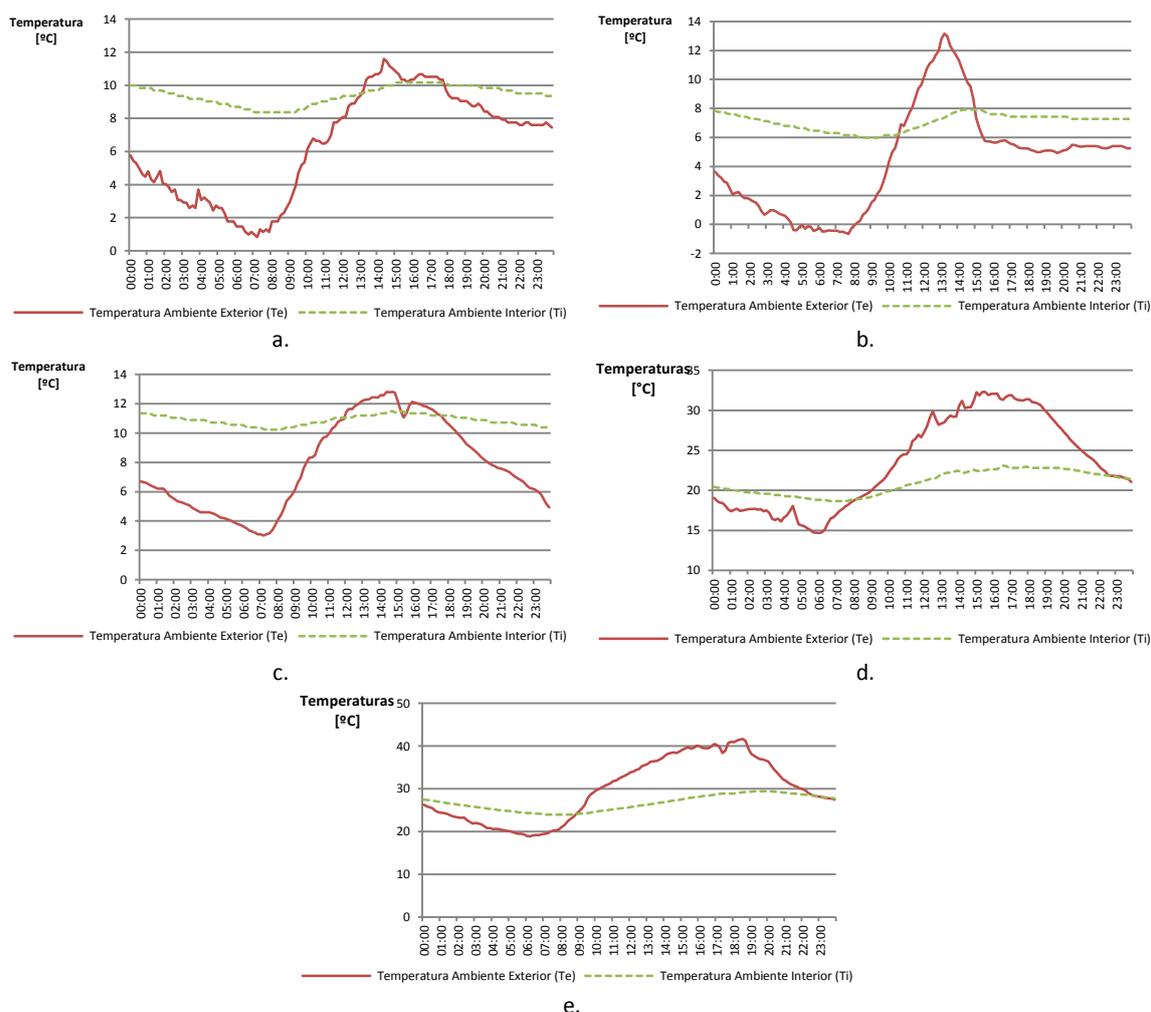


Figura 4.30 – Temperatura ambiente exterior (Te) e Temperatura ambiente interior (Ti): a. Dia mais frio no CS1; b. Dia mais frio no CS2; c. dia mais frio no CS3; d. Dia mais quente no CS1; e. Dia mais quente no CS2.

Tabela 4.15 – Valores médios da temperatura ambiente exterior e interior e amplitude térmica da temperatura ambiente exterior e interior

		Te média [°C]	Ti média [°C]	Δ Te [°C]	Δ Ti [°C]
Inverno	CS1	23,03	6,42	10,78	1,78
	CS2	4,4	7,06	13,8	1,94
	CS3	7,8	10,87	9,8	1,26
Verão	CS1	22,69	21,14	17,65	4,45
	CS2	29,80	26,66	22,73	5,45

Importa salientar que, durante a monitorização, as portadas se mantiveram fechadas e portanto, a transferência de calor da radiação solar através da superfície envidraçada foi menor do que se estas se encontrassem abertas, o que contribuiu para um menor aumento da temperatura do ambiente interior.

Relativamente aos fluxos de calor, verificou-se que o fluxo de calor exterior depende fortemente da incidência da radiação solar, que faz aumentar a temperatura superficial exterior pela absorção de radiação solar. No entanto, no caso CS2, como a fachada monitorizada é a fachada Oeste, verificou-se que, nas horas de mais calor, o F_e aumentou apenas com o aumento de temperatura exterior. A partir das 14h00, hora a partir do qual se começa a registar uma intensidade maior de R_d , o fluxo admitiu um incremento repentino. Verificou-se ainda que, quando o céu se apresenta encoberto ou com nuvens passageiras, o F_e acompanha as variações de R_d , sendo ambas extremamente instáveis.

Por sua vez, o fluxo interior tem valores muito próximos de zero em todos os casos de estudo e em ambas as campanhas. Verificou-se também que, à excepção do CS2, o F_i tinha um comportamento oposto a T_i . Quando o valor de T_i aumentava, o de F_i diminuía, atingindo o valor mínimo próximo da hora correspondente ao registo do valor máximo de T_i e vice-versa. Assim, pode concluir-se que o calor que atravessa a parede nunca atinge o ambiente interior, pelo que, a subida de T_i se justifica apenas pela transferência de calor através dos restantes elementos da envolvente.

Contudo, no caso CS2, este fenómeno não acontece e o valor máximo de F_i é registado no período de 4h-5h, poucas horas após se ter registado o valor máximo de F_e . Assim, pode depreender-se que a inércia das paredes de taipa deste caso de estudo (CS2) não é tão elevada como nos restantes casos de estudo (CS1 e CS2).

Pode, assim, concluir-se que as paredes de taipa têm uma forte inércia térmica, uma característica que se revela vantajosa, particularmente, na estação de Verão. Na estação de Inverno, esta propriedade pode tornar-se numa desvantagem, uma vez que o calor absorvido pelas paredes, para além de demorar muito tempo a atingir o interior, vai-se dissipando, e portanto, não tem grande influência na alteração da temperatura interior. Por outro lado, caso a habitação estivesse ocupada e climatizada, o calor permaneceria durante mais tempo no interior da habitação.

4.3.2 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA, DIFUSIVIDADE TÉRMICA E COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DAS PAREDES

Os valores de condutibilidade térmica (λ) e da difusividade térmica (α) foram obtidos pelo método transiente, utilizando para o efeito uma sonda portátil. Enquanto a condutibilidade térmica é a capacidade de um material de conduzir calor, a difusividade térmica mede a capacidade de um material conduzir calor relativamente à capacidade de armazenar energia. Assim, a difusividade térmica resulta na divisão entre a condutibilidade térmica (λ) e o calor específico volumétrico (cp).

A partir dos valores obtidos da condutibilidade térmica foram também calculados os valores do coeficiente de transmissão térmica (U) de cada um dos casos de estudo.

4.3.2.1 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O ISOMET 2114 é um equipamento portátil desenvolvido pela Applied Precision Lda que pode ser utilizado numa grande variedade de tipos de materiais isotrópicos (materiais isolantes, plásticos, vidros

e minerais). Este equipamento, através da imposição de um impulso térmico, permite a medição da condutibilidade térmica (λ); do calor específico volumétrico (cp); da temperatura; e da difusividade térmica (α) cujas gamas de medição e respectivos erros se encontram descritos no subcapítulo 4.2.2.

Devido à heterogeneidade das paredes de taipa é conveniente realizar as medições em diversos pontos numa área representativa da parede. Por este motivo, foram escolhidos nove pontos numa malha quadrangular de 50 cm de lado, na superfície interior da parede, como representado na Figura 4.31.

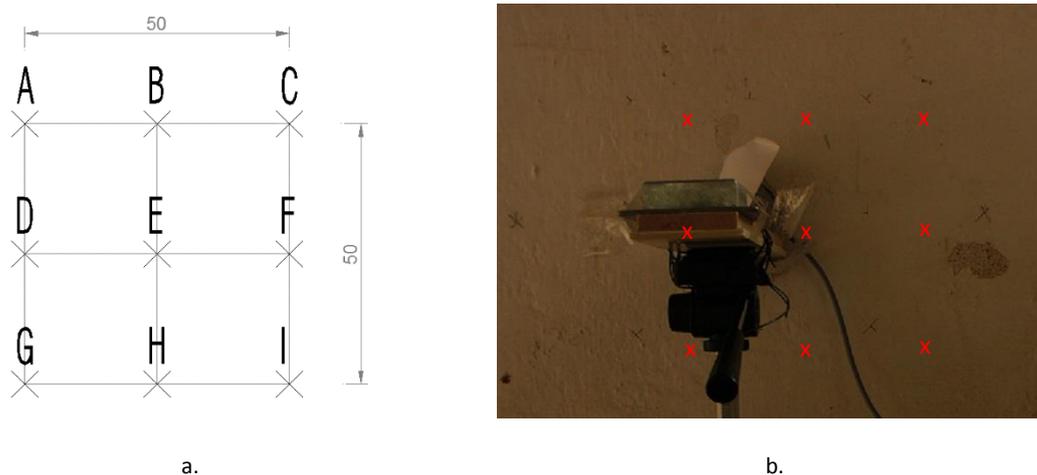


Figura 4.31 – a. Esquemática dos nove pontos de medição na parede; b. Teste em curso no caso de estudo 1.

4.3.2.2 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A Tabela 4.16 apresenta os valores médios e o desvio padrão dos valores da condutibilidade térmica, do calor específico volumétrico e da difusividade térmica dos três casos de estudo.

Tabela 4.16. Valor médio e desvio padrão dos valores da condutibilidade térmica, do calor específico volumétrico, da difusividade térmica e da humidade relativa na superfície da parede.

	λ (W/m.°C)		cp (J/m ³ .K) x10 ⁶		α (m ² /s) x10 ⁶	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
CS1	0,74	0,26	1,44	0,04	0,51	0,17
CS2	0,98	0,17	1,48	0,08	0,64	0,15
CS3	0,85	0,20	1,41	0,04	0,61	0,13

Como se pode observar pela Tabela 4.16, os valores médios da condutibilidade térmica (λ) foram de 0,74 W/m.°C, 0,98 W/m.°C e 0,85 W/m.°C para as paredes de taipa do CS1, CS2 e CS3 respectivamente. Relativamente à difusividade térmica (α), a parede do CS1 apresenta um resultado de 0,51 m²/s, a do CS2 de 0,64 m²/s e por fim, a do CS3 de 0,61 m²/s, sendo possível concluir que, dos três casos de estudo, o CS1 é o que apresenta um melhor comportamento térmico.

Por outro lado, tendo em conta o desvio padrão dos valores de condutibilidade térmica, o CS1 apresentou uma maior variabilidade nos valores demonstrando que as paredes de terra do CS1 têm uma heterogeneidade maior.

Quanto ao valor do calor específico volumétrico (c_p), o CS2 foi o que apresentou, ligeiramente, um melhor resultado, 1,48 J/m³.K. No entanto, como tem um valor de condutibilidade térmica bastante superior aos restantes casos de estudo, é o caso de estudo que apresenta piores características térmicas.

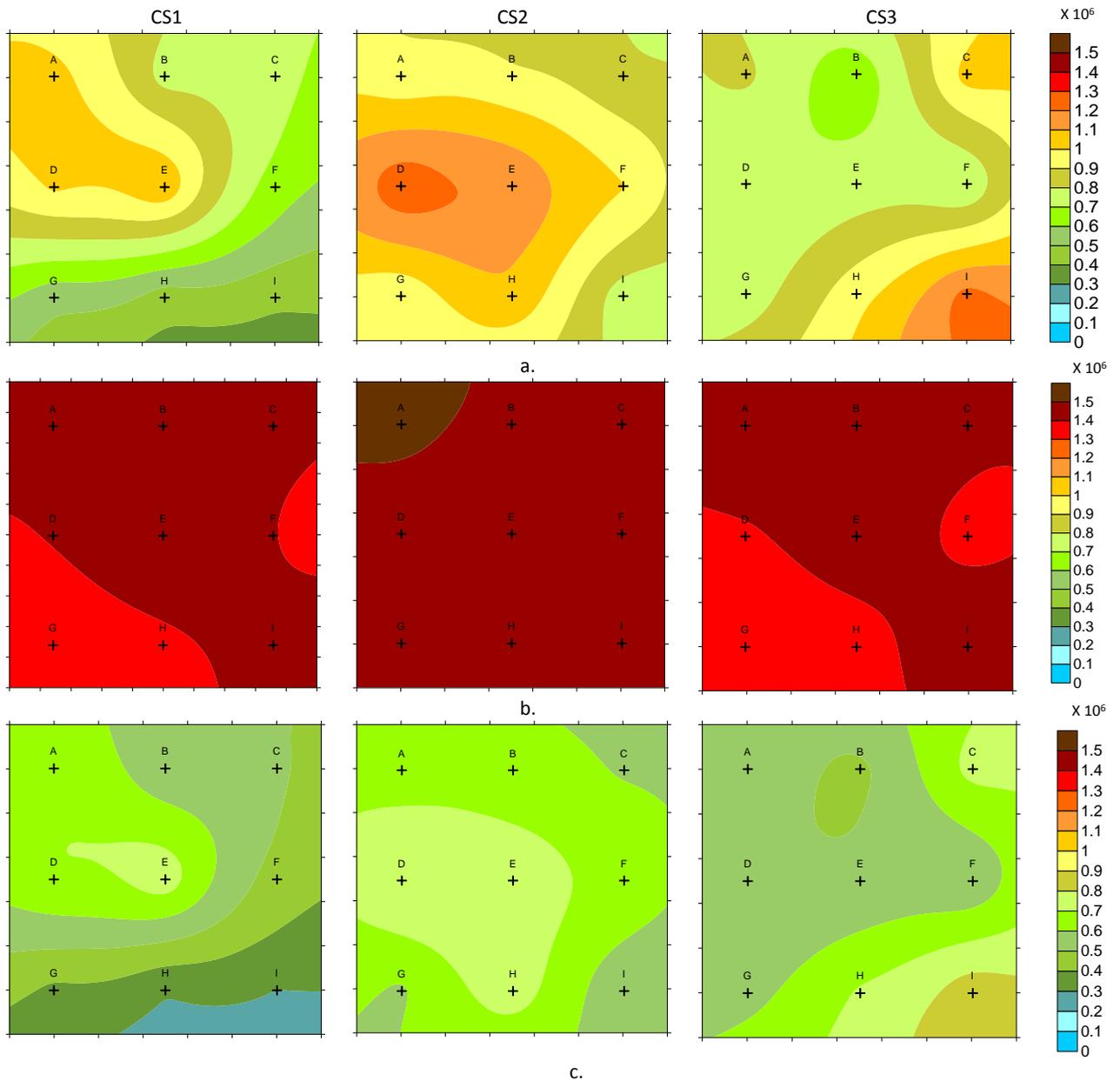


Figura 4.32 – a. Mapeamento dos valores de λ ; b. Mapeamento dos valores de c_p ; c. Mapeamento dos valores de α .

A Figura 4.32 apresenta o mapeamento da parede utilizando os valores medidos de λ , c_p e de α em cada um dos pontos dos três casos de estudo (CS1, CS2 e CS3). Pela Figura 4.32 a. verifica-se que o CS3 demonstra uma maior uniformidade de valores de λ , excepto no ponto I onde regista um valor bastante superior aos restantes. O CS1, por sua vez, tem uma maior variabilidade sendo no canto superior esquerdo os pontos que registaram maiores valores e no canto inferior direito os valores mais baixos. É também o CS1 o caso de estudo que apresenta valores mais baixos (maioritariamente situados na cor verde), nomeadamente na zona dos pontos H e I, contrariamente ao CS2, que apresenta valores numa escala superior (na escala dos amarelos), sendo D o ponto com o valor mais elevado.

Relativamente ao valor do calor específico volumétrico (c_p) este apresenta grande uniformidade nos três casos de estudo (tom vermelho escuro). Verifica-se, pontualmente, algumas oscilações, porém pouco relevantes. Tal como observado pela Tabela 4.16 é o CS2 que apresenta um valor de c_p ligeiramente superior devido ao valor medido no ponto A.

Sendo a difusividade térmica a divisão entre a condutibilidade térmica (λ) e o calor específico volumétrico (c_p) e, uma vez que o c_p se mantém uniforme, é esperado que o mapeamento da difusividade térmica (Figura 4.32 c.) se apresenta semelhante ao mapeamentos dos valores da condutibilidade térmica (Figura 4.32 a.). Como observado pelas médias e desvio padrão, o caso que apresenta valores mais baixos é o CS1 seguido de CS2; contudo, é o que apresenta menor uniformidade nos valores.

4.3.2.3 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA

Através dos resultados obtidos do valor da condutibilidade térmica das paredes é possível calcular-se o coeficiente de transmissão térmica pela equação 4.1.

$$U = \frac{1}{R_{si} + R_{se} + \frac{e}{\lambda}} \quad (\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (4.1)$$

onde:

U – coeficiente de transmissão térmica ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);

R_{si} – resistência térmica superficial interior ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$);

R_{se} – resistência térmica superficial exterior ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$);

e – espessura da parede (m);

λ – condutibilidade térmica ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$).

Pelos REH (2013) e ISO 6946 (2007) têm-se que R_{si} e R_{se} são, respectivamente, $0,13 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$ e $0,04 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$. Tendo as paredes de taipa de CS1, CS2 e CS3 espessuras de 0,55 m, 0,50 m e 0,53 m é possível calcular o coeficiente de transmissão térmica para cada um dos casos, pela equação 4.1. Refira-se que para efeito de cálculo do valor do coeficiente de transmissão térmica, e por simplificação, foi desprezada a camada de reboco das paredes.

Assim, obteve-se os seguintes resultados de coeficiente de transmissão térmica: $1,09 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ para CS1, $1,47 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ para CS2 e $1,26 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ para CS3. Estes valores são da ordem de grandeza de valores indicados no ITE50, que é de $1,1 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Pelo regulamento térmico em vigor, REH (2013), o valor do coeficiente de transmissão térmica máximo admissível para paredes exteriores localizadas em Abrantes (zona I2) é de $1,60 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, pelo que os três casos de estudo cumprem os regulamentos térmicos. No entanto, estes valores estão longe do valor de referência, que é de $0,40 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ até 31 de Dezembro de 2015, e que passará a $0,35 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ a partir dessa data.

Os resultados obtidos através da monitorização *in situ* mostram uma necessidade do aumento da resistência térmica da construção em terra, o que poderá ser obtido com a incorporação de materiais com propriedades isolantes na constituição das paredes, tal como será falado no capítulo 5.

4.3.3 COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA DAS PAREDES DE TAIPA MONITORIZADA

Como referido, os dados obtidos através das campanhas de monitorização serão analisados segundo a norma ISO 9869 (1994), utilizando o método da média progressiva por forma a calcular-se o valor do coeficiente de transmissão térmica (U).

Esta norma internacional descreve o método de cálculo das propriedades de transmissão térmica dos elementos de um edifício a partir da utilização de um fluxímetro. Indica também o tipo de aparelhos a serem utilizados, o processo de instalação, explica o método de análise dos dados e como se procede para a correcção de erros sistemáticos.

Doran (2008) e Ribeiro (2009), também se basearam na norma ISO 9869 (1994) e descrevem de forma detalhada as condicionantes na aplicação desta norma e os métodos de cálculo. Doran (2008), analisou os dados obtidos em 29 casos de estudo construídos com diferentes soluções construtivas, antes e depois da aplicação de isolamento, utilizando a norma ISO 9869 (1994) e comparou os resultados do coeficiente de transmissão térmica obtidos com os valores obtidos pela norma ISO 6946 (2007). Esta segunda norma define o método de cálculo do valor U dos elementos da envolvente dos edifícios, baseando-se nos valores conhecidos de condutibilidade térmica ou na resistência térmica dos materiais que os constituem. Os resultados obtidos através da medição do fluxo de calor foram à volta de 30% superiores aos calculados pela norma ISO 6946. Foi também proposto no presente estudo o cálculo de um parâmetro ΔU (factor de correcção do factor U) que pudesse corrigir esse aumento, porém não se irá abordar esta questão nesta análise.

4.3.3.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO

O método da média progressiva permite calcular o coeficiente de transmissão térmica (U) com base nos dados registados dos fluxos de calor e das temperaturas. Para cada instante, são calculados valores médios em todos os instantes anteriores, em vez de valores pontuais do fluxo e da temperatura. Os valores médios do fluxo, temperaturas e do coeficiente de transmissão térmica (U) são, posteriormente, apresentados numa tabela, para cada instante calculado. É esperado que o valor do coeficiente U convirja ao longo de uma assíntota que será o valor final de U com um desvio padrão de 0.05 W/m²K.

O coeficiente de transmissão térmica (U) pode assim ser calculado pelo fluxo medido por um fluxímetro e pelas temperaturas ambiente exterior e interior segundo a equação 4.2.

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} \quad (\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (4.2)$$

onde:

U – coeficiente de transmissão térmica (W/m².°C);

q_j – média diária do fluxo de calor no dia j (W/m²);

T_{ij} – média diária da temperatura ambiente interior no dia j (°C);

T_{ej} – média diária da temperatura ambiente exterior no dia j (°C).

A equação 4.1. indica que o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) é o resultado da divisão do somatório das médias diárias do fluxo de calor (q) pela diferença dos somatórios das médias diárias da temperatura ambiente interior e da temperatura interior durante um período de dias j.

4.3.3.2 METODOLOGIA DE INSTALAÇÃO E CONDICIONANTES

Neste subcapítulo são inumeradas as condicionantes tanto a nível de instalação do equipamento como da localização e das condições meteorológicas ideais à realização dos ensaios aquando a aplicação da norma ISO 9869 (1994). Para que o ensaio seja relativamente fiável deve-se instalar o equipamento cumprindo as seguintes regras (Doran, 2008):

- as sondas devem ser instaladas numa zona representativa da área total da parede em estudo evitando a proximidade a pontes térmicas;
- o fluxímetro deve ser instalado na face interior da parede em estudo;
- posicionar o termómetros interior perto do fluxímetro e de forma a que corresponda aproximadamente ao termómetro do lado exterior;
- evitar a instalação de equipamento exposto directamente à radiação solar;
- maximizar o ΔT entre o ambiente interior e exterior;
- assegurar que o fluxímetro adere bem à superfície da parede;
- se possível, escolher uma parede orientada a Norte;
- proximidade a uma janela ou porta tem de ser pelo menos superior a 400 mm para garantir um nível de confiança 100 %.

A Tabela 4.17 indica, para algumas das condicionantes atrás referidas, o nível de confiança a ter no ensaio. No subcapítulo 4.1.2. foi descrita e ilustrada a localização das sondas em cada um dos casos de estudo (Figura 4.2, Figura 4.6 e Figura 4.9). Verifica-se que a maioria das condicionantes referidas não foi cumprida.

Tabela 4.17 - Tabela utilizada por Doran (2008) para determinar o nível de confiança dos resultados obtidos (Doran, 2008).

Tipo de nível de confiança	Condições óptimas	Condições menos favoráveis
Associado à diferença entre as temperaturas interior e exterior	Se a diferença entre as médias das temperaturas interior e exterior for maior do que 10 °C, o nível de confiança é de 100%	Se a diferença está entre 5 e 10 °C, o nível de confiança é igual à diferença entre as temperaturas dividida por 10. Se a diferença for inferior a 5 °C, o nível de confiança é 0.
Associado à distância entre o ponto de medição à abertura para o exterior mais próxima	Se a distância for de pelo menos 400 mm, o nível de confiança é de 100%	Se a distância for menos de 400 mm, o nível de confiança é de 80%
Associado com a orientação da parede monitorizada	Se a fachada é orientada a Norte, Noroeste, Este, Oeste ou Nordeste, o nível de confiança é de 100%	Se a fachada é orientada a Sudeste, Sudoeste ou a Sul, o nível de confiança é de 80%

No CS2, apenas foi possível colocar a sonda perto de uma ponte térmica, devido ao comprimento dos fios. Os termopares, que registam a temperatura ambiente interior, não foram localizados em paralelo com o fluxímetro, como sugerido. Em vez disso, foram instalados, no caso da temperatura ambiente interior, no centro da sala a uma altura de 1,80 m do chão, e, no caso da temperatura ambiente exterior, foi colocada por baixo da verga da porta/janela, protegida da incidência directa da radiação solar.

No caso de estudo 1 e 3, a fachada monitorizada foi a fachada orientada a Sul e no caso de estudo 2 a fachada monitorizada foi a fachada orientada a Oeste, pelo que o nível de confiança será de 80% e 100% respectivamente.

Ambas as campanhas, nos três casos de estudo, foram efectuadas durante as estações do ano com características extremas: durante o Inverno, onde, normalmente as temperaturas são mais baixas e

durante o Verão para os dias mais quentes. Desta forma, é mais provável obter uma diferença maior entre as temperaturas ambiente interior e exterior. No entanto, pelas Tabela 4.5, Tabela 4.6, Tabela 4.7, Tabela 4.11 e Tabela 4.12, que apresentam os valores médios da radiação solar incidente no plano vertical da fachada monitorizada e das temperaturas ambiente exterior e interior, verifica-se que em nenhum dos casos de estudo, em qualquer uma das campanhas, a diferença foi superior a 5 °C. Assim, segundo Doran (2008), o nível de confiança nos resultados é muito baixo.

Por fim, nos dois casos de estudo, 1 e 3, em que as sondas estão na proximidade da janela, pela Figura 4.2 e Figura 4.9 verifica-se que a distância é superior a 400 mm.

4.3.3.3 ESPECIFICAÇÕES DO ENSAIO

Segundo a norma ISO 9869 (1994) existem três especificações a cumprir para que o ensaio seja confiável:

- a duração mínima dos ensaios deve ser de 72 horas (3 dias), no caso de as temperaturas se mostrarem estabilizadas, caso contrário, deverá ter uma duração de sete dias. O período ideal pode ser determinado durante o ensaio através do controlo dos resultados obtidos;
- os valores devem ser obtidos sem qualquer tipo de interrupção do processo;
- é recomendado que a aquisição dos dados seja feita com intervalos de tempo regulares que dependem do método utilizado para a análise dos dados. Normalmente, este intervalo é de 0,5-1 hora para o método da média progressiva.

Para além das três especificações descritas, para o método de cálculo descrito anteriormente, é também necessário considerar que o fluxo térmico não seja demasiado reduzido - com uma média próxima do 5 W/m² - e que a $\Delta T > 10$ °C (Doran, 2008).

Neste caso, para paredes com uma forte inércia térmica, como as paredes de taipa em análise, é preciso ter em consideração o efeito de armazenamento térmico. Segundo Ribeiro (2009) os valores U obtidos pelo método da média progressiva, são apenas aproximações ao valor real devido aos efeitos de armazenamento térmico que não são contabilizados. Muitas vezes o resultado de U pode ser negativo quando os valores das temperaturas se aproximam. Doran (2008) concluiu que duas semanas de período de medição eram suficientes para desprezar o efeito do armazenamento térmico, apesar de quanto maior for o período de medição maior o nível de precisão dos valores.

Infelizmente, por falta de tempo, pelos custos da deslocação e pela disponibilidade dos moradores, nem sempre foi possível monitorizar os casos de estudo durante o tempo recomendado pela norma, pelo que alguns casos têm uma amostra com períodos de tempo inferiores, de 7 dias no CS1. No subcapítulo 4.2.1. pode observar-se os períodos de monitorização de cada caso de estudo.

Tendo em consideração todos os pontos atrás referidos, tanto na metodologia de instalação como nas especificações do ensaio, os resultados obtidos apresentaram um nível de confiança muito reduzido. Devido à intensidade do fluxo interior ser bastante reduzida, como se verificou através dos gráficos do subcapítulo 4.2.1, nos quais o fluxo interior raramente ultrapassa os 5 W/m², a média diária será bastante inferior a esse valor. Contrária, assim, uma das especificações do ensaio.

Adicionalmente, como os casos de estudo se encontram-se desabitados, a diferença entre as médias das temperaturas ambiente interior e exterior, na maioria dos dias, não ultrapassa os 5 °C (Tabela 4.5, Tabela 4.6, Tabela 4.7, Tabela 4.11 e Tabela 4.12). Assim, o cálculo do valor U foi fortemente influenciado pelos factores referidos e os resultados obtidos através da aplicação do método da média progressiva foram bastante insatisfatórios, como se pode observar de seguida.

4.3.3.4 RESULTADOS – MÉDIAS DIÁRIAS

Pelos motivos apresentados, os resultados obtidos apresentaram-se bastante incoerentes e instáveis, contrariamente ao esperado. Assim, ao analisar os resultados dos três casos de estudo, conclui-se que o método da média progressiva não poderia ser aplicado com base nos dados obtidos na campanha de monitorização. Desta forma, neste subcapítulo, são apresentados, em forma de tabela, e a título de exemplo, apenas os resultados obtidos através do método da média progressiva no caso de estudo 1, para as campanhas de Verão e de Inverno. Os restantes resultados apresentam-se no Anexo V.

Caso de estudo 1 – Campanha de Inverno

A Tabela 4.18 apresenta os valores médios diários do fluxo interior, da temperatura ambiente interior e exterior, diferença entre os valores médios diários de T_i e T_e e valor de U após 5 e 8 dias de medições da campanha de Inverno do caso de estudo 1. Verifica-se que os valores médios do fluxo interior são sempre inferiores a 5 W/m^2 , à excepção do dia 11 de Fevereiro, e que a diferença entre os valores médios diários de T_i e de T_e está entre os $-1,25 \text{ }^\circ\text{C}$ e os $2,99 \text{ }^\circ\text{C}$. Pelos dados apresentados na Tabela 4.18, obteve-se valores de U bastante diferentes do valor esperado e dispares entre si, pelo que são inconclusivos e pouco fiáveis para a determinação do coeficiente de transmissão térmica.

Tabela 4.18 – Valores médios diários do fluxo interior, da temperatura ambiente interior e exterior, diferença entre os valores médios diários de T_i e T_e e valor de U após 5 e 8 dias de medições da campanha de Inverno do caso de estudo 1.

Data	q_i (W/m^2)	T_i ($^\circ\text{C}$)	T_e ($^\circ\text{C}$)	$T_i - T_e$	$U_{5\text{dia}}$	$U_{8\text{dia}}$
05-fev	4.43	11.69	12.94	-1.25	-	-
06-fev	1.43	11.11	10.37	0.74	-	-
07-fev	3.15	10.68	10.43	0.25	-	-
08-fev	3.58	10.69	10.35	0.34	-	-
09-fev	2.79	10.59	9.71	0.88	16.02	-
10-fev	1.22	9.41	6.42	2.99	2.34	-
11-fev	5.68	9.45	7.89	1.56	2.73	4.04
Média	4.01	10.50	10.22	0.28	3.72	4.04

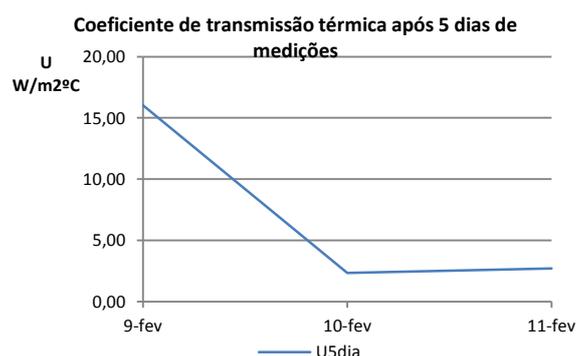


Figura 4.33 – Coeficiente de transmissão térmica após 5 dias de medições.

Caso de estudo 1 – Campanha de Verão

A Tabela 4.19 apresenta os valores médios diários do fluxo interior, da temperatura ambiente interior e exterior, diferença entre os valores médios diários de T_i e T_e , valor de U após 5, 10, 15 e 20 dias de medições da campanha de Verão do caso de estudo 1. Pela tabela verifica-se que, mesmo apesar dos

valores médios diários do fluxo interior e da diferença entre os valores médios diários de T_i e T_e serem inferiores a 5 W/m^2 e $5 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente, os valores obtidos são mais coerentes entre si do que na campanha de inverno deste caso de estudo 1.

Tabela 4.19 - Valores médios diários do fluxo interior, da temperatura ambiente interior e exterior, diferença entre os valores médios diários de T_i e T_e e valor de U após 5, 10, 15 e 20 dias de medições da campanha de Verão do caso de estudo 1.

Date	$q_i \text{ (W/m}^2\text{)}$	$T_i \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_e \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_i - T_e$	$U_{5\text{dia}}$	$U_{10\text{dia}}$	$U_{15\text{dia}}$	$U_{20\text{dia}}$
26-mai	3.44	17.30	13.66	3.64				
27-mai	-0.93	16.49	14.84	1.65				
28-mai	0.97	16.46	13.67	2.79				
29-mai	-1.97	15.99	14.09	1.90				
30-mai	-1.76	15.96	15.61	0.35	-0.02			
31-mai	-2.69	17.21	18.60	-1.39	-1.20			
01-jun	-2.04	18.37	20.28	-1.91	-4.30			
02-jun	-2.03	19.95	21.75	-1.80	3.69			
03-jun	-1.15	21.14	22.69	-1.55	1.54			
04-jun	0.61	21.44	21.57	-0.13	1.08	-2.12		
05-jun	1.92	21.06	18.74	2.32	0.88	-4.05		
06-jun	1.72	19.51	16.21	3.30	0.50	-1.65		
07-jun	0.13	18.18	14.36	3.82	0.42	-1.48		
08-jun	-2.05	16.95	14.62	2.33	0.20	-1.38		
09-jun	-3.10	16.49	15.10	1.39	-0.10	-1.36	-0.53	
10-jun	-2.88	16.49	15.37	1.12	-0.52	-1.00	-1.07	
11-jun	-4.18	17.21	18.38	-1.17	-1.61	-1.14	-1.63	
12-jun	-2.54	19.14	18.95	0.18	-3.83	-0.99	-2.51	
13-jun	-0.05	19.81	19.68	0.13	-7.69	-0.78	-2.87	
14-jun	1.58	19.67	18.67	1.00	-6.38	-0.66	-2.19	-0.95
Média	-0.85	18.24	17.34	0.90	-1.09	-1.51	-2.06	-0.95

Ainda assim, para os valores de U em médias em 5 dias, obtiveram-se valores muito díspares e a grande maioria dos valores tem sinal negativo devido ao efeito de armazenamento de calor. De facto, tal como apontado por Doran (2008), a elevada inércia térmica pode conduzir a valores de cálculo do coeficiente de transmissão térmica por este método negativos.

No caso do valor U após 10 dias de medições os resultados de U são mais estáveis do que os anteriores. À excepção dos dias 4 e 5 de Junho em que o valor U obtido é muito elevado, o valor de U nos restantes dias manteve-se entre $-1,65$ e $-0,66 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Porém a variação dos valores de U entre dias consecutivos é sempre superior a 5% logo não é fiável determinar um valor para U com base nestes valores. O mesmo acontece para os valores de U após 15 dias de medições.

Por sua vez, o valor U ao fim de 20 dias de medições o valor apresentado é de $-0,95 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Apesar de ser valor próximo do valor de referência, em valor absoluto, não é completamente fiável devido aos factores referidos.

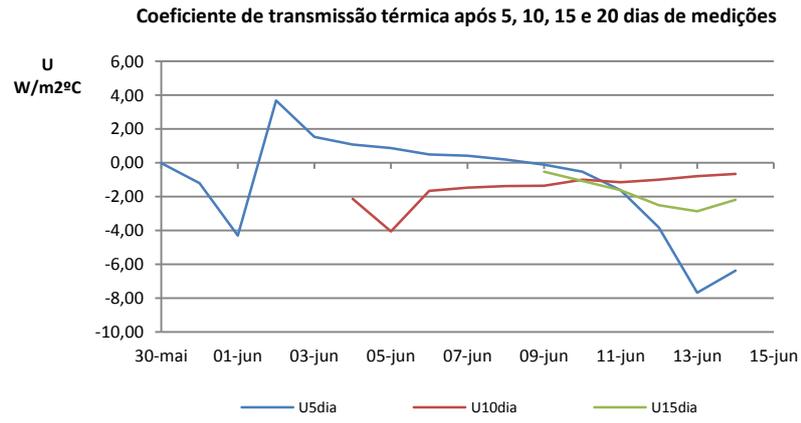


Figura 4.34 – Coeficiente de transmissão térmica após 5 dias de medições.

5. COMPORTAMENTO TÉRMICO DE BLOCOS DE TERRA COMPRIMIDA COM INCORPORAÇÃO DE MATERIAIS ISOLANTES

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente capítulo está inserido num trabalho de investigação desenvolvido em paralelo com o tema principal deste trabalho de investigação. De facto, face aos resultados obtidos na monitorização térmica dos 3 casos de estudo com paredes em taipa, sentiu-se necessidade de explorar de que forma seria possível melhorar termicamente as soluções de construção em terra. A utilização de blocos de terra comprimida com desempenho térmico melhorado, possibilita também aumentar a velocidade do processo de construção e a sua industrialização.

Com esse objectivo, foi conduzido um trabalho experimental de determinação da condutibilidade térmica de blocos de terra comprimida (BTC) com a incorporação de diferentes materiais isolantes, para diferentes teores de humidade e tempos de secagem.

Neste capítulo é apresentada uma descrição resumida do trabalho e os seus principais resultados, por forma a sintetizar os aspectos mais relevantes desenvolvidos neste tema.

5.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A campanha experimental com os BTCs envolveu dois tipos de terra diferentes e três tipos de material isolante (granulado de cortiça, argila expandida (LECA) e vermiculite).

Entre outros ensaios, a terra utilizada para a produção dos BTC é normalmente caracterizada quanto à sua massa volúmica, granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade. No entanto, como não foi possível realizar estes ensaios *in situ* foram realizados testes expeditos que, duma forma menos precisa, caracterizam as propriedades da terra. Assim, apenas se consegue avaliar as terras qualitativamente, pelo que os resultados serão apresentados comparando os dois tipos de terra em vez de uma caracterização detalhada da percentagem de cada constituinte da mistura (areia, silte e argila) e os seus respectivos limites de Atterberg.

Os BTCs de referência foram produzidos com uma composição pré-definida, que tem sido utilizada com sucesso pelo produtor. Os ensaios experimentais envolveram a medição da condutibilidade térmica, difusividade térmica e calor específico volumétrico, tendo em conta três níveis de teor de humidade: amostras secas em estufa; amostras saturadas; amostras secas ao longo de 28 dias em condições de humidade relativa de cerca de 60-70% HR.

Os BTCs foram produzidos no Telheiro da Encosta do Castelo, em Montemor-o-Novo, Alentejo, utilizando uma prensa manual Appro Techno[®], modelo Terstaram.

5.2.1 TERRA

Inicialmente foram seleccionados três tipos de terra da Herdade da Adua, Montemor-o-Novo, Alentejo. No entanto, uma das terras não foi utilizada devido à elevada percentagem de areia na sua constituição e, portanto, apenas se realizaram os testes utilizando dois tipos de terra que se encontram representadas na Figura 5.1.

Como referido, apenas foram realizados testes expeditos para a caracterização da terra Tipo I e Tipo II. O primeiro teste consiste na simples observação da cor. Na terra Tipo I identifica-se claramente um tom acastanhado que indica a presença de argila. Se a terra apresentasse um tom mais claro ou mais amarelado indicaria que a terra era muito arenosa ou siltosa. Por outro lado, a terra Tipo II apresenta

um tom escuro indicando, provavelmente, a presença de matéria orgânica. A matéria orgânica torna-se mais evidente pela criação de bolor nas amostras, contrariamente ao que acontece nas amostras da terra Tipo I.



a.



b.



Figura 5.1 - a. Terra Tipo I; b. Terra Tipo II.

Figura 5.2 – Teste da sedimentação. Terra Tipo I e Tipo II (da esquerda para a direita).



a.



b.



c.



d.

Figura 5.3 - a. Teste de retracção – terra Tipo I; b. Teste de retracção – terra Tipo II; c. Teste à flexão – terra Tipo I; d. Teste à flexão - terra Tipo II.

Também foi realizado o teste da sedimentação. Este teste consiste no enchimento de um recipiente com 25% de terra e 75% de água que durante 45 minutos deve permanecer em repouso e bem coberto. Após esse tempo o recipiente é fortemente agitado e deve repousar durante um período de uma hora. Em seguida, a terra é agitada novamente e deixada a repousar durante pelo menos mais 45 minutos. Pela força da gravidade, as partículas mais pesadas serão as primeiras a estagnar no fundo do recipiente pelo que, no final do ensaio, as partículas maiores e mais pesadas estarão no fundo e as mais leves por cima, sendo possível distinguir diferentes camadas de elementos (areia, silte e argila). As camadas terão espessuras diferentes dependendo da percentagem de areia, silte e argila contidos na amostra de terra. A Figura 5.2 apresenta os resultados obtidos no teste para ambas as terras. Na terra Tipo I é possível

distinguir os diferentes constituintes, enquanto na terra Tipo II, é difícil diferenciar as camadas. A partir deste teste conclui-se que, pela espessura das camadas, a terra Tipo I contém mais argila do que areia. A terra Tipo II contém essencialmente argila uma vez que as dimensões dos grãos são pouco visíveis.

Foram, por último, realizados outros três testes expeditos, nomeadamente o teste de retracção (Figura 5.3, a. e b.), o teste de flexão (Figura 5.3, c. e d.) e o teste do rolo (descrito no capítulo 2.3.2), comprovando que a terra Tipo II é mais argilosa que a terra Tipo I. Os testes referidos tiveram como referência bibliográfica Minke (1994) detalhados no capítulo 3.

5.2.2 MATERIAIS ISOLANTES INCORPORADOS

Por forma a melhorar termicamente os blocos de terra comprimida (BTC) foram incorporados três tipos de materiais isolantes (Figura 5.4) cujas características estão descritas na Tabela 5.1.

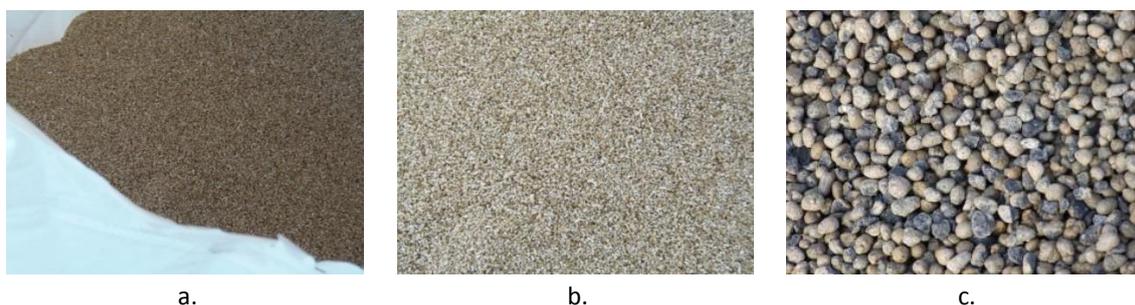


Figura 5.4 - Agregados utilizados. a. Granulado de cortiça; b. Vermiculite; c. LECA.

Tabela 5.1 – Características de dimensão das partículas, massa volúmica e condutibilidade térmica dos agregados incorporados.

Material	Dimensão das partículas [mm]	Massa volúmica [kg/m ³]	Condutibilidade Térmica [W/m ² C]
Granulado de cortiça	0.5-2	70-75	0.048
Vermiculite	1.0-2.0	80-150	0.070
Agregado de argila expandida (LECA)	4.0/8.0	380-710	0,09-0.101

5.2.3 MISTURAS

Foram estabelecidos diferentes misturas com os dois tipos de terras e os três tipos de materiais isolantes por forma a analisar a influência do tipo de terra e do tipo e quantidade de material isolante na condutibilidade térmica dos BTCs. Os BTCs foram produzidos variando a quantidade de terra, o teor de humidade e a percentagem de material isolante.

A Tabela 5.2 apresenta as proporções das misturas das diferentes composições dos BTCs. A amostra A1_N é o BTC de referência utilizando a terra Tipo I e sem qualquer agregado. Da amostra A1_C à A4_C os BTCs foram produzidos com granulado de cortiça, de A1_V à A4_V com vermiculite e de A1_L à A2_L com LECA. Nas misturas a quantidade de água total foi aumentando tendo em conta a quantidade de água absorvida pelos agregados, uma vez que é necessária água suficiente para activar as propriedades ligantes das partículas de argila. No entanto, a imersão prévia dos agregados pode reduzir este efeito. Como a terra Tipo II se encontrava ainda bastante húmida devido à chuva, não foi necessária a adição de água na mistura. A mistura foi feita num grande recipiente para que a água fosse distribuída uniformemente e não se formassem grânulos (Figura 5.5, a.). Importa referir ainda que a percentagem de agregado é em relação à massa da amostra.

Durante a libertação da prensa, as amostras com granulado de cortiça expandiram bastante devido à resiliência da cortiça, originando um aumento de cerca de 15 mm de altura entre a amostra A4_C e o BTC de referência (A1_N). Este fenómeno de descompressão faz com que o BTC fique menos coeso, prejudicando algumas propriedades físicas e mecânicas dos blocos com granulado de cortiça.

Tabela 5.2 – Proporções das misturas

BTC	Terra Tipo I	Terra Tipo II	Água	Agregado	
	[g]	[g]		[g]	[%]
A1_N	7000	-	350	-	0
A1_C	7000	-	700	35	0,5
A2_C	7000	-	700	70	1
A3_C	7000	-	700	105	1,5
A4_C	7000	-	700	140	2,0
A1_V	7000	-	500	35	0,5
A2_V	7000	-	500	70	1
A3_V	7000	-	500	105	1,5
A4_V	7000	-	700	140	2,0
A1_L	6500	-	500	325	5,0
A2_L	6000	-	700	650	10,0
A1_N2	-	7000	-	-	0
A1_L2	-	6500	-	325	5,0
A2_L2	-	6000	-	650	10,0
A3_L2	-	5500	-	1300	20,0

5.2.4 PRODUÇÃO DOS BTCs

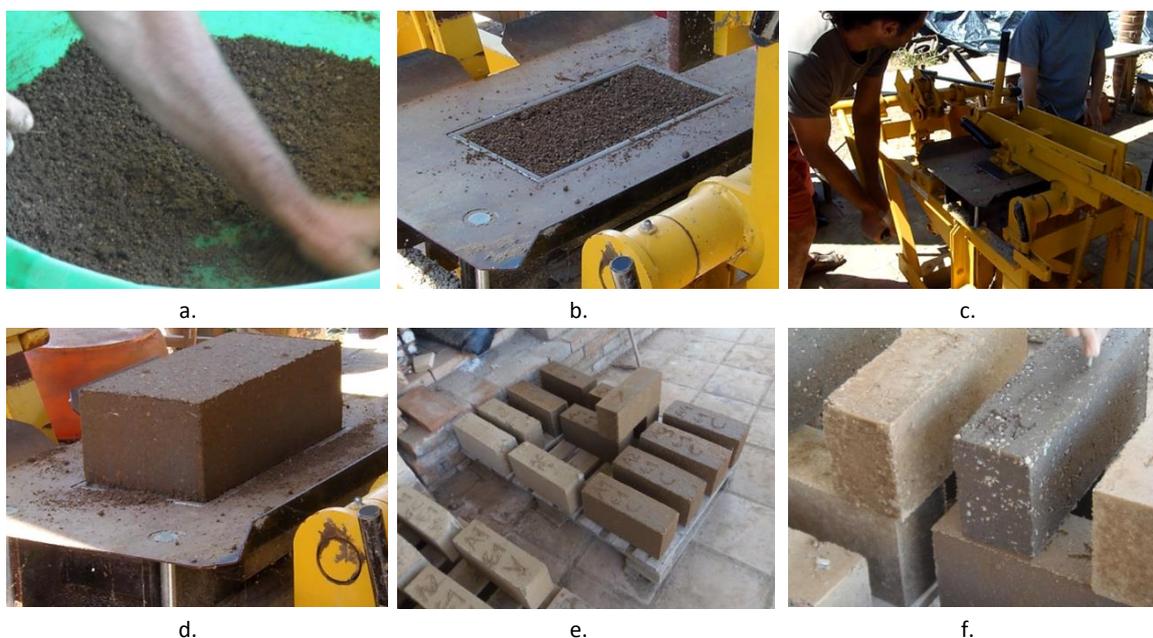


Figura 5.5 - Sequência da produção do BTC: a. Progresso de mistura; b. Preenchimento da prensa manual; c. Produção; d. e f. Produto final-BTC.

A prensa utilizada na produção dos BTCs foi uma prensa manual da Apro Techno[®], modelo Terstaram. Esta prensa é operada manualmente e tem uma capacidade máxima de 15 toneladas. O produto final pode variar a sua altura de 30 a 100 mm e as dimensões máximas do bloco são 29,5 x 14 x 9 cm. A massa volúmica dos BTCs com estas dimensões é de 1,8 a 2,1 kg/m³ e a sua resistência à compressão é de cerca de 40 a 120 kg/cm², dependendo também da qualidade da terra. A Figura 5.5 apresenta o processo de produção do BTC e o produto final.

5.2.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

No presente trabalho foram medidas as propriedades térmicas de condutibilidade térmica (λ), difusividade térmica (α) e calor específico volumétrico (c_p), com ao equipamento ISOMET 2114 utilizando uma sonda plana já referido anteriormente, de alguns blocos de terra comprimida com incorporação de diferentes materiais isolantes. A gama de medição de cada uma destas grandezas e os erros associados à sua medição encontram-se indicados no capítulo 4.2.2.

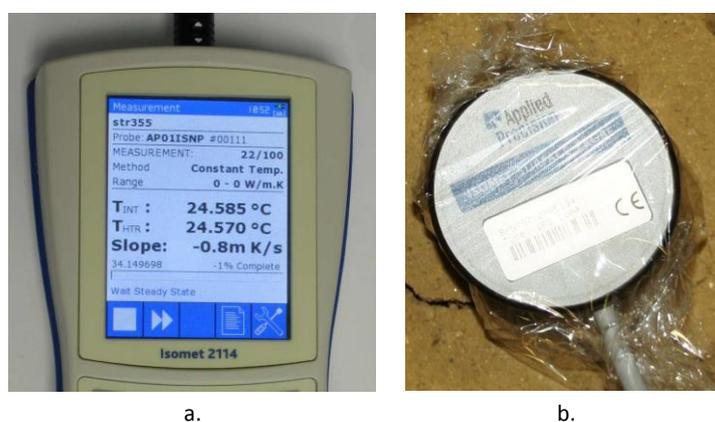


Figura 5.6 - a. ISOMET 2114 (Manual ISOMET2114); b. Teste em curso

A condutibilidade térmica foi medida após 3, 5, 7, 9, 17, 20, 23, 26, 30 e 34 dias da produção. Seguidamente, os BTCs foram colocados numa câmara de saturação protegidos da água directa para que ficassem totalmente saturados e foram novamente ensaiados. Infelizmente, algumas amostras não ficaram totalmente protegidas da água e desintegraram-se parcialmente. Posteriormente, os BTCs foram secos em estufa até atingirem massa constante sendo possível medir a condutibilidade térmica das amostras no estado seco. Foram realizados três ensaios para cada amostra, cujos resultados são apresentados no subcapítulo seguinte.

5.2.6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A Tabela 5.3 apresenta os resultados da condutibilidade térmica obtidos consoante o tipo de terra e o tipo de material isolante utilizado. Para cada tipo de terra, o BTC de referência (A1_N e A1_N2) não inclui na mistura qualquer tipo de material isolante.

À primeira vista, dificilmente se observa uma clara tendência da evolução da condutibilidade térmica das misturas dos BTCs. Naturalmente, quando os BTCs estavam húmidos, no início do tempo de cura e depois quando foram colocados na câmara saturada, a condutibilidade térmica atingiu o valor máximo para cada uma das amostras. No entanto, as amostras A3_C e A4_C registaram resultados anómalos em condições de saturação causados, provavelmente, pela sua desintegração.

Tal como esperado, o valor da condutibilidade térmica diminuiu à medida que os BTCs iam sendo sujeitos ao processo de cura e, logo, iam ficando mais secos (Tabela 5.3). As amostras com o granulado de cortiça apresentaram o valor mais reduzido de condutibilidade térmica (Tabela 5.3). Porém, como mencionado, estas amostras sofreram uma expansão relevante durante a sua produção tendo prejudicado as suas propriedades físicas e mecânicas. Efectivamente, verificou-se que estes blocos tornaram-se menos coesos e inclusive com o aparecimento de várias fendas, como se observa na Figura 5.7, a. Assim, a resistência à água foi fortemente afectada e, uma vez submetidos a condições de saturação, ocorreu a desintegração (Figura 5.7. b.).

Tabela 5.3 - Condutibilidade térmica dos BTCs ao longo do tempo de cura.

Amostra	Material Isolante		Condutibilidade Térmica (W/m°C)											Saturados	Secos
	Tipo	% (massa da terra)	3 dias	5 dias	7 dias	9 dias	17 dias	20 dias	23 dias	26 dias	30 dias	34 dias			
Terra Tipo I	A1_N	-	0	1.03	0.70	0.63	0.62	0.61	0.59	0.60	0.59	0.58	0.58	1.50	0.49
	A1_C	Cortiça	0,5	0.98	0.73	0.61	0.55	0.57	0.22	0.56	0.55	0.53	0.50	1.37	0.40
	A2_C	Cortiça	1,0	0.69	0.43	0.38	0.33	0.33	0.31	0.33	0.32	0.33	0.32	1.03	0.27
	A3_C	Cortiça	1,5	0.46	0.26	0.21	0.23	0.21	0.22	0.21	0.22	0.22	0.23	0.25	0.20
	A4_C	Cortiça	2,0	0.58	0.35	0.29	0.28	0.27	0.27	0.28	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25
	A1_V	Vermiculite	0,5	1.35	1.21	0.97	0.79	0.78	0.74	0.74	0.76	0.74	0.70	0.73	0.64
	A2_V	Vermiculite	1,0	1.10	0.78	0.69	0.64	0.66	0.64	0.63	0.63	0.62	0.61	0.63	0.58
	A3_V	Vermiculite	1,5	1.12	0.84	0.75	0.68	0.71	0.71	0.70	0.70	0.69	0.69	0.72	0.64
	A4_V	Vermiculite	2,0	1.30	1.04	0.84	0.72	0.67	0.68	0.73	0.74	0.72	0.72	1.31	0.43
	Terra Tipo II	A1_L	LECA	5,0	1.10	0.85	0.70	0.63	0.63	0.62	0.61	0.61	0.42	0.60	0.57
A2_L		LECA	10,0	1.21	1.08	0.93	0.71	0.68	0.64	0.63	0.63	0.62	0.59	0.66	0.54
A1_N2		-	0	1.23	1.08	0.93	0.77	0.74	0.66	0.74	0.69	0.72	0.65	1.39	0.50
A1_L2		LECA	5,0	1.08	0.86	0.83	0.71	0.72	0.61	0.66	0.68	0.66	0.57	1.00	0.48
A2_L2		LECA	10,0	0.93	0.74	0.62	0.47	0.49	0.35	0.46	0.45	0.42	0.39	0.44	0.39
A3_L2		LECA	20,0	1.17	1.07	0.89	0.63	0.72	0.61	0.65	0.61	0.62	0.60	0.60	0.55

Por outro lado, como os blocos com vermiculite ou LECA não expandiram após a descompressão da prensa, não se desenvolveram fendas relevantes (Figura 5.7. c.). Todos os restantes blocos mostraram uma boa coesão ao longo do tempo, mesmo depois de terem sido colocados na câmara de saturação. No entanto, ao se utilizar a terra Tipo II na produção dos blocos, a sua resistência à água foi também fortemente reduzida, observando-se alguma desintegração nos blocos.

Importa salientar que os blocos com LECA são os mais heterogéneos (Figura 5.7. c.). Por esse motivo, os valores da condutibilidade térmica medidos apresentaram uma maior variabilidade. Portanto, não é possível obter valores precisos medindo num único ponto do bloco, pode ser bem diferente dum ponto que contenha menor quantidade de LECA à superfície.

A Figura 5.8 mostra a condutibilidade térmica ao longo do tempo de cura para cada tipo de BTC produzido neste estudo. Os resultados estão organizados por forma a comparar facilmente os BTCs de referência (A1_N e A1_N2) com os produzidos com materiais isolantes (granulado de cortiça – C, vermiculite – V e granulado de cortiça expandida – L).

Observando os dois BTCs de referência, sem incorporação de qualquer material isolante, os blocos produzidos com a terra Tipo I apresentam um valor da condutibilidade térmica sempre inferior aos blocos produzidos com a terra Tipo II. Importa lembrar que a terra Tipo II estava inicialmente mais húmida, e portanto, o teor de humidade da amostra A1_N2 foi sempre superior.

Em geral, todos os blocos apresentaram uma redução bastante acentuada da condutibilidade térmica durante os primeiros nove dias de secagem nas condições de humidade relativa e de temperatura do laboratório (Figura 5.8). Após este período inicial, a condutibilidade térmica estabiliza num valor de: 0,6-0,8 W/m°C (misturas de referência); 0,2-0,4 W/m°C (mistura de granulado de cortiça); 0,6-0,8 W/m°C (mistura de vermiculite); 0,4-0,7 W/m°C (mistura de LECA).

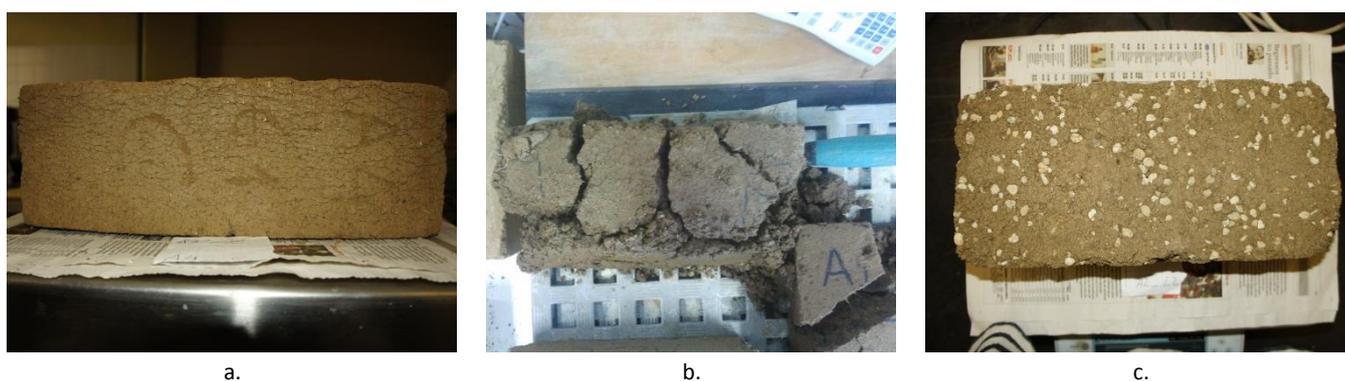


Figura 5.7 - a. Expansão e fissuração da amostra com granulado de cortiça, A4_C, após 26 dias de cura de laboratório; b. Desintegração da amostra de granulado de cortiça, A2_C, após ter sido colocada na câmara de saturação; c. Amostra com LECA, A2_L2, após 26 dias de cura em laboratório.

Tal como se pode observar na Figura 5.8. b., a condutibilidade térmica diminuiu com o aumento da percentagem de granulada cortiça na mistura. Esta tendência foi menos evidente com a incorporação de vermiculite ou LECA, como será discutido posteriormente. Com a exceção da amostra A4_C com 2% de granulado de cortiça, em que a condutibilidade térmica foi ligeiramente mais elevada do que a obtida na amostra com 1,5% de granulado de cortiça (A3_C). Esta diferença pode ser atribuída à expansão e subsequente perda de coesão durante a produção dos BTCs com granulado de cortiça.

Destaca-se a relevante melhoria das propriedades térmicas entre os BTCs produzidos com 0,5% de granulado de cortiça daqueles produzidos com mais de 1% desse granulado. Os resultados obtidos sugerem um teor de granulado de cortiça ideal de 1,5%, no caso de apenas se ter em conta o desempenho térmico dos BTCs.

A incorporação de agregados de vermiculite na mistura não foi eficaz na redução da condutibilidade térmica (Figura 5.8, c.). Apenas para as amostras saturadas se verificou uma redução significativa da condutibilidade térmica. Para além disso, verificou-se que a condutibilidade térmica diminuiu à medida que o teor de vermiculite aumenta até 1%. Por outro lado, a adição de maior quantidade de vermiculite até 2% conduziu a um aumento proporcional da condutibilidade térmica. Portanto, foi obtido um conteúdo ideal de 1 % de vermiculite. Contudo, as pequenas diferenças obtidas para os diferentes conteúdos de vermiculite podem resultar, em parte, da variabilidade do próprio ensaio.

Relativamente à incorporação de agregado de argila expandida (LECA), esta também não se revelou muito eficaz na redução da condutibilidade térmica, especialmente quando foi utilizada a terra Tipo I. Apenas a incorporação de 10 % de LECA na terra Tipo II apresentou uma redução média de cerca de 30-

40% na condutibilidade térmica. Esta tendência também é evidente quando as amostras estão completamente saturadas (Tabela 5.3). No entanto, o mesmo não se observa para as amostras secas, o que sugere que a tendência observada é essencialmente devido às condições de humidade dos BTCs.

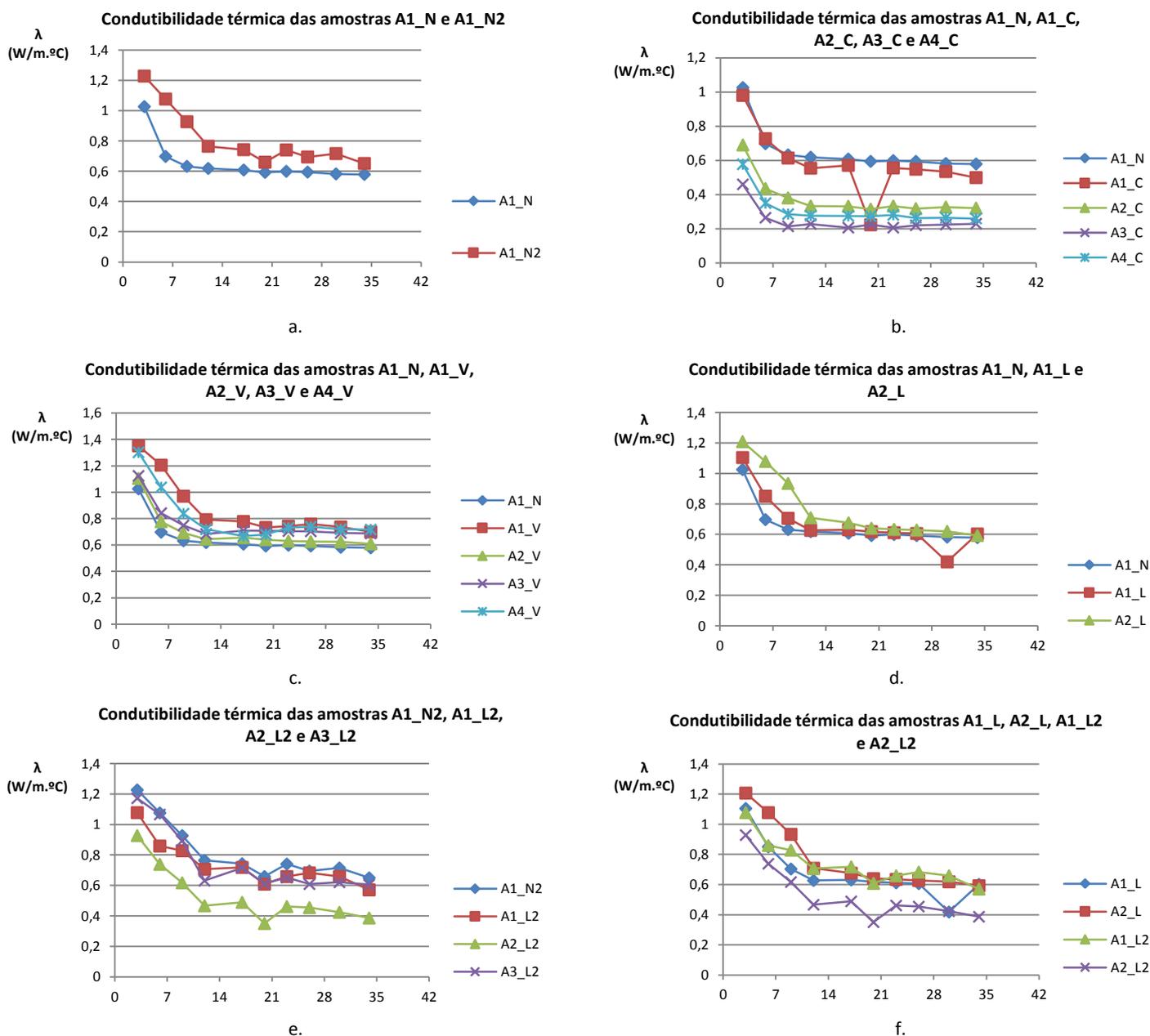


Figura 5.8 – Condutibilidade térmica ao longo do tempo para cada BTC produzido com diferentes tipos de agregados – condições de cura de laboratório.

Os testes foram fortemente influenciados pelo teor de humidade das amostras. Isso justifica parcialmente as diferenças obtidas entre os BTCs de referência e as amostras produzidas com vermiculite e LECA. Por um lado, tendo em conta os blocos nas condições de cura de laboratório, os BTCs com vermiculite e LECA apresentaram um teor de humidade mais elevado, uma vez que absorveram maior quantidade de água durante a sua produção devido à porosidade dos materiais. Como consequência, os valores da condutibilidade térmica foram superiores aos BTCs de referência. Por outro lado, nas amostras secas, estado em que o teor de humidade é semelhante entre as amostras, a diferença obtida da condutibilidade térmica entre os BTCs de referência e as amostras de vermiculite e LECA é inferior.

Para as condições de cura de laboratório (ambiente natural), o teor de humidade do BTC pode variar bastante entre as amostras, o que dificulta a comparação entre as diferentes misturas. Uma comparação mais precisa pode ser feita quando as amostras estão ou completamente saturadas ou completamente secas (Figura 5.9, a. e Figura 5.9, b.). No entanto, foi observada uma tendência similar nas amostras em estado seco com a variação da percentagem de material isolante.

Em condições de saturação, os resultados foram fortemente afectados pelo teor de humidade e o grau de desintegração das amostras. Isso explica os valores mais elevados obtidos nas misturas de referência e em alguns blocos de terra com agregados de cortiça, onde os danos foram mais severos durante o período de saturação. Isto explica também alguns valores mais reduzidos obtidos em condições de saturação quando comparados com as mesmas amostras em condições de cura de laboratório.

Comparando os valores da condutibilidade térmica obtidos nas medições das paredes de taipa (CS1 - 0,74 W/m°C; CS2 - 0,98 W/m°C; CS3 - 0,85 W/m°C) com os valores obtidos ao longo do trabalho experimental dos blocos de terra comprimida verifica-se que, no estado seco, todos as amostras de BTCs estudadas apresentam valores inferiores (inferior a 0,65 W/m°C). Uma vez que os valores de condutibilidade térmica da taipa são muito influenciados pelo teor de humidade e as medições de condutibilidade térmica da taipa foram realizadas de Inverno e não foi controlado o valor do teor de humidade da parede, os valores não são totalmente comparáveis, para além das condições de ensaio serem diferentes.

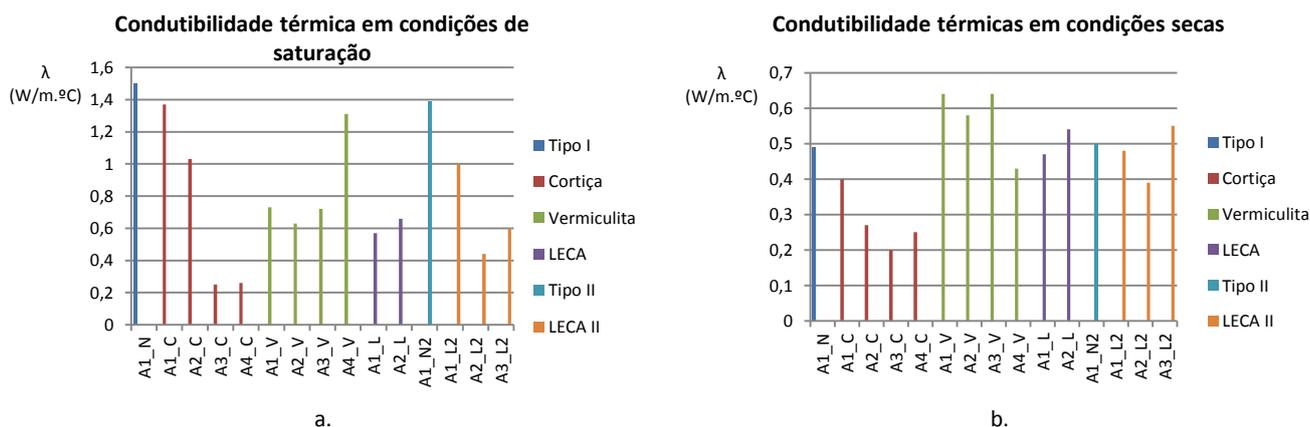


Figura 5.9 – Condutibilidade térmica em condições de saturação (a.) e secas (b.).

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões retiradas após a realização do presente trabalho de investigação.

De um modo geral, os objectivos inicialmente delineados foram concretizados. A componente de investigação teórica ajudou a compreender a evolução e o contexto socioeconómico da construção em terra, a justificar a utilização da terra na construção, em especial em países com climas quentes, e a conhecer, de forma mais aprofundada, a técnica construtiva da taipa e do BTC. Foi também essencial o estudo das características morfológicas da região de Abrantes que causam grande impacto no clima da região e, como consequência, na vida dos habitantes.

Através da componente prática, onde foi realizada uma monitorização *in situ* de três casos de estudo localizados na região de Abrantes, com a solução de parede em taipa, foi possível efectuar-se uma análise aprofundada das respectivas características térmicas. Nas duas campanhas de monitorização realizadas, no Inverno e no Verão, foram utilizados diferentes tipos de sensores em variados pontos de medição, nomeadamente termopares, fluxímetros, piranómetros e termohigrómetros, para o registo de temperaturas, fluxos de calor, radiação solar e humidades relativas. Utilizando os dados recolhidos nas campanhas experimentais, efectuaram-se dois tipos de análises distintas.

Na primeira análise, através das médias diárias das temperaturas dos ambientes exterior e interior e da radiação solar, foram identificados os dias em que as condições meteorológicas se apresentaram mais desfavoráveis, denominados de Dias Tipo. Para cada Dia Tipo, num período de tempo relativo a 24 horas diárias, observou-se a evolução da temperatura ambiente exterior e interior em relação à incidência de radiação solar; da evolução dos fluxos de calor nas superfícies exterior e interior da parede em relação a incidência de radiação solar; e a evolução das temperaturas ambiente exterior e interior e as temperaturas superficiais exterior e interior a diferentes horas do dia. Esta análise tinha como objectivo a compreensão a evolução da temperatura interior da habitação face as condições meteorológicas. Pela análise dos dados foi possível concluir-se que:

- na estação de Inverno, a temperatura do ambiente interior, nos três casos de estudo, foi extremamente reduzida. Ao longo de toda a campanha, verificaram-se temperaturas sempre inferiores a 15 °C, sendo que a temperatura de conforto de referência da regulamentação portuguesa em vigor (REH,2013) é de 18 °C, assim os valores registados revelaram-se bastante insatisfatórios;
- na estação de Verão, a temperatura do ambiente interior situou-se, na maioria dos casos, abaixo da temperatura de referência de conforto regulamentada, que é de 25 °C. Verificou-se uma excepção no caso CS2, durante um período de uma semana, em que se registou uma vaga de calor. Nesse período, em que as temperaturas do ambiente exterior estiveram entre os 30 °C e o 40 °C, a temperatura do ambiente interior registou um valor máximo de cerca de 30 °C;
- a amplitude térmica diária da temperatura do ambiente exterior registou sempre valores bastante elevados, chegando a atingir, no dia mais quente (DQ – 30 de Junho) do caso CS2, 23 °C. Por sua vez, a amplitude térmica diária interior registou sempre valores bastante reduzidos, ultrapassando apenas os 5 °C também no DQ – 30 de Junho, o que é explicado pela inércia térmica da parede;
- a grande espessura das paredes e, conseqüente, elevada inércia térmica revelou-se bastante importante, especialmente na campanha de Verão, quando a temperatura do ambiente exterior atingia valores bastante elevados. A elevada inércia térmica conduz a um desfasamento temporal na transferência de calor do ambiente exterior para o interior,

originando temperaturas interiores bastante agradáveis durante o Verão. Por outro lado, durante o Inverno, do ponto de vista dos ganhos solares através da envolvente opaca, esse atraso é uma desvantagem, pois o calor da energia solar não atinge o interior da habitação e, portanto, não contribui para o aumento da temperatura interior. Ainda, a reduzida fenestração conduz a reduzidos ganhos solares através da superfície envidraçada. Contudo, se a habitação estivesse habitada e a ser aquecida, a inércia térmica seria vantajosa na medida em que o calor produzido no interior da habitação demoraria mais tempo a sair;

- na análise da evolução dos fluxos de calor na superfície exterior e interior da parede, a influência da inércia térmica é bastante notória, na medida em que os fluxos de calor registaram sentidos inversos durante o dia, o que indica uma absorção de calor por parte da parede durante o dia. Por outro lado, durante a noite, os fluxos apresentam, igualmente, sentidos inversos; no entanto, indicam que a parede está a libertar o calor absorvido, ao longo do dia, para o ambiente exterior e interior;
- por fim, ainda pela análise da evolução dos fluxos de calor, verificou-se que, no período de tempo onde se regista os valores mais elevados do fluxo de calor exterior, no sentido positivo (do exterior para o interior), o fluxo de calor interior regista o valor mais reduzido, no sentido negativo. Contudo, nesse mesmo período de tempo, o valor da temperatura ambiente interior regista o valor mais elevado. Assim, pode concluir-se que a transferência de calor do exterior para o interior da habitação é efectuada, principalmente, através dos restantes elementos da envolvente.

A segunda análise consistiu na avaliação *in situ* da condutibilidade térmica (λ); do calor específico volumétrico (c_p); e da difusividade térmica (α) da parede de taipa, por um método transiente com recurso a uma sonda portátil. Os resultados referem-se à média dos dados recolhidos em nove pontos de uma parcela da parede, equivalente a um quadrado de 50cm de lado, Esta análise tinha como objectivo a obtenção do valor da condutibilidade térmica de cada caso de estudo e o respectivo cálculo do coeficiente de transmissão térmica. Com base nos resultados obtidos, pode concluir-se que:

- dos resultados obtidos, aquele que apresenta melhores resultados das características térmicas do material é o caso de estudo 1, contudo, foi o caso que apresentou maior heterogeneidade ao longo da superfície mapeada.
- os valores obtidos cumprem o regulamento em vigor. No entanto, apesar de se situarem dentro do valor máximo admitido pelo REH (2013), para as envolventes opacas exteriores (1,60 W/m².°C na zona I2), são consideravelmente superiores ao valor recomendado de 0,35 W/m².°C (a partir de Dezembro de 2015), revelando uma urgência na melhoria das características térmicas da construção em terra.

Com o objectivo de obter o coeficiente de transmissão térmica (U) de cada um dos casos de estudo, utilizando os dados recolhidos experimentalmente de fluxo de calor e temperaturas, foi implementado o método da média progressiva da norma ISO 9869 (1994). Para o cálculo do coeficiente é necessário o registo do fluxo de calor interior; da temperatura ambiente exterior e da temperatura ambiente interior. Contudo, esta análise revelou-se bastante insatisfatória na obtenção de resultados fiáveis, devido à reduzida diferença entre os valores médios registados das temperaturas ambiente exterior e interior, elevada inércia térmica e aos reduzidos períodos de monitorização.

Por fim, relativamente aos resultados apresentados na campanha experimental do estudo do comportamento térmico de blocos de terra comprimida com a incorporação de materiais isolantes, pode concluir-se que:

- a condutibilidade térmica diminui durante o processo de cura, à medida que as amostras vão secando;
- as amostras com granulado de cortiça apresentaram os menores valores de condutibilidade térmica, no entanto, as suas propriedades físicas e mecânicas são afectadas pelo processo de prensa dos BTCs;
- apesar das amostras com vermiculite e LECA não terem apresentado microfissuras relevantes, a sua adição não foi eficaz na melhoria da condutibilidade térmica;
- o teor de humidade das amostras afectou fortemente os resultados, especialmente nas amostras com vermiculite e LECA, uma vez que os agregados absorvem água durante a sua produção. Assim, durante o período de cura em condições de laboratório as amostras com estes materiais isolantes estiveram sempre mais húmidos, daí a condutibilidade térmica ser superior à das amostras de referência.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Ao longo do presente trabalho de investigação foram identificados certas adversidades que podem ter prejudicado a análise de dados. Nomeadamente, o período de monitorização de alguns casos de estudo (CS1 – campanha de Inverno) foi demasiado curto, o que, em situações onde a inércia térmica é forte, pode conduzir a falsos resultados. Nestas situações é recomendado um período mínimo de 14 dias de monitorização (Doran, 2000) para reduzir o impacto nos resultados do armazenamento de calor na parede, consequência da forte inércia térmica da parede. Um outro factor que pode ser responsável pela discrepância nos resultados foi a instalação das sondas na fachada sul, desta forma, os resultados foram fortemente influenciados pela incidência directa da radiação solar. Assim, seria importante:

- a realização de uma campanha experimental semelhante à realizada, porém, com um período de monitorização superior. Adicionalmente, a realização de várias monitorizações em paralelo possibilitava a comparação directa entre casos de estudo, pois as condições meteorológicas seriam as mesmas;
- a colocação de diversos termopares ao longo da espessura da parede de terra para se ter uma melhor compreensão do comportamento do fluxo de calor no interior da parede.

Os resultados obtidos através da determinação da condutibilidade térmica e do coeficiente de transmissão térmica das paredes apresentaram-se dentro do valor limite de referência do REH (2013). No entanto, estão bastante longe do valor recomendado de $0,35 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. Assim propõe-se:

- o estudo explorando diferentes tipos de soluções construtivas recorrendo a materiais com propriedades isolantes, incorporados ou não na mistura da matéria-prima.

No que diz respeito a campanha experimental com os blocos de terra comprimida (BTC), como desenvolvimentos futuros e tendo em consideração os problemas que surgiram durante estes testes experimentais propõe-se:

- o estudo da incorporação de cimento ou outro tipo de adições naturais por forma a melhorar os problemas de coesão e resistência;
- testar a incorporação de outros tipos de agregados de materiais isolantes para melhorar o comportamento térmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Livros, Artigos, Relatórios, Monografias, Dissertações de Mestrado e Teses de Doutoramento

AAVV, *Arquitectura Popular em Portugal*, Lisboa: Sindicato Nacional dos Arquitectos 1961.

Allinson, D., Hall, M., (2010), *Hygrothermal analysis of a stabilized rammed earth test building in the UK*, *Energy and Buildings*, 42, Issue 6, pp. 845-852.

Aubert, J. E., Fabbri, A., Morel, J. C., Maillard, P., (2013), *An earth block with compressive strength higher than 45 MPa*, *Construction and Building Materials*, 47, pp. 366-369.

Beirão, T., (2005), *Taipa na arquitectura contemporânea. Arquitectura de Terra em Portugal*. Lisboa: Argumentum, p. 35-38.

Bexiga, P., (2005), *Moinhos em taipa, caracterização dos processos construtivos e identificação dos fenómenos de deterioração*. *Arquitectura de Terra em Portugal*. Lisboa: Argumentum, p. 243-447.

Bruno, P., (2005), *Taipa militar – fortificações do período de domínio muçulmano*. *Arquitectura de Terra em Portugal*. Lisboa: Argumentum, p. 39-44.

Bui, Q.B., Morel, J.C., Venkatarama Reddy, B.V., Ghayad, W., (2009), *Durability of rammed earth walls exposed for 20 years to natural weathering*, *Building and Environment*, 44, Issue 5, pp. 912-919.

Ciancio, D., (2011), *Use of rammed earth in aboriginal remote communities of Western Australia: a case study on sustainability and thermal properties*, *Innovation & Sustainability of Structures, China*, 1, pp. NA.

Ciancio, D., Jaquin, P., (2011), *An overview of some current recommendations on the suitability of soils for rammed earth*, *Proceedings of ISS Conference, Xiamen, China*.

Cid-Falceto, J., Mazarrón, F. M., Canas, I., (2012), *Assessment of compressed earth blocks made in Spain: International durability tests*, *Construction and Building Materials* 37, pp.738-745.

Clarke, R., (2010), *Thermal resistance of rammed earth walls - CSIRO Press Release*, CSIRO.

CMDFCI - Comissão Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios, (2008); *Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios, Caderno II, Município de Abrantes*.

CMA, (2009); *Plano de Urbanização de Abrantes, Publicado no Diário da República, 2.ª série — N.º 116 — 18 de Junho de 2009*.

Correia, M., (2005), *Taipa na arquitectura tradicional*, *Arquitectura de Terra em Portugal*, Lisboa: ARGUMENTUM, pp. 27-34.

Correia, M., (2006), *Universalidade e diversidade da arquitectura de terra*, *Terra: Forma de Construir. Arquitectura. Antropologia. Arqueologia*, 10ª Mesa Redonda de Primavera, Lisboa: ARGUMENTUM.

Correia, M., (2007), *Taipa no Alentejo*; Lisboa: ARGUMENTUM.

Delsante, A., (2006), *A comparison of accurate predictions with measured data from a mud brick house*. *Proc. of the IBPSA Australia 2006 conference*. Adelaide, Australia, pp. 96-103.

Doran, S., (2008), *Thermal transmittance of walls of dwellings before and after application of cavity wall insulation*, *Building Research Establishment Ltd* 2008.

Easton, D., (2007), *The rammed earth house*, Chelsea Green.

Eires, R., Camões, A., Jalali, S., (2009), Compressed earth blocks using metakaolin and lime with fungicide additions; *Mediterra* 2009, Tema 4.

Faria, O. B., Stanzione, V. J. T. L., Miller, V. P., (2009), Influência do teor de argila sobre características físicas e mecânicas de adobes e proposta de metodologia para determinação do módulo de elasticidade, V Encontro Nacional e III Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis.

Fix, S., Richman, R., (2009), Viability of rammed earth building in cold climates, Master thesis, Department of Architectural Science, Faculty of Engineering, Architecture and Science, Ryerson University, Toronto, Canada. Disponível em:

<http://www.passivebuildings.ca/resources/Documents/RammedEarthForAColdClimate-StuFix.pdf>.

Fathy, H., (1973), *Architecture for the poor – An experiment in rural Egypt*. The University of Chicago.

Fernandes, M., (2006), *Técnicas de construção em terra*, Terra: Forma de Construir. Arquitectura. Antropologia. Arqueologia, 10ª Mesa Redonda de Primavera, Lisboa: ARGUMENTUM.

Fernandes, M., (2013), *A taipa no Mundo*, 6º Seminário de Arquitectura em Terra em Portugal, DigitAR nº1.

Galindez, F., (2007), Bloques de tierra comprimida (BTC) sin adición de cemento. Fundación MAPFRE, Convocatoria Ayuda a la Investigación 2007.

Gaspar, J., (1970), "Os Portos Fluviais do Tejo" in *Finisterra*, nº. 10, Lisboa, pp. 153-204.

Goodhew, S., Griffiths, R., Short, D. and Watson, L., (2000), Some preliminary studies of the thermal properties of Devon cob walls, *Terra* 2000, 8th International Conference on the Study and Conservation of Earthen Architecture, pp. 139-143.

Goodhew, S., Griffiths, R., (2005), Sustainable earth walls to meet the building regulations, *Energy and Buildings* 37, Issue 5, pp. 451-459.

Guillaud, H., Houben, H., (1989), *Traité de Construction en Terre*. Marseille: Editions Parenthèses, 1989.

Hall, M.R., (2005), Assessing the environmental performance of stabilized rammed earth walls using a climatic simulation chamber, *Building and Environment* 42, Issue 1, pp. 139-145.

Hall, M., Allinson, D., (2009), Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilized rammed earth materials, *Applied Thermal Engineering* 29, Issue 4, pp. 740-747.

Ip, K., Miller, A., (2009), Thermal behaviour of an earth-sheltered autonomous building – The Brighton Earthship, *Renewable Energy* 34, Issue 9, pp. 2037-2043.

Lima, S. A., Varum, H., Sales, A., Neto, V. F., (2012), Analysis of the mechanical properties of compressed earth blocks masonry using the sugarcane bagasse ash, *Construction and Building Materials* 35, pp. 829-837.

Martins, T., Varum, H., Costa, A., (2010), Avaliação da influência da absorção de água por capilaridade nas propriedades mecânicas do adobe da região de Aveiro, 6 ATP|9 SIACOT.

McHenry, P. G., (1984), *Adobe and rammed earth buildings*. Design and Construction. New York, NY: John Wiley & sons, inc.

- Meneses, T., Vicente, R., Costa, A., Figueiredo, A., Varum, H., Soares, N., (2011), Comportamento térmico de construções em alvenaria de adobe: ensaios experimentais sobre três células de teste à escala 1:4, *Construcción com tierra. Tecnologia y Arquitectura. Congresos de arquitectura de tierra en Cuenca de Campos. Valladolid: Cátedra Joan de Villanueva. Universidad de Valladolid*, pp. 151-164.
- Minke, G., (1994), *Manual de construccion en tierra*. Editorial fin de siglo.
- Minke, G., (2001), *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*, Birkhauser, Basel.
- Morel, J. C., Pkla, A., (2002), A model to measure compressive strength of compressed earth blocks with “3 points bending test”, *Construction and Building Materials* 16, pp. 303-310.
- Morel, J. C., Pkla, A., Walker, P., (2007), Compressive strength testing of compressed earth blocks, *Construction and Building Materials* 21, pp. 303-309.
- Neves, C., Faria, O., Rotondaro, R., Cevallos, P., Hoffmann, M., (2005), Seleção de solos e métodos de controle em construção com terra – práticas de campo. Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra – prácticas de campo. In: IV Seminário Ibero-Americano de Construção em Terra, 4. E Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, 3., 2005, Monsaraz (Portugal). Actas: Vila Nova de Cerveira (Portugal): Escola Superior Galaecia / PROTERRA-CYTED. 1 CD-ROM. p. 1-31.
- Oti, J. E., Kinuthia, J. M., Bai, J. (2009), Design thermal values for unfired clay bricks, *Materials and Design* 31, pp. 104-112.
- Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., (2012), Earth construction: Lessons from the past for the future eco-efficient construction, *Construction and Building Materials* 29, pp. 512-519.
- Peixoto, R., (1990), *“A casa Portuguesa”*. Etnografia Portuguesa. Lisboa: Publicações Dom Quixote.
- Peng, C., Wu, Z., (2008), *In situ* measuring and evaluating the thermal resistance of building construction, *Energy and Buildings* 40, Issue 11, pp. 2076-2082.
- Pina dos Santos, C. A., Matias, L., (2006), Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios; Lisboa: LNEC.
- Pinto, F., (2004), Origens da arquitectura de terra em Portugal, *Pedra & Cal* nº24, pp. 10-11.
- Pinto, F., (2005), “El futuro está en la tierra”, in *Arquitectura de Terra em Portugal*, Lisboa: ARGUMENTUM, pp.16-17.
- Rain Forest Center, (1998), “The RIC good wood guide”. The good wood project.
- Reddy, Venkatarama B. V., Jagadish, K. S., (2003), Embodied energy of common and alternatives building materials and technologies, *Energy and Buildings* 35, Issue 2, pp. 129-137.
- Ribeiro, P., (2009), Avaliação do comportamento térmico de edifícios de habitação com recurso a um termofluxímetro, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil.
- Riza, F. V., Rahman, I. A., Zaidi, A. M. A., (2010), A brief review of compressed stabilized earth brick (CSEB), *Conference on Science and Social Research*, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Rocha, M., (2005), Taipa na arquitectura tradicional: técnica construtiva, *Arquitectura de Terra em Portugal*, Lisboa: ARGUMENTUM, pp.22-26.
- Roque, J., Nunes, D., (2013), BTCs naturais, Relatório interno da Universidade de Évora, Portugal.

Schmidberger, E.V., (2007), A responsabilidade do sector da construção perante o aquecimento global, Terra em Seminário 2007, V Seminário Arquitectura de Terra em Portugal, Lisboa: Argumentum, pp. 45-47.

Simões, F., (2007), A qualidade térmica da terra e o desafio da regulamentação energética, Orbis, Lisboa. http://arquitectologia.org/FS_Qualidade%20termica.pdf.

Soebarto, V. (2009), Analysis of indoor performance of houses using rammed earth walls, Building Simulation 2009, 11th International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland.

Taylor, P., Luther, M.B., (2004), Evaluating rammed earth walls: a case study, in Solar Energy 76, Issue 1-3, pp. 79-84.

Torres, C., (2005), Introdução: A memória da terra, in Arquitectura de Terra em Portugal, Lisboa: ARGUMENTUM, pp. 12-13.

Tristão, A. D., Pimentel, L. L., (2007), Avaliação da adição de cinza de casca de arroz na produção de blocos de terra comprimida, IV Encontro Nacional e II Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis.

Villamizar, M. C. N., Araque, V. S., Reyes, C. A. R., Silva, R. S., (2012), Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks, Construction and Building Materials 36, pp. 276-286.

Walker, P. J., (1995), Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilized soil blocks, Cement & Concrete Composites 17, pp. 301-310.

Walker, P. & Standards Australia, (2002), HB 195: The Australian Earth Building Handbook, Standards Australia International Ltd, Sydney.

Wikstrom, P., (2006), A study of surface temperature- and heat flux estimations by solving an Inverse Heat Conduction Problem, Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

World Commission on Environment and Development, (1987), Our Common Future, Oxford University Press.

Normas e Regulamentação

ISO 9869:1994, Thermal insulation – Building elements – In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance. International Organization for Standardization. International Organization for Standardization, 1994.

ISO 6946:2007, Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method. International Organization for Standardization, 2007.

RCCTE (2006), Decreto-Lei no: 80/2006. Regulamento das Características de comportamento Térmico dos Edifícios. Portugal: Diário da Republica, 4 de Abril de 2006.

REH (2013), Decreto-Lei n.º 118/2013. Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação.

Páginas WEB

Mapas de localização da Câmara Municipal de Abrantes. Disponível em: [http://sig.mediotejo.pt/cmabrant/ADF/\(S\(wddta3twnty3roxnmU04wsah\)\)/Viewer.aspx?id=10](http://sig.mediotejo.pt/cmabrant/ADF/(S(wddta3twnty3roxnmU04wsah))/Viewer.aspx?id=10)

Blog Arquitectura de Tierra.. Disponível em: <http://elistas.egrupos.net/lista/arqui-terra>.

Blog Arquitecturas de Terra. Disponível em: http://arquitecturasdeterra.blogspot.pt/p/quem-somos_04.html.

Blog The roof above my head: “Utilização de massa térmica no contexto climático do Reino Unido”. Disponível em: <http://theroofabovemyhead.blogspot.pt/2009/05/utilizacao-de-massa-termica-no-contexto.html>.

Censos 2011. Disponível em:
http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos2011_apresentacao

Centro da Terra. Disponível em: <http://www.centrodaterra.org/>.

Earth Architecture. Disponível em: <http://www.eartharchitecture.org/>.

Isomet product catalog – English (ISOMET-PC201104-EN) (2011), Applied Precision Ltd. Disponível em: http://www.appliedp.com/download/catalog/isomet_pc_en.pdf.

PEEL Living projects. Disponível em: <http://www.peel.com.pt/arquitectura-de-terra/>.

Rede PROTERRA. Disponível em: <http://www.redproterra.org/>.

Ficheiros climáticos de Abrantes cedidos por “Hélder Silvano Neves – MeteoAbrantes”.

ECOS do Ribatejo. Disponível em: <http://www.ribatejo.com/ecos/abranτες/abgeografia.html>.

MIMOA | Modern Architecture Guide. Disponível em: <http://www.mimoa.eu/>.

Inspiration Green. Disponível em: <http://www.inspirationgreen.com/>.

Worl-Architects. Disponível em: <http://www.world-architects.com/>.

Archdaily. Disponível em: <http://www.archdaily.com/>.

Earth Architecture. Disponível em: <http://eartharchitecture.org/>.

Blog Poética da Terra. Disponível em: <http://poeticadaterra.blogspot.pt/>.

ANEXOS

LISTA DE ANEXOS

I.	– Resultados totais das Campanhas de Monitorização do CS1	B
II.	– Resultados totais das Campanhas de Monitorização do CS2	D
III.	– Resultados totais das Campanhas de Monitorização do CS3	F
IV.	– Gráficos do DMR e DmR dos três casos de estudo	G
V.	– Resultados obtidos através da aplicação do método da média progressiva	N

I. – Resultados totais das Campanhas de Monitorização do CS1

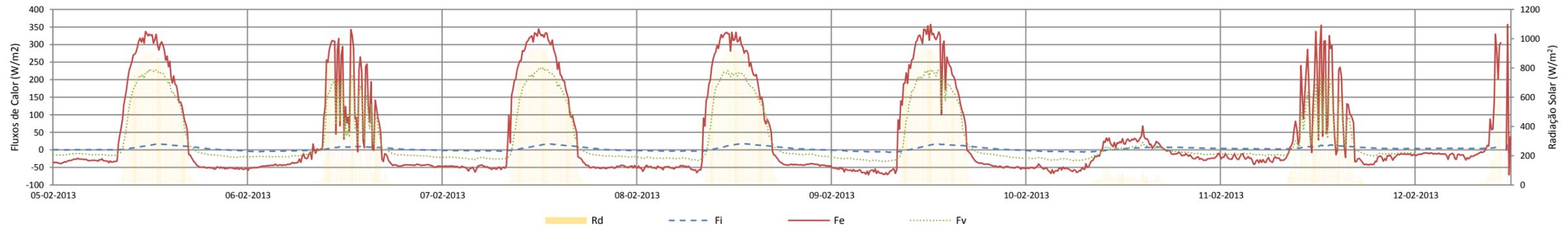


Figura I.0.1 - Radiação solar em plano vertical (Rd) e fluxos de calor exterior (Fe), interior (Fi) e na superfície envidraçada (Fv) durante a campanha de monitorização de Inverno do CS1.

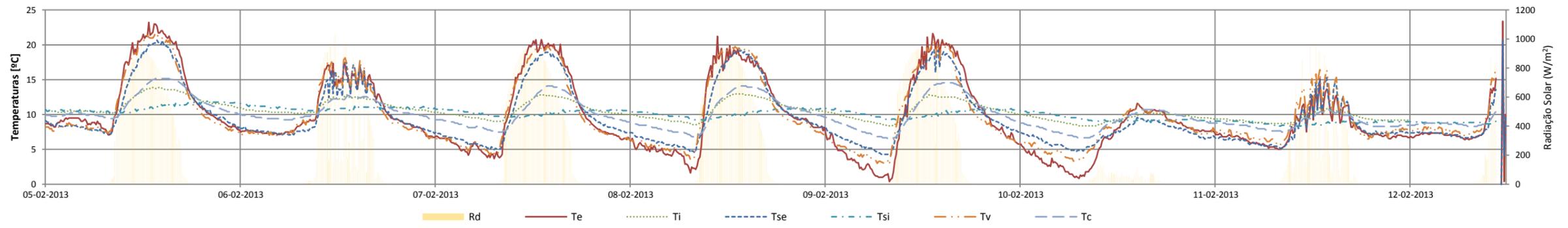


Figura I.0.2 - Radiação solar em plano vertical (Rd) e temperaturas ambiente exterior e interior (Te e Ti), temperaturas superficiais exterior e interior (Tse e Tsi), temperatura no envidraçado (Tv) e temperatura na cobertura (Tc) durante a campanha de monitorização de Inverno do CS1.

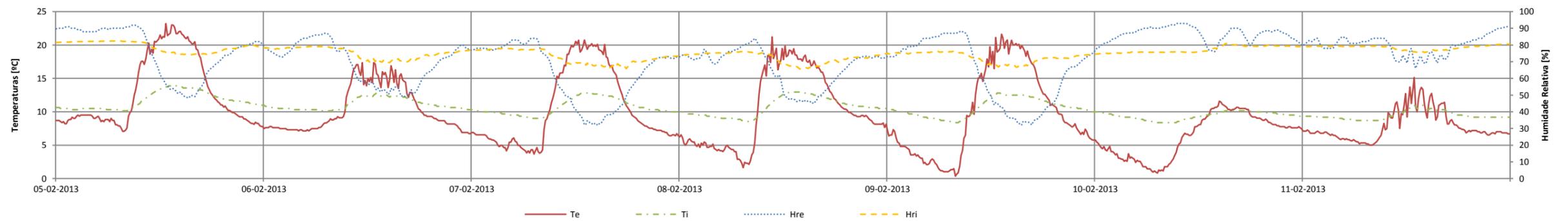


Figura I.0.3 - Temperaturas ambiente exterior e interior (Te e Ti) e Humidade Relativa exterior e interior (HRe e Hri) durante a campanha de monitorização de Inverno do CS1.

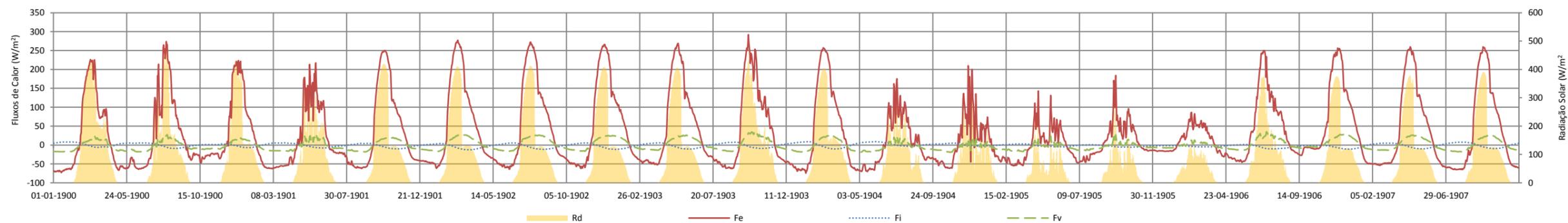


Figura I.0.4 - Radiação solar em plano vertical (Rd) e fluxos de calor exterior (Fe), interior (Fi) e na superfície envidraçada (Fv) durante a campanha de monitorização de Verão do CS1.

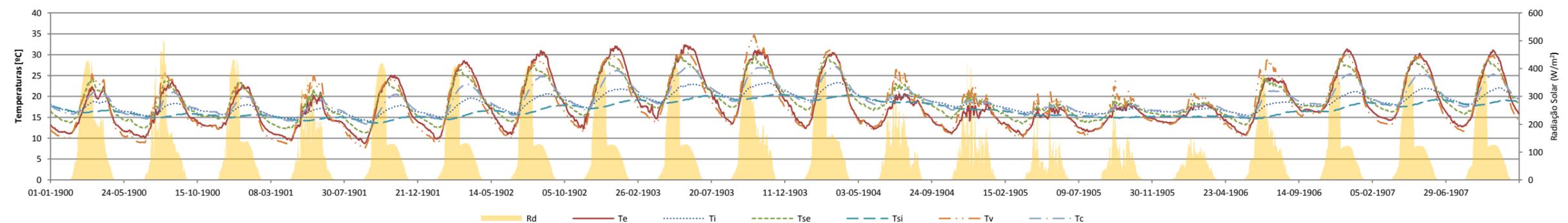


Figura I.0.5 - Radiação solar em plano vertical (Rd) e temperaturas ambiente exterior e interior (Te e Ti), temperaturas superficiais exterior e interior (Tse e Tsi), temperatura no envidraçado (Tv) e temperatura na cobertura (Tc) durante a campanha de monitorização de Verão do CS1.

II. – Resultados totais das Campanhas de Monitorização do CS2

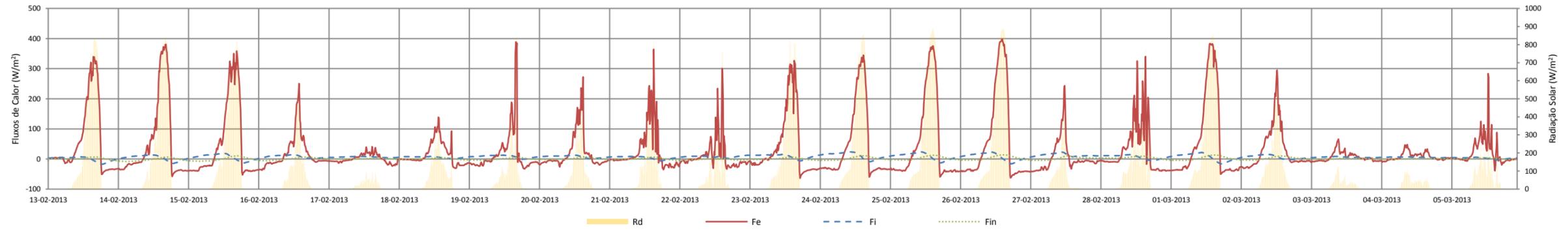


Figura II.0.1 - Radiação solar em plano vertical (Rd) e fluxos de calor exterior (Fe), interior (Fi) e na parede interior Norte (Fin) durante a campanha de monitorização de Inverno do CS2.

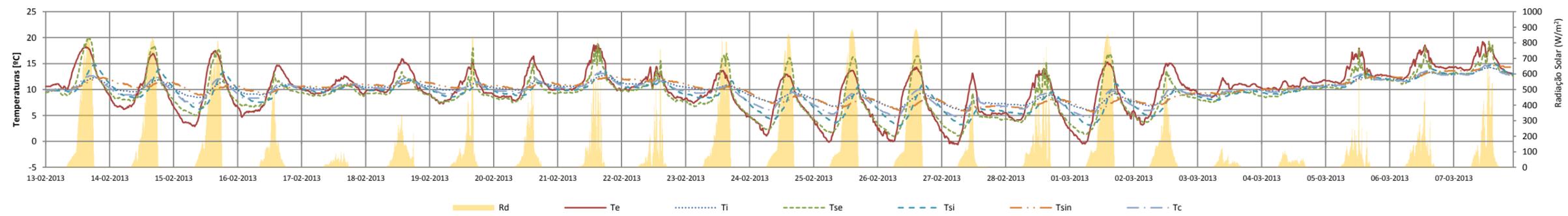


Figura II.0.2 - Radiação solar em plano vertical (Rd) e temperaturas ambiente exterior e interior (Te e Ti), temperaturas superficiais exterior e interior (Tse e Tsi), temperatura superficial parede Norte (Tsin) e temperatura na cobertura (Tc) durante a campanha de monitorização de Inverno do CS2.

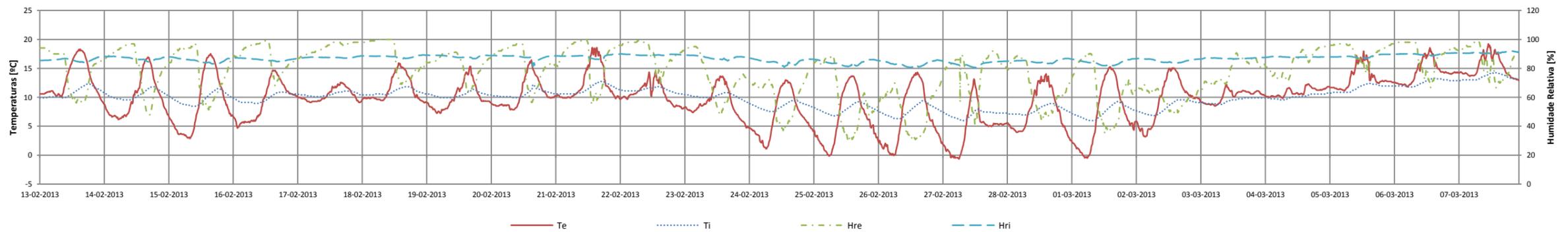


Figura II.0.3 - Temperaturas ambiente exterior e interior (Te e Ti) e Humidade Relativa exterior e interior (HRe e Hri) durante a campanha de monitorização de Inverno do CS2.

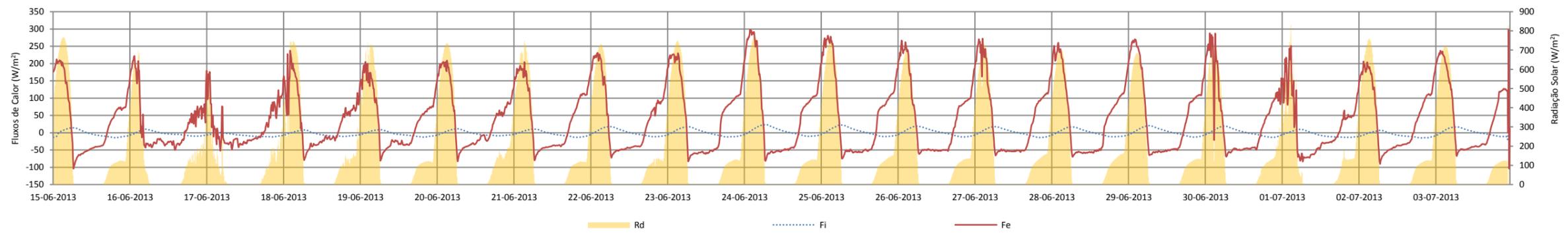


Figura II.0.4 - Radiação solar em plano vertical (Rd) e fluxos de calor exterior (Fe) e interior (Fi) durante a campanha de monitorização de Verão do CS2.

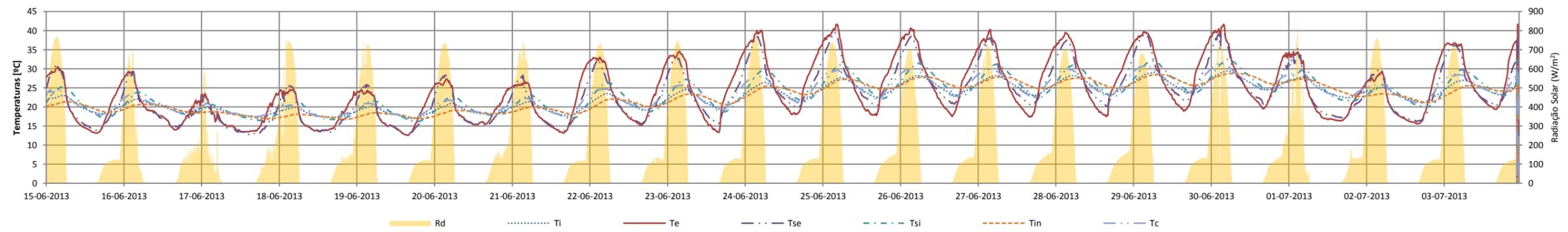


Figura II.0.5 - Radiação solar em plano vertical (Rd) e temperaturas ambiente exterior e interior (Te e Ti), temperaturas superficiais exterior e interior (Tse e Tsi), temperatura superficial parede Norte (Tin) e temperatura na cobertura (Tc) durante a campanha de monitorização de Verão do CS2.

III. – Resultados totais das Campanhas de Monitorização do CS3

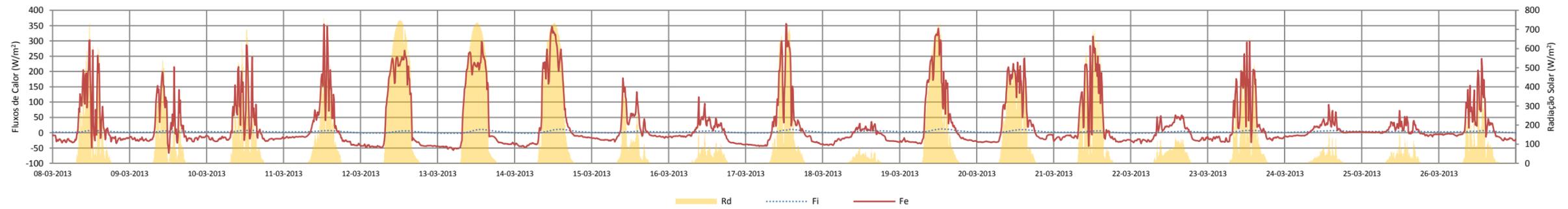


Figura III.0.1 - Radiação solar em plano vertical (R_d) e fluxos de calor exterior (F_e) e interior (F_i) durante a campanha de monitorização de Inverno do CS3.

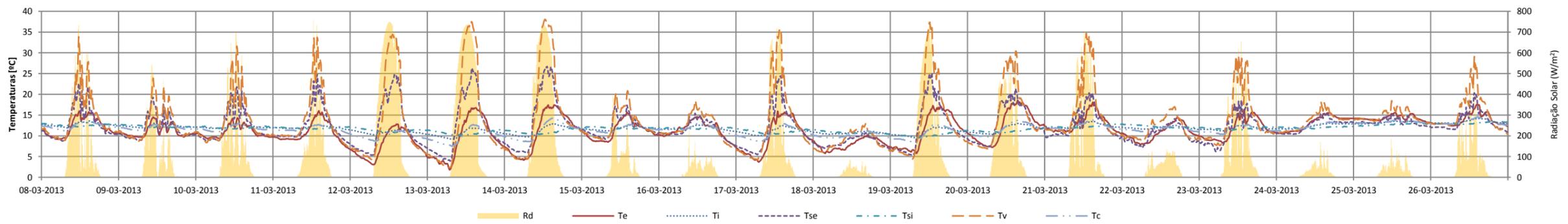


Figura III.0.2 - Radiação solar em plano vertical (R_d) e temperaturas ambiente exterior e interior (T_e e T_i), temperaturas superficiais exterior e interior (T_{se} e T_{si}) e temperatura na cobertura (T_c) durante a campanha de monitorização de Inverno do CS3.

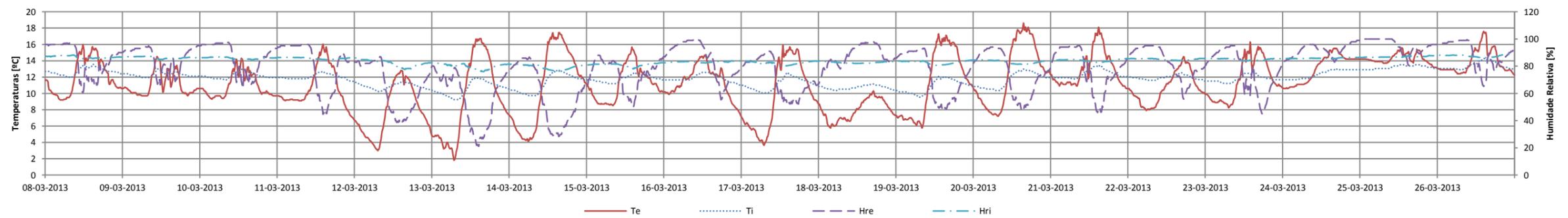


Figura III.0.3 - Temperaturas ambiente exterior e interior (T_e e T_i) e Humidade Relativa exterior e interior (H_{re} e H_{ri}) durante a campanha de monitorização de Inverno do CS3.

IV. – Gráficos do DMR e DmR dos três casos de estudo

Caso de estudo 1 - Campanha de Inverno

Dia Maior Radiação (DMR): 7 de Fevereiro de 2013

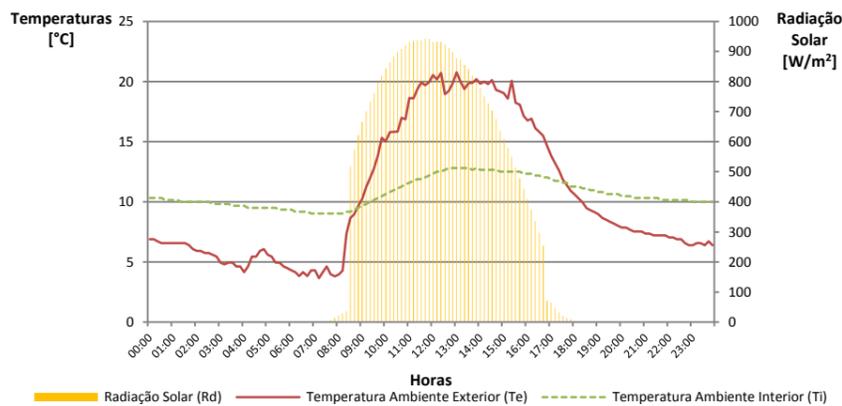


Figura 0.6- Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior do dia 7 de Fevereiro de 2013 (DMR) na campanha de Inverno.

Tabela 0.1 – Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 7 de Fevereiro de 2013 (DMR) na campanha de Inverno. Hora dos valores máximos e mínimos. Atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS1	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo	Hora	Atraso
Te	20,75 (°C)	13h00	-	3,67 (°C)	7h10	-
Ti	12,08 (°C)	12h40	(-) 0h20	9,03 (°C)	6h50	(-) 0h20
Rd	942 (W/m ²)	11h40	-	-	-	-
Fe	344,29 (W/m ²)	11h50	-	-63,37 (W/m ²)	4h00	-
Fi	3,95 (W/m ²)	7h10	19h20	-16,84 (W/m ²)	12h50	8h50

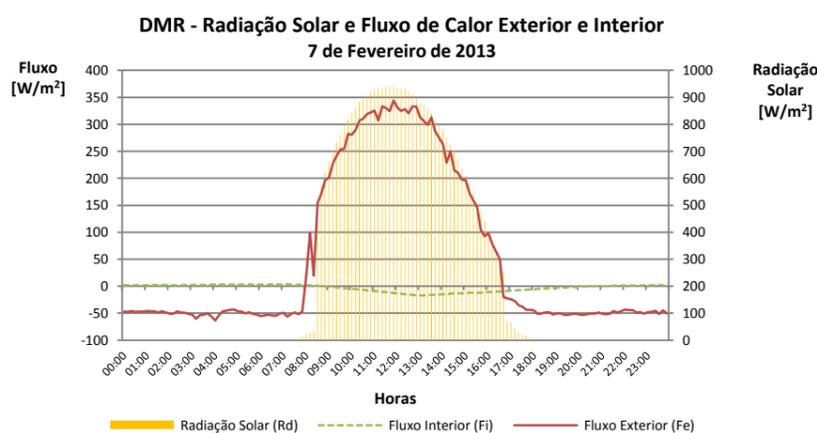


Figura 0.7 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior do dia 7 de Fevereiro de 2013 (DMR) na campanha de Inverno.

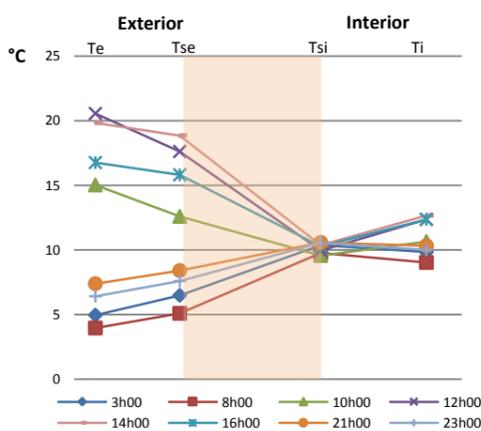


Figura 0.8 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DMR, na campanha de Inverno, no caso de estudo 1.

Caso de estudo 1 - Campanha de Verão

- Dia Maior Radiação (DMR): 6 de Junho de 2013

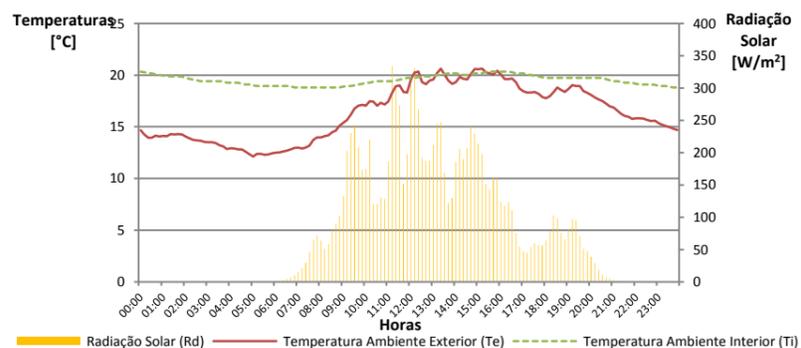


Figura 0.9 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior do dia 6 de Junho de 2013 (DMR) na campanha de Verão.

Tabela 0.2 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 6 de Junho de 2013 (DMR) na campanha de Verão. Hora dos valores máximos e mínimos. Atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS1	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo (°C)	Hora	Atraso
Te	20,64 (°C)	13h20	-	12,13 (°C)	5h00	-
Ti	20,34 (°C)	15h30	2h10	18,79 (°C)	7h00	2h00
Rd	334,34 (W/m ²)	11h10	-	-	-	-
Fe	175,55 (W/m ²)	12h10	-	-70,14 (W/m ²)	2h30	-
Fi	8,93 (W/m ²)	5h00	16h50	-3,21 (W/m ²)	16h30	14h00

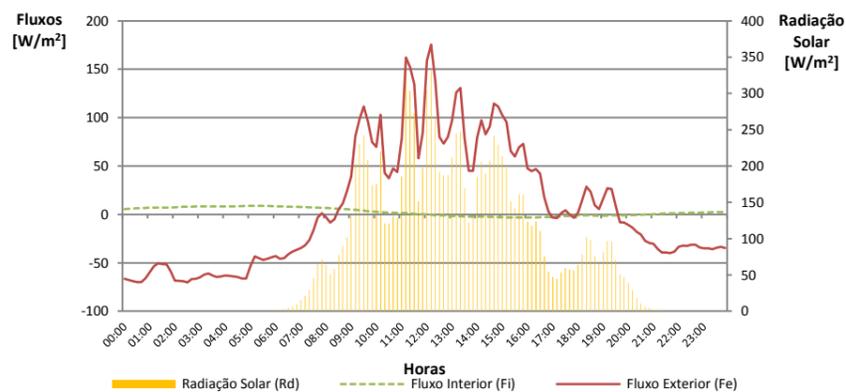


Figura 0.10 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior do dia 6 de Junho de 2013 (DMR) na campanha de Verão.

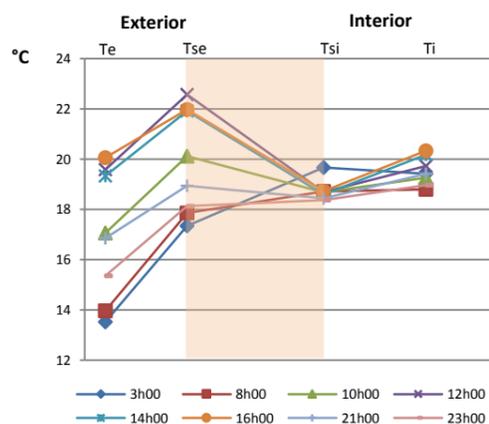


Figura 0.11 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DMR, na campanha de Verão, no caso de estudo 1.

- Dia menor Radiação (DmR): 9 de Junho de 2013

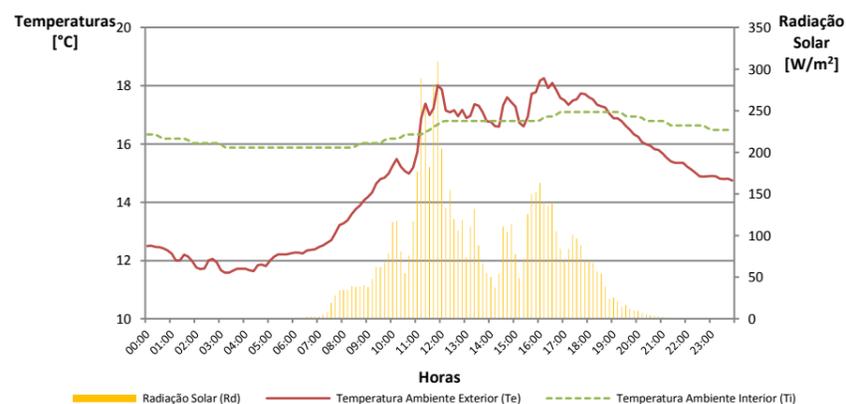


Figura 0.12 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior do dia 9 de Junho de 2013 (DmR) na campanha de Verão.

Tabela 0.3 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 9 de Junho de 2013 (DmR) na campanha de Verão. Hora dos valores máximos e mínimos. Atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS1	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo	Hora	Atraso
Te	18,26 (°C)	16h10	-	11,58 (°C)	3h20	-
Ti	17,10 (°C)	16h50	0h40	15,87 (°C)	3h20	0h00
Rd	309,27 (W/m ²)	11h50	-	-	-	-
Fe	184,04 (W/m ²)	11h50	-	-45,53 (W/m ²)	2h00	-
Fi	0,82 (W/m ²)	3h40	15h50	-5,74 (W/m ²)	16h40	14h40

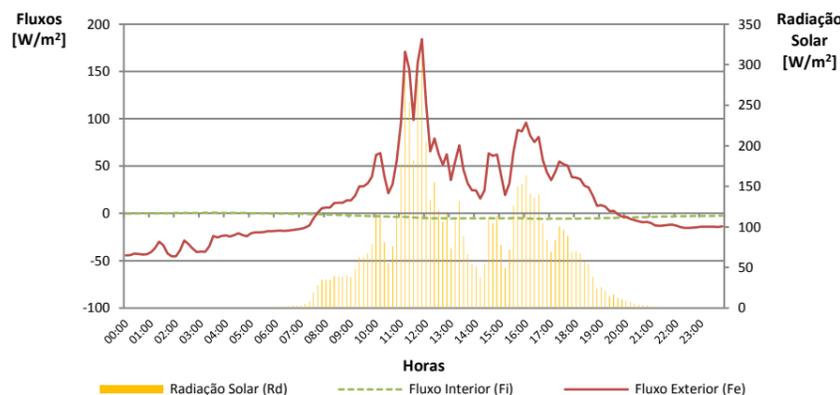


Figura 0.13 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior do dia 9 de Junho de 2013 (DmR) na campanha de Verão.

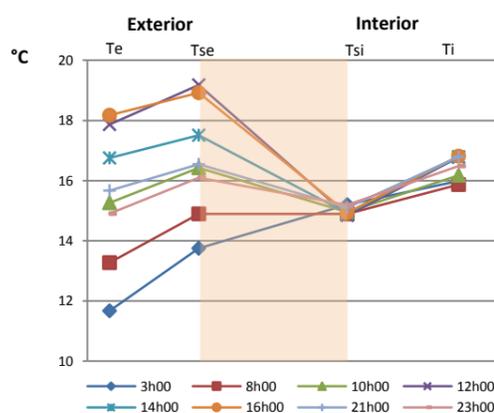


Figura 0.14 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DmR, na campanha de Verão, no caso de estudo 1.

Caso de estudo 2 - Campanha de Inverno

- Dia menor Radiação (DmR): 17 de Fevereiro de 2013

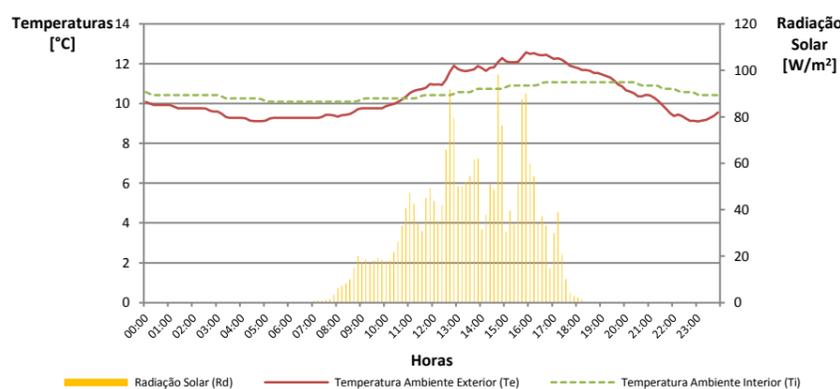


Figura 0.15 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior do dia 17 de Fevereiro de 2013 (DmR) na campanha de Inverno.

Tabela 0.4 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 17 de Fevereiro de 2013 (DmR) na campanha de Inverno. Hora dos valores máximos e mínimos. Atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS2	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo	Hora	Atraso
Te	12,58 (°C)	15h50	-	9,11 (°C)	23h00	-
Ti	11,07 (°C)	16h40	0h50	10,10 (°C)	5h10	(-) 17h50
Rd	98,289 (W/m ²)	14h10	-	-	-	-
Fe	41,14 (W/m ²)	14h40	-	-23,12 (W/m ²)	21h40	-
Fi	-3,88 (W/m ²)	20h20	5h40	-8,40 (W/m ²)	11h30	13h50

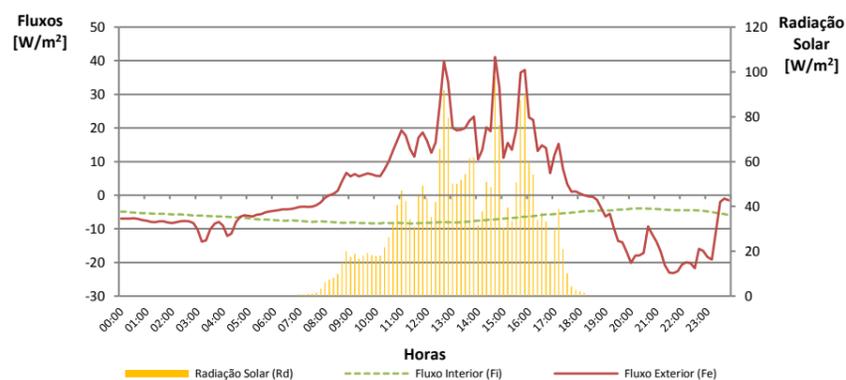


Figura 0.16 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior do dia 17 de Fevereiro de 2013 (DmR) na campanha de Inverno.

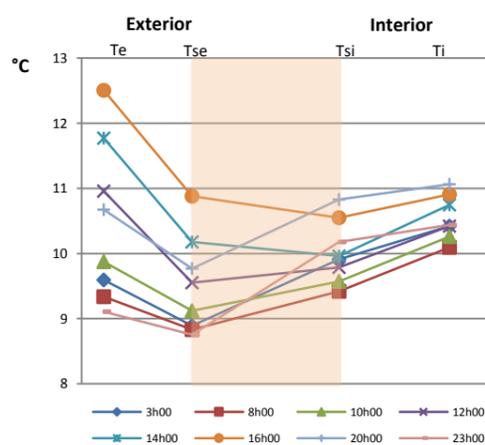


Figura 0.17 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DmR, na campanha de Inverno, no caso de estudo 2.

- Dia Maior Radiação (DMR): 26 de Fevereiro de 2013

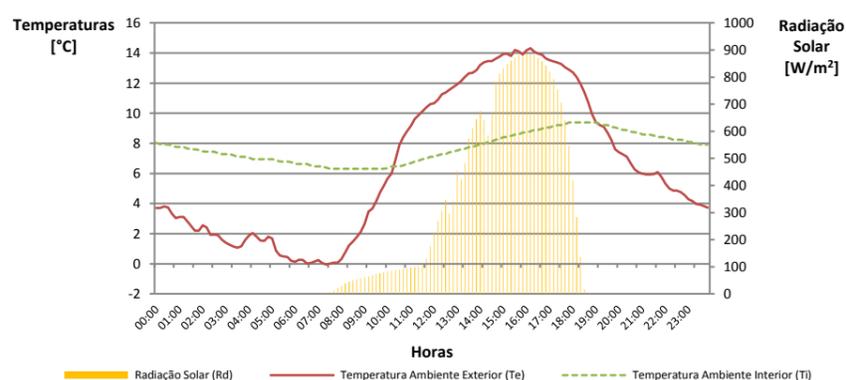


Figura 0.18 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior do dia 26 de Fevereiro de 2013 (DMR) na campanha de Inverno.

Tabela 0.5 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 26 de Fevereiro de 2013 (DMR) na campanha de Inverno. Hora dos valores máximos e mínimos. Atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS2	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo	Hora	Atraso
Te	14,32 (°C)	14h10	-	-0,05 (°C)	7h20	-
Ti	9,38 (°C)	17h50	3h40	6,31 (°C)	7h30	0h10
Rd	887,2 (W/m²)	16h00	-	-	-	-
Fe	398,88 (W/m²)	15h50	-	-62,78 (W/m²)	18h40	-
Fi	16,00 (W/m²)	19h00	4h50	-23,64 (W/m²)	12h00	18h40

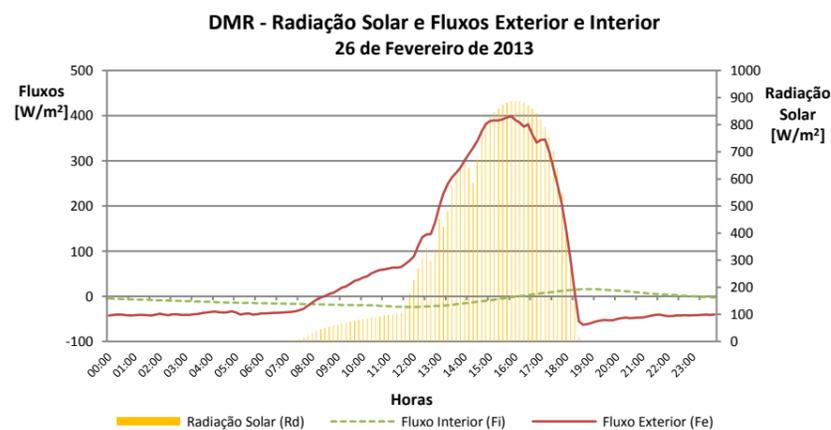


Figura 0.19 - Radiação solar e fluxos de calor exterior e interior do dia 26 de Fevereiro de 2013 (DMR) na campanha de Inverno.

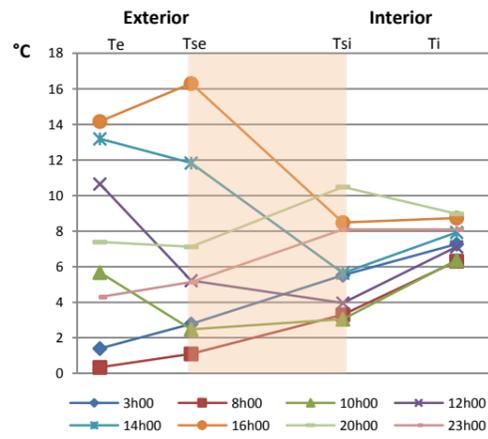


Figura 0.20 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DMR, na campanha de Inverno, no caso de estudo 2.

Caso de estudo 2 - Campanha de Verão

- Dia Maior Radiação (DMR): 21 de Junho de 2013

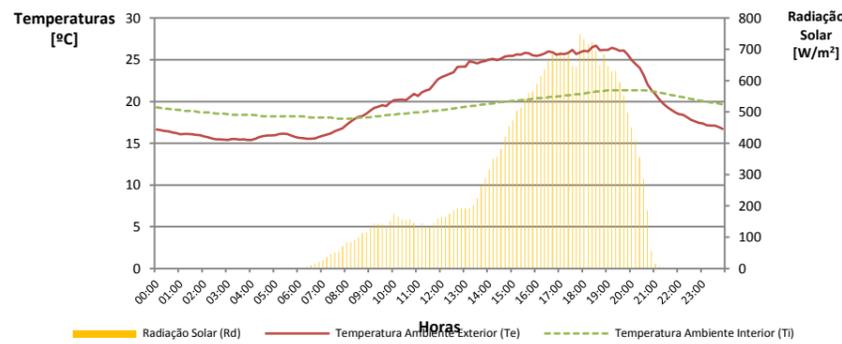


Figura 0.21 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior do dia 21 de Junho de 2013 (DMR) na campanha de Verão.

Tabela 0.6 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 21 de Junho de 2013 (DMR) na campanha de Verão. Hora dos valores máximos e mínimos. Atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS2	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo	Hora	Atraso
Te	26,67 (°C)	18h30	-	15,40 (°C)	2h30	-
Ti	21,36 (°C)	19h00	0h30	17,93 (°C)	7h40	5h10
Rd	747,56 (W/m²)	17h50	-	-	-	-
Fe	204,45 (W/m²)	17h50	-	-80,48 (W/m²)	21h00	-
Fi	10,22 (W/m²)	20h50	3h00	-8,90 (W/m²)	9h30	12h30

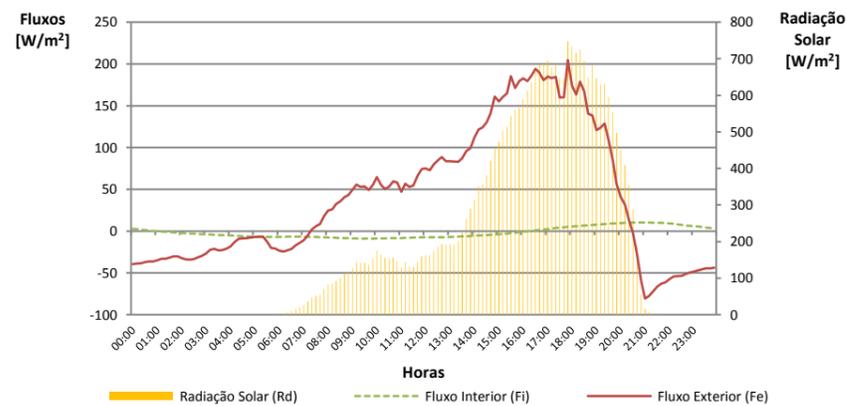


Figura 0.22 - Radiação solar e fluxos exterior e interior do dia 21 de Junho de 2013 (DMR) na campanha de Verão.

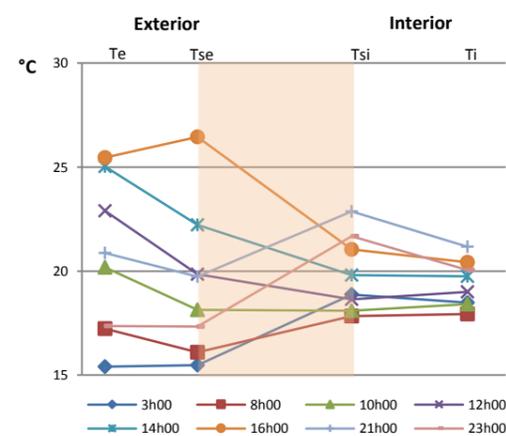


Figura 0.23- Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DMR, na campanha de Verão, no caso de estudo 2.

- Dia menor Radiação (DmR): 18 de Junho de 2013

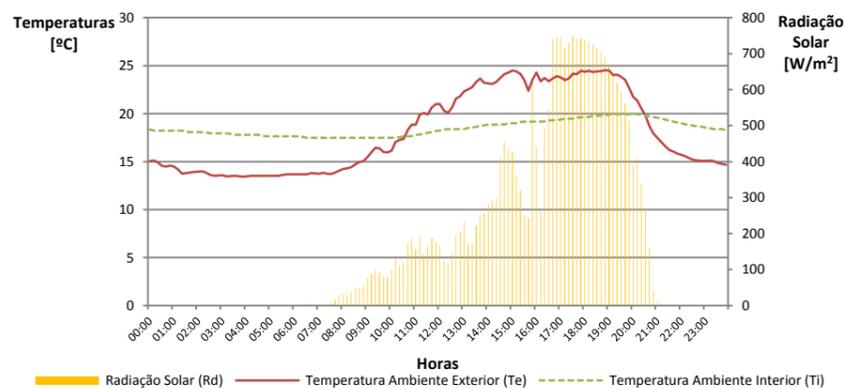


Figura 0.24 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior do dia 18 de Junho de 2013 (DmR) na campanha de Verão.

Tabela 0.7 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 18 de Junho de 2013 (DmR) na campanha de Verão. Hora dos valores máximos e mínimos. Atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS2	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo	Hora	Atraso
Te	24,52 (°C)	18h50	-	13,43 (°C)	3h50	-
Ti	19,94 (°C)	19h10	0h20	17,47 (°C)	6h30	2h40
Rd	747,69 (W/m²)	17h30	-	-	-	-
Fe	237,61 (W/m²)	16h40	-	-79,57 (W/m²)	21h00	-
Fi	7,99 (W/m²)	21h00	4h20	-12,74 (W/m²)	11h30	14h30

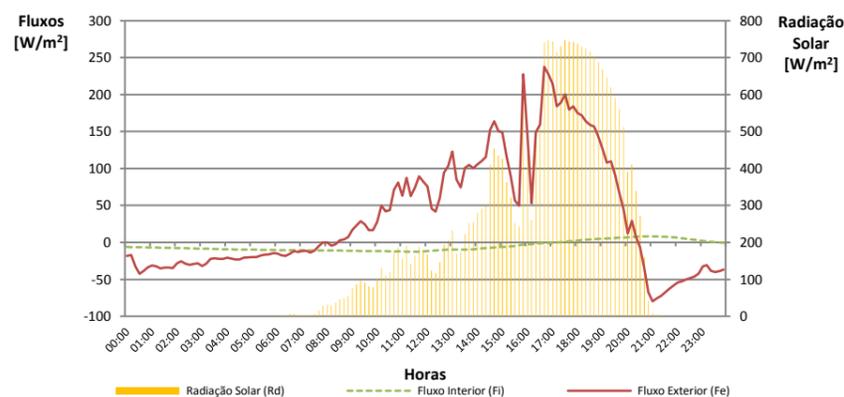


Figura 0.25 - Radiação solar e fluxos exterior e interior do dia 18 de Junho de 2013 (DmR) na campanha de Verão.

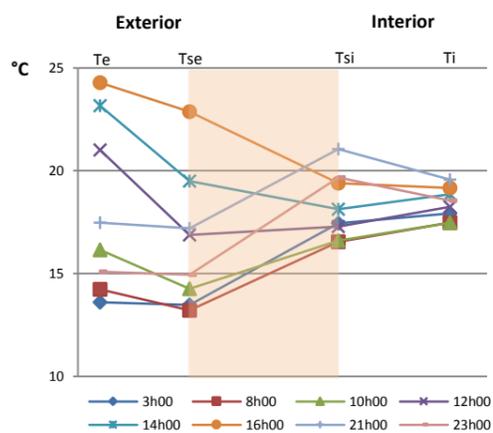


Figura 0.26 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DmR, na campanha de Verão, no caso de estudo 2.

Caso de estudo 3 - Campanha de Inverno

- Dia menor Radiação (DmR): 19 de Março de 2013

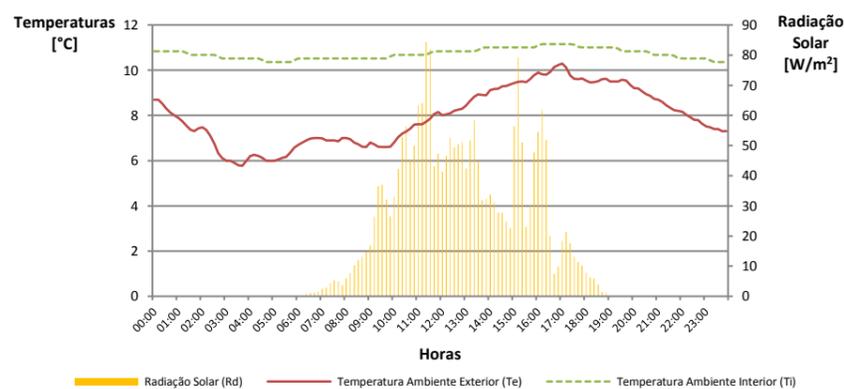


Figura 0.27 - Radiação solar e temperaturas ambiente exterior e interior do dia 19 de Março de 2013 (DmR) na campanha de Inverno.

Tabela 0.8 - Valores máximos e mínimos das temperaturas ambiente exterior e interior, da radiação solar e dos fluxos exterior e interior do dia 19 de Março de 2013 (DmR) na campanha de Inverno. Hora dos valores máximos e mínimos. Atraso em horas dos valores máximos e mínimos entre o ambiente exterior e interior.

CS3	Máximo	Hora	Atraso	Mínimo	Hora	Atraso
Te	10,30 (°C)	17h00	-	5,77 (°C)	3h40	-
Ti	11,16 (°C)	16h10	(-) 0h50	10,36 (°C)	4h40 e 23h20	1h00
Rd	84,36 (W/m ²)	11h20	-	-	-	-
Fe	36,07 (W/m ²)	15h10	-	-41,03 (W/m ²)	1h30	-
Fi	0,03 (W/m ²)	3h30	12h20	-6,71 (W/m ²)	16h30	15h00

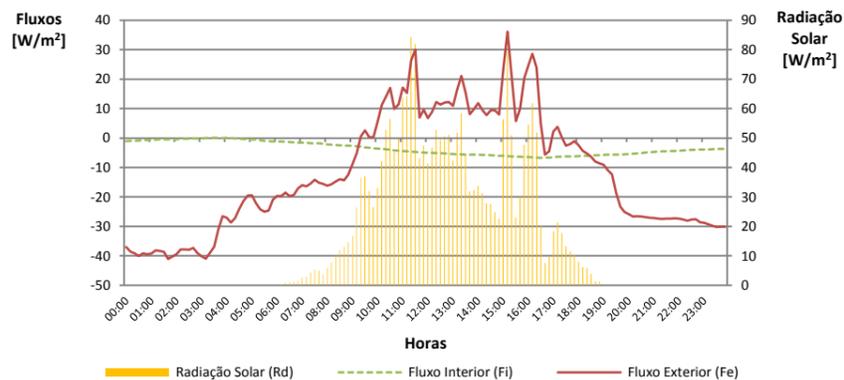


Figura 0.28 - Radiação solar e fluxos e interior do dia 19 de Março de 2013 (DmR) na campanha de Inverno.

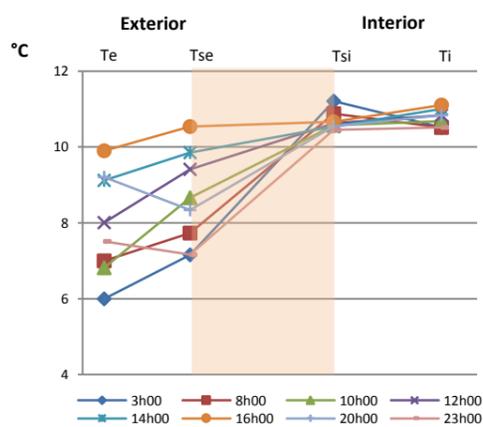


Figura 0.29 - Perfis horizontais das temperaturas às 03h00, 08h00, 10h00, 12h00, 14h00, 16h00, 21h00 e 23h00 do DmR, na campanha de Inverno, no caso de estudo 3.

V. – Resultados obtidos através da aplicação do método da média progressiva

Caso de estudo 2 – Campanha de Inverno

Tabela 0.9 - Valores médios diários do fluxo interior, da temperatura ambiente interior e exterior, diferença entre os valores médios diários de Ti e Te e valor de U após 5, 10, 15, 20 e 23 dias de medições da campanha de Inverno do caso de estudo 2.

Data	qi (W/m ²)	Ti (°C)	Te (°C)	Ti-Te	U5dia	U10dia	U15dia	U20dia	U23dia
13-fev	-0.66	10.82	12.94	-2.12					
14-fev	3.25	10.46	9.96	0.50					
15-fev	5.38	9.77	8.85	0.92					
16-fev	7.58	9.87	9.27	0.60					
17-fev	6.36	10.53	10.40	0.14	495.86				
18-fev	5.68	10.93	11.38	-0.45	16.49				
19-fev	7.93	10.43	10.08	0.35	21.09				
20-fev	7.49	10.59	10.64	-0.05	59.33				
21-fev	4.00	11.40	12.60	-1.20	-25.97				
22-fev	7.34	11.26	10.75	0.51	-38.40	-67.90			
23-fev	8.62	10.20	9.20	1.00	57.92	27.38			
24-fev	11.13	8.54	6.79	1.75	19.19	20.02			
25-fev	8.45	8.00	6.43	1.57	10.91	17.70			
26-fev	7.34	7.70	6.46	1.24	7.07	15.31			
27-fev	12.71	7.06	4.40	2.66	5.87	10.94	13.83		
28-fev	6.77	7.76	7.86	-0.10	6.52	10.58	11.66		
1-mar	6.42	7.43	6.60	0.83	6.73	9.78	11.59		
2-mar	6.26	8.22	9.21	-0.99	10.86	10.88	14.53		
3-mar	5.78	9.37	10.17	-0.80	23.77	10.55	17.40		
4-mar	5.66	10.06	10.85	-0.79	-16.63	12.44	20.22	23.99	
5-mar	2.61	11.51	13.28	-1.76	-7.60	20.32	25.78	23.09	
6-mar	2.76	12.47	14.30	-1.83	-3.73	3250.94	50.90	37.94	
7-mar	2.01	13.43	15.19	-1.76	-2.71	-17.63	310.54	146.74	671.68
Média	6.12	9.91	9.90	0.01	34.03	237.95	52.94	57.94	671.68

Coefficiente de transmissão térmica após 5, 10, 15 e 20 dias de medições

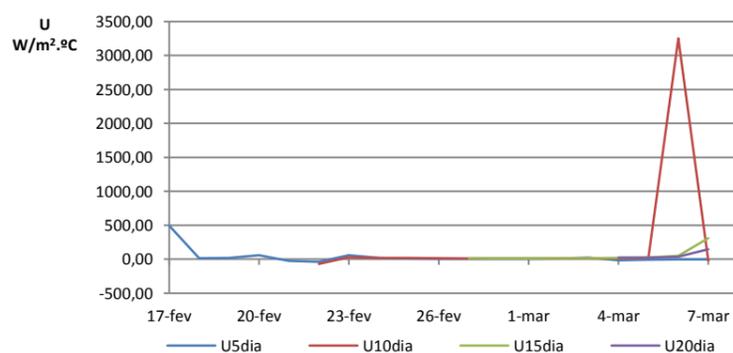


Figura 0.30 – Coeficiente de transmissão térmica após 5, 10, 15 e 20 dias de medições.

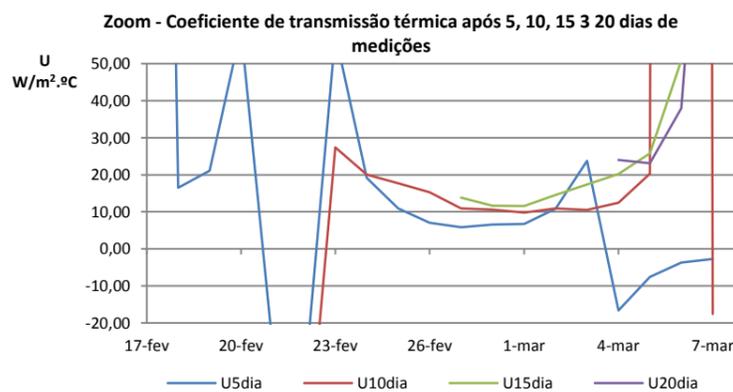


Figura 0.31 – Zoom do gráfico da Figura 4.54.

Caso de estudo 2 – Campanha de Verão

Tabela 0.10 - Valores médios diários do fluxo interior, da temperatura ambiente interior e exterior, diferença entre os valores médios diários de Ti e Te e valor de U após 5, 10, 15 e 18 dias de medições da campanha de Verão do caso de estudo 2.

Data	qi (W/m ²)	Ti (°C)	Te (°C)	Ti-Te	U5dia	U10dia	U15dia	U18dia
16-jun	-5.29	19.99	19.24	0.75				
17-jun	-4.46	19.32	17.56	1.76				
18-jun	-7.82	18.27	16.09	2.18				
19-jun	-5.64	18.14	17.54	0.60				
20-jun	-5.30	18.26	18.10	0.16	-5.23			
21-jun	-3.73	19.15	19.41	-0.26	-6.07			
22-jun	-3.86	19.52	22.40	-2.87	136.79			
23-jun	-1.63	21.31	23.15	-1.84	4.78			
24-jun	-1.14	22.17	27.58	-5.41	1.53			
25-jun	1.78	24.21	29.02	-4.80	0.56	3.81		
26-jun	1.32	25.25	28.77	-3.52	0.19	2.17		
27-jun	0.49	25.72	28.46	-2.74	-0.04	1.38		
28-jun	-0.23	25.71	28.62	-2.91	-0.12	0.76		
29-jun	-0.51	25.85	28.98	-3.13	-0.17	0.47		
30-jun	0.73	26.62	29.80	-3.18	-0.12	0.22	1.40	
01-jul	-0.95	26.26	24.98	1.28	0.04	0.14	1.25	
02-jul	-9.19	23.76	20.40	3.36	2.22	0.41	1.55	
03-jul	-7.48	23.03	26.19	-3.16	3.60	0.63	1.24	2.23
Média	-2.94	22.36	23.68	-1.32	9.86	1.11	1.36	2.23

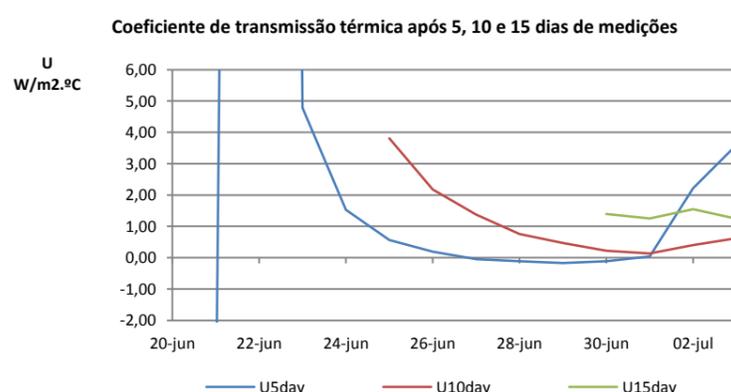


Figura 0.32 - Coeficiente de transmissão térmica após 5, 10 e 15 dias de medições.

Caso de estudo 3 – Campanha de Inverno

Tabela 0.11 - Valores médios diários do fluxo interior, da temperatura ambiente interior e exterior, diferença entre os valores médios diários de Ti e Te e valor de U após 5, 10, 15 e 19 dias de medições da campanha de Inverno do caso de estudo 3.

Data	qi	Ti	Te	Ti-Te	U5dia	U10dia	U15dia	U19dia
09-mar	3.44	12.71	12.07	0.64				
10-mar	3.27	12.32	11.06	1.26				
11-mar	4.17	12.16	10.92	1.24				
12-mar	3.49	12.01	10.67	1.34				
13-mar	1.40	10.87	7.80	3.07	2.09			
14-mar	2.75	10.59	9.22	1.37	1.82			
15-mar	3.41	11.24	10.91	0.33	2.07			
16-mar	2.06	11.78	11.18	0.60	1.95			
17-mar	2.95	11.85	11.45	0.40	2.17			
18-mar	3.83	11.13	9.77	1.36	3.69	2.65		
19-mar	3.53	10.72	7.94	2.78	2.88	2.24		
20-mar	5.91	10.85	11.35	-0.49	3.93	2.79		
21-mar	4.25	11.64	12.50	-0.86	6.42	3.39		
22-mar	2.31	12.38	12.93	-0.55	8.87	4.04		
23-mar	1.57	11.94	10.68	1.25	8.25	5.26	3.52	
24-mar	3.60	11.79	11.59	0.20	-39.15	6.65	3.65	
25-mar	4.20	12.36	13.05	-0.68	-24.81	8.54	4.35	
26-mar	3.90	13.20	14.25	-1.05	-18.79	15.27	5.42	
27-mar	3.42	13.39	13.84	-0.45	-23.08	24.14	6.73	5.39
Média	3.34	11.84	11.22	0.62	-4.11	7.50	4.73	5.39

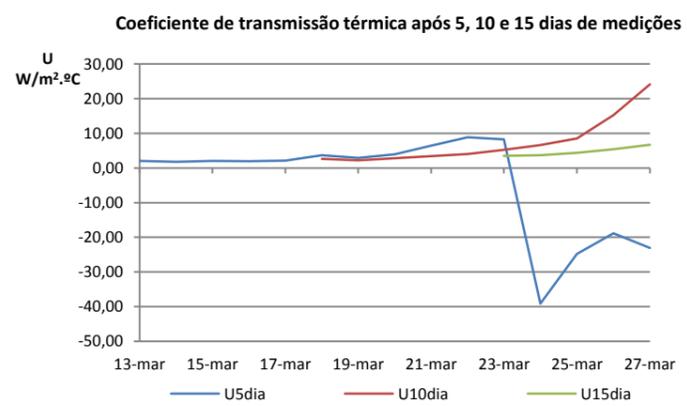


Figura 0.33 - Coeficiente de transmissão térmica após 5, 10 e 15 dias de medições.