



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2012

Agostinho Sampaio Ribeiro **Comportamento Térmico de Sistemas Solares Passivos Usando PCMs**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica
2012

Agostinho Sampaio Ribeiro **Comportamento Térmico de Sistemas Solares Passivos Usando PCMs**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Prof. Doutor António José Barbosa Samagaio, Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente

Professor Doutor Nélon Amadeu Dias Martins,
Professor auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

Arguente

Professor Doutor Romeu da Silva Vicente,
Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro

Orientador

Professor Doutor António José Barbosa Samagaio
Professor associado, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao meu professor e orientador da minha tese de dissertação, António Samagaio, orientador que optei, sem qualquer hesitação, por possuir profundos conhecimentos e uma vasta experiência em muitas áreas da engenharia. Um muito obrigado por me ter ajudado e me ter dado bons conselhos na elaboração da minha tese de dissertação.

Ao Eng. Francisco Lamas pela sua colaboração prestada no desenvolvimento de um programa que permitiu efetuar as simulações para o presente trabalho. Queria, igualmente, agradecer-lhe pelo apoio e pelas boas sugestões que me tem transmitido durante todo o período da minha tese de dissertação.

Ao Eng. Bruno Lamas por me ter prestado auxílio na elaboração de cálculos baseados em métodos estatísticos.

Aos colegas do MSES em que, ao longo de todo o curso, mantivemos sempre boas relações de amizade e de cumplicidade.

À empresa alemã Rubitherm e à empresa norte-americana Rgees, pela grande disponibilidade e por me terem esclarecido algumas dúvidas de ordem técnica sobre o uso de materiais de mudança de fase.

Ao meu irmão e Eng. Álvaro-Gil Ribeiro, pela sua colaboração e por me ter prestado auxílio durante todo o período da minha tese de dissertação.

Aos meus pais, Maria-Amélia Sampaio e Álvaro Ribeiro, que sempre me apoiaram e que têm servido ininterruptamente de suporte nos momentos mais difíceis.

Ao meu irmão Vitor Ribeiro, a sua mulher Sandrine Menigaud e ao meu pequeno sobrinho Davy, aos meus tios, Carlos Campos e Conceição Sampaio, pelos constantes apoios e carinhos prestados.

Dedico este trabalho a minha família.

Palavras-chave

Edifício solar passivo, Eficiência energética, Ferramentas de conceção, Métodos de medições, PCM, Política energética

Resumo

Os materiais de mudança de fase, mais conhecidos como PCMs, usados como suplementos nos elementos construtivos de edifícios quer de construção convencional quer de construção sustentável, constituem uma ótima solução para a redução dos gastos energéticos, mantendo um nível razoável de conforto térmico. Este estudo pretende avaliar os seus potenciais ao nível nacional. Começou-se por efetuar várias pesquisas bibliográficas, nomeadamente; os tipos de PCMs existentes, os diferentes modos de aquecimentos naturais que são utilizados nos edifícios de construção solar passiva, e os locais à seleccionar para o presente estudo. Após ter sido abordada a revisão e a seleção destes conjuntos de dados, analisaram-se vários parâmetros necessários à realização de ensaios, à serem efetuados numa “célula-de-teste”, com recurso a um programa de simulação que permite avaliar o consumo energético. A simulação foi realizada com auxílio de um método que procura reduzir os tempos de ensaio.

Keywords: Design tools, Energy efficiency, Energy policy, Measuring methods, PCM, Solar passive house

Abstract The phase change materials, also known as PCMs, used as supplements on the building's constructive elements whether for both conventional or sustainable construction, provide an optimal solution of reducing energy consumption within reasonable limits for thermal comfort. The aim of this study is to evaluate the PCM's potential at the national level. This work began with several bibliographical researches, namely, the different types of existing PCMs, the different means of natural warming used on the passive solar building designs, and the appropriate places to be chosen for this study. After the bibliographic review revision and the data set selection were made, several parameters were analysed in order to be implemented in a cell test with a simulation program that calculates the energy consumption. The simulation was realized with the help of a method that shortened the test's duration.

ÍNDICE

Índice	i
Índice das figuras.....	iii
Índice das figuras anexadas	vi
Índice das tabelas.....	vii
Lista de siglas	viii
Nomenclatura	x
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.1.1 Política energética na União Europeia.....	1
1.1.2 Política energética em Portugal	1
1.1.3 Política energética no setor da construção.....	2
1.1.4 Edifícios bioclimáticos	3
1.2 Objetivos e organização do trabalho	4
2 Edifícios solares passivos.....	5
2.1 Conceito bioclimático	5
2.2 Ferramentas de conceção	9
2.2.1 Ferramentas conceituais	9
2.2.2 Regras de ouro	10
2.2.3 Geometria solar	10
2.2.4 Ferramentas para a estimacão de desempenho térmico.....	15
2.2.5 Ferramenta para a estimacão do conforto térmico.....	15
2.3 Aquecimento solar nos edifícios passivos.....	16
2.3.1 Técnicas de aquecimento solar naturais	16
2.4 Materiais de mudanca de fase (PCM)	20
2.4.1 Modo de incorporacão.....	23
2.4.2 Ganho indireto (parede Trombe)	25
2.4.3 Ganho direto	26
3 Caso de estudo	28
3.1 Localizacões geográficas	28
3.1.1 Zonas climáticas de inverno	29
3.1.2 Zonas climáticas de verão	29
3.1.3 Seleção de concelhos.....	29
3.2 “Célula-de-teste”	32
3.2.1 Dimensões e estrutura.....	32
3.2.2 Análise termográfica	36

3.3	Aplicação de materiais de mudança de fase na “célula-de-teste”	38
4	Metodologia de avaliação	46
4.1	“Google SketchUp” e “Matlab”	46
4.1.1	Avaliação da altura máxima nas fachadas interiores e da altura e comprimento da pala	47
4.2	Modelos de avaliação pelo método de Kosar	52
4.3	Método de Taguchi	53
4.3.1	Primeira etapa: Formalizar o problema	54
4.3.2	Segunda etapa: Selecionar os parâmetros	55
4.3.3	Terceira etapa: Construir o plano de testes	59
4.3.4	Quarta etapa: Realização de ensaios	63
4.3.5	S/N (“Signal to Noise”)	66
4.4	Métodos para a estimação do desempenho térmico	66
4.4.1	Método LCR	67
4.4.2	Método SLR	71
4.5	“EnergyPlus”	74
4.5.1	Método de cálculo do “EnergyPlus”	76
5	Resultados e discussão	77
5.1	Altura máxima, e altura e comprimento da pala	77
5.1.1	Estação de aquecimento (inverno)	77
5.2	Estação de arrefecimento (verão)	81
5.3	Resultados das simulações com “EnergyPlus”	83
5.3.1	Modelo de Balcomb	83
5.3.2	Modelo usando a “célula-de-teste”	87
5.3.3	Desempenho térmico	89
5.3.4	Fração solar anual (SHF_{anual})	93
6	Conclusões	97
	Referências Bibliográficas	99
	Anexos – Ficheiros do “EnergyPlus”	105

ÍNDICE DAS FIGURAS

Figura 1: Consumos energéticos em cada setor no ano de 2010 em Portugal (Fonte: (Dir. Ger. Ener. Geo., Inst. Nac. Est., 2010)).....	3
Figura 2: Representação esquemática da relação entre os principais intervenientes no habitat bioclimático (Fonte: (Bio-mag, 2012)).....	5
Figura 3: Representação de um habitat com peles de animais, na era paleolítica (Fonte: (Center Blog, 2011)).....	6
Figura 4: Representação infográfica de um exemplo de uma moradia, na era neolítica (Fonte: (Foster <i>et al.</i> , 2008))	6
Figura 5: Planta típica de uma casa grega, em Delos, cerca do século 400 A.C. (Fonte: (Technomc, 2012))	6
Figura 6: Ilustração de uma moradia típica romana no século A.C. (Fonte: (Hoff, 2010))	7
Figura 7: Representação de uma pintura em que se pode observar o átrio com o complúvio (Fonte: (Nat. Gal. Art., 2009)).....	7
Figura 8: Imagem de um peristilo típico romano (Fonte: (Studyblue, 2012))	7
Figura 9: Representação esquemática de uma planta de uma moradia romana (Fonte: (Hoff, 2010))	8
Figura 10: Edifício solar passivo com sistema de ganho indireto (Fonte: (Univ. Utah, 2012))	9
Figura 11: Edifício solar passivo com sistema de ganho direto (Fonte: (Creat. H. Id., 2012))	9
Figura 12: Imagem do “Sun Locator” (Fonte: (Rimstar, 2011))	11
Figura 13: Imagem do “Sun Locator” ao ser utilizado (Fonte: (Rimstar, 2011)).....	11
Figura 14: Imagem de uma ferramenta de fabrico doméstico para medir o azimute (parte horizontal) e a altitude (parte vertical) dum objeto (Fonte: (Rimstar, 2011))	12
Figura 15: Medições da elevação (Fonte: (Rimstar, 2011))	12
Figura 16: Medições do azimute (Fonte: (Rimstar, 2011))	12
Figura 17: A imagem de cima mostra linhas a cores que delimita a zona de sombra da zona clara. A imagem de baixo mostra a transposição destas linhas no “Sun Chart” (Fonte: (Rimstar, 2011))	13
Figura 18: (a) Imagem de um “Sun Pathfinder” no seu tamanho real (Fonte: (Simp. Ener. W., 2010)) (b) Imagem de topo do “Sun Pathfinder” em que se pode observar as zonas de sombreamento circundantes (Fonte: (Sol. Path., 2012)) (c) Imagem do gráfico solar com o limite da zona de sombreamento em cinzento (Fonte: (Sol. Path., 2012)).....	14
Figura 19: Imagem de um gráfico solar especialmente concebido para o “Sun Pathfinder” (Fonte: (Sol. Path., 2012))	14
Figura 20: Imagem em pormenor do gráfico solar em que se mostra pequenos números intercalados para cada mês. Estes números representam a percentagem de radiação solar que devem ser contabilizados quando estes se encontram na parte exposta ao sol (Fonte: (JR’s Blog, 2012)).....	15
Figura 21: Representação esquemática de uma casa solar passiva do tipo ganho direto (Fonte: (Extension, 2010)).....	16
Figura 22: Representação esquemática das diferentes posições do Sol, com os raios a incidir dentro ou fora edifício, consoante a estação de aquecimento (inverno) e de arrefecimento (verão) (Fonte: (Build. Mod. G., 2012)).....	17
Figura 23: Representação esquemática de uma casa solar passiva do tipo ganho indireto, usando uma parede Trombe (Fonte: (Extension,2010))	17
Figura 24: Representação esquemática de uma parede Trombe ventilada, com todo o processo envolvente no caso dos radiação solar incidir sobre a parede (Fonte: (Trombe, 1989))	18
Figura 25: Representação esquemática de uma parede Trombe não ventilada, com todo o processo envolvente no caso dos radiação solar incidir sobre a parede (Fonte: (Trombe, 1989))	19

Figura 26: Representação esquemática de diferentes configurações de varandas anexadas (a) Ganho indireto (b e c) Ganho direto (Fonte: (Duffie <i>et al.</i> , 2006)).....	20
Figura 27: Classificação dos materiais de armazenamento de energia (Fonte: (Schmidt, 2005))	20
Figura 28: Comparação da espessura entre o PCM e os outros materiais (Fonte: (Dieckmann, 2006)).....	21
Figura 29: PCMs armazenando energia solar, durante o dia (Fonte: (BASF, 2012))	22
Figura 30: PCMs libertam a energia solar armazenada, durante a noite (Fonte: (BASF, 2012))	22
Figura 31: Figura representando os fenómenos de histerese e de sobreaquecimento, fenómeno sobretudo comuns nos sais hidratados (Fonte: (Delgado <i>et al.</i> , 2012)).....	23
Figura 32: Representação de diferentes configurações possíveis no caso da macroencapsulação de PMCs. As Configurações podem ser (a) Esféricos (b) Tubos finos (c) Cilíndricos (d) Painéis (Fonte: (Salunkhe <i>et al.</i> , 2012)).....	24
Figura 33: Representação esquemática da colocação dos PCMs no interior da parede Trombe	26
Figura 34: Representação esquemática da colocação dos PCMs no interior da camada de betão situada na parte superior do pavimento sobre o exterior	27
Figura 35: Representação, no mapa de Portugal, (a) Zonas Climáticas de Inverno (I1, I2, I3) (b) Zonas Climática de Verão (V1, V2, V3) (Fonte: (Camelo <i>et al.</i> , 2006))	28
Figura 36: Localização das zonas climáticas no mapa de Portugal.....	30
Figura 37: Imagem da “célula-de-teste”	32
Figura 38: Representação da “célula-de-teste” em 3D, realizada com o programa “CATIA”	33
Figura 39: Esquemas realçando os elementos construtivos (a) Elementos de fachada (N, E, O) (b) Pavimento sobre o exterior (c) Fachada divisória (d) Cobertura exterior	33
Figura 40: Representação da “célula-de-teste” com os elementos construtivos a serem realçados.....	34
Figura 41: Tipo de materiais nos elementos construtivos em (a) Parede exterior (b) Pavimento sobre o exterior (c) parede divisória (d) Cobertura exterior.....	34
Figura 42: Imagem da “célula-de-teste”, com o aparelho de aquecimento, colocado na parte direita da “célula-de-teste”, que está representado a vermelho	36
Figura 43: Imagem do aparelho de aquecimento	36
Figura 44: Imagem termográfica da “célula-de-teste”	36
Figura 45: (a) Imagem da porta exterior (b) Imagem termográfica da porta exterior com e escala de cores (c) Imagem termográfico do canto inferior, dentro da “célula-de-teste” (d) Imagem termográfico do canto superior, dentro da “célula-de-teste”.....	37
Figura 46: Imagem da parte inferior da “célula-de-teste”	38
Figura 47: (a) Estrutura da parafina (b) Estrutura do sal hidratado (Fonte: (Bajare <i>et al.</i> , 2011)) (c) Imagem do painel CSM (Fonte: (Rubitherm, 2012)).....	40
Figura 48: Representação esquemática de painéis CSM numa das partes da “célula-de-teste”, nomeadamente no pavimento sobre o exterior.....	41
Figura 49: Estrutura interna do PCM Micronal (Fonte: (Tekes, 2010)).....	42
Figura 50: Exemplo de aplicação do PCM Micronal (Fonte: (M.I., 2006)).....	42
Figura 51: Imagem de um painel especialmente concebido para os PCMs HS29P (Fonte: (Reinhart, 2012))	43
Figura 52: Representação esquemática de painéis contendo PCMs HS29P numa das partes da “célula-de-teste”, nomeadamente no pavimento sobre o exterior	43
Figura 53: Imagem do sulfato de sódio (Fonte: (Lenzing, 2012)).....	44
Figura 54: Representação esquemática do painel contendo PCMs ClimSel C32 numa das partes da “célula-de-teste”, nomeadamente no pavimento sobre o exterior.....	45
Figura 55: Modelização da “célula-de-teste” no “Google SketchUp”	46
Figura 56: “Célula-de-teste” com os efeitos de sombreamento	46
Figura 57: “Célula-de-teste” na zona climática de Portimão	47

Figura 58: Esquema dos vários ângulos incidentes num plano (Fonte: (Duffie <i>et al.</i> , 2006))	47
Figura 59: Ilustração de vários ângulos, nomeadamente de α_p (Fonte: (Duffie <i>et al.</i> , 2006))	49
Figura 60: Esquema com parâmetro da altura máxima	50
Figura 61: Esquema com parâmetros do comprimento e altura da pala	51
Figura 62: Matriz de simulação usada por Kosar (Fonte: (Kosar, 1981))	53
Figura 63: Paredes exteriores (N,E,O)	68
Figura 64: Pavimento sobre o exterior	69
Figura 65: Cobertura exterior	70
Figura 66: Exemplo esquemático do tipo de simulação efetuado na “célula-de-teste” para o caso de ganho indireto, através do “EnergyPlus”	75
Figura 67: Exemplo esquemático do tipo de simulação efetuado na “célula-de-teste” para o ganho direto, através do “EnergyPlus”	75
Figura 68: Simulação efetuada para o dia 21 de dezembro para a zona climática de Portimão	77
Figura 69: Simulação efetuada através do “Google SketchUp” para as mesmas condições	77
Figura 70: Simulação efetuada para o dia 1 de Janeiro para a zona climática de Portimão	78
Figura 71: Simulação efetuada através do “Google SketchUp” para as mesmas condições	78
Figura 72: Simulação efetuada para o dia 1 de Janeiro para a zona climática de Mirandela	79
Figura 73: Simulação efetuada através do “Google SketchUp” para as mesmas condições	79
Figura 74: Altura máxima de implantação dos PCMs, neste caso dos painéis CSM, para a zona climática de Portimão	80
Figura 75: Altura máxima de implantação dos PCMs, neste caso dos painéis CSM, para a zona climática de Mirandela	81
Figura 76: Simulação efetuada para o dia 1 de maio na zona climática de Portimão	82
Figura 77: Simulação efetuada para o dia 1 de maio na zona climática de Mirandela	83
Figura 78: tirado do modelo de Balcomb <i>et al.</i> para algumas cidades norte-americanas e mundiais, através do programa, “PASSIM”	85
Figura 79: Simulação efetuada através do modelo de Balcomb <i>et al.</i> (Ganho indireto) para algumas cidades norte-americanas e canadianas, usando programa “EnergyPlus”. As temperaturas de ajuste, mínima e máxima, correspondem à 18.3°C e 23.3°C, respetivamente.	86
Figura 80: Simulação efetuada através do modelo de Balcomb <i>et al.</i> (Ganho indireto) para as 9 zonas climáticas, usando “EnergyPlus”. As temperaturas de ajuste, mínima e máxima, correspondem à 20°C e 25°C, respetivamente.	87
Figura 81: Simulação efetuada para a célula de teste (Ganho indireto) com dados de (U.A) _{modificado} do modelo de Balcomb <i>et al.</i> para algumas cidades americanas, usando “EnergyPlus”. As temperaturas de ajuste, mínima e máxima, correspondem à 18.3°C e 23.3°C, respetivamente.	88
Figura 82: Simulação efetuada para a célula de teste (Ganho indireto) com os dados de (U.A) _{modificado} de Balcomb <i>et al.</i> para as 9 zonas climáticas, usando o programa “EnergyPlus”. As temperaturas de ajuste, mínima e máxima, correspondem à 20°C e 25°C, respetivamente.	88
Figura 83: Simulação efetuada através do modelo da “célula-de-teste” (Ganho direto) com dados de (U.A) _{modificado} do modelo de Balcomb <i>et al.</i> para algumas cidades americanas usando “EnergyPlus”. As temperaturas de ajuste, mínima e máxima, correspondem à 18.3°C e 23.3°C, respetivamente.	89
Figura 84: Simulação efetuada através da “célula-de-teste” (Ganho direto) com os dados de (U.A) _{modificado} de Balcomb <i>et al.</i> para as 9 zonas climáticas, usando o programa “EnergyPlus”. As temperaturas de ajuste, mínima e máxima, correspondem à 20°C e 25°C, respetivamente.	89
Figura 85. Gráfico do consumo energético estimado, para todos os casos, na zona climática de Portimão	91

Figura 86: Gráfico do consumo energético estimado, para todos os casos, nas zonas climática de Lisboa e Beja.....	91
Figura 87: Gráfico do consumo energético estimado, para todos os casos, nas zonas climáticas de Porto e Braga	92
Figura 88: Gráfico do consumo energético estimado, para todos os casos, nas zonas climáticas de Castelo Branco e Guarda	92
Figura 89: Gráfico do consumo energético estimado, para todos os casos, nas zonas climáticas de Vila Real e Mirandela.....	93
Figura 90: Gráfico da fração solar para todos os casos, na zona climática de Portimão	94
Figura 91: Gráfico da fração solar para todos os casos, nas zonas climáticas de Lisboa e Beja.....	95
Figura 92: Gráfico da fração solar para todos os casos, nas zonas climáticas de Porto e Braga	95
Figura 93: Gráfico da fração solar para todos os casos, nas zonas climáticas de Castelo Branco e Guarda.....	96
Figura 94: Gráfico da fração solar para todos os casos, na zona climática de Vila Real e Mirandela.....	96

ÍNDICE DAS FIGURAS ANEXADAS

Figura 1. 1: Exemplo para os dados inseridos relativamente as propriedades do isolante, PUR	105
Figura 1. 2: Exemplo para os dados inseridos relativamente as propriedades para o isolante, XPS.....	105
Figura 1. 3: Exemplo para os dados inseridos relativamente as propriedades para o aço...106	
Figura 1. 4: Propriedade do betão no caso para ganho direto com PCMs e sem PCMs	106
Figura 1. 5: Propriedade do betão no caso para ganho indireto com PCMs e sem PCMs ..106	
Figura 1. 6: Exemplo para o sistema de ganho indireto sem PCMs	107
Figura 1. 7: Propriedades do PCM, SP22.....	108
Figura 1. 8: Propriedades do PCM, SP22: Dados da entalpia e da temperatura	108
Figura 1. 9: Exemplo para o sistema de ganho indireto com PCM, SP22.....	108
Figura 1. 10: Exemplo para o caso de sistema direto com as zonas ZNT1 e ZNT2	109
Figura 1. 11: Exemplo para o caso de sistema indireto com as zonas ZNT1.1, ZNT1.2, ZNT2.1 e ZNT2.2.....	109
Figura 1. 12: Exemplo de coordenadas inseridas para o pavimento sobre o exterior, no caso do sistema de ganho direto	110
Figura 1. 13: Exemplo de coordenadas inseridas para o pavimento sobre o exterior, no caso do sistema de ganho indireto	110
Figura 1. 14: Valor inserido para a mudança de ar por hora (MAH), no caso da infiltração, relativamente ao estudo da “célula-de-teste”, ao nível nacional	111
Figura 1. 15: Valores da temperatura mínima e máxima, no caso do termostato, relativamente ao estudo da “célula-de-teste”, ao nível nacional	111

ÍNDICE DAS TABELAS

Tabela 1: Comparação das vantagens e desvantagens entre a Parafina e o Sal hidratado (Fonte: (Cabeza <i>et al.</i> , 2011)).....	22
Tabela 2: Propriedades físicas do betão	26
Tabela 3: Zonas climáticas com o nº de habitantes no ano de 2011 (Fonte: (Inst. Nac. Est., 2012))	30
Tabela 4: Indicação de alguns dados para cada zona climática (Fonte: (Reg. Car. Comp. Tér. Edif., 2006)).....	31
Tabela 5: Valores da energia solar média mensal (Gsc) para as zonas climáticas de inverno (Fonte: (Reg. Car. Comp. Tér. Edif., 2006))	32
Tabela 6: Propriedades físicas dos materiais usados na “célula-de-teste”	35
Tabela 7: PCMs usados no presente estudo	39
Tabela 8: Propriedades físicas dos PCMs RT e SP (Fonte: (Rubitherm, 2012)).....	41
Tabela 9: Propriedades físicas do PCM Micronal (Fonte: (BASF, 2012))	42
Tabela 10: Propriedades físicas do PCM HS29P (Fonte: (Rgees, 2010)).....	43
Tabela 11: Propriedades físicas do ClimSel C32 (Fonte: (Climator, 2012)).....	45
Tabela 12: Média diária recomendada para os meses e valores de n por mês (Fonte: (Duffie <i>et al.</i> , 2006))	48
Tabela 13: Definição das etapas	54
Tabela 14: Perguntas e respostas rápidas na determinação dos objetivos.....	54
Tabela 15: Tabela com os níveis e parâmetros definidos para o sistema de ganho direto com PCMs	56
Tabela 16: Tabela com os níveis e parâmetros definidos para o sistema de ganho indireto com PCMs	57
Tabela 17: Tabela com os níveis e parâmetros definidos para o caso de ganho direto e indireto sem PCMs	58
Tabela 18: sistema para o ganho direto com PCMs	59
Tabela 19: Sistema para o ganho indireto com PCMs	61
Tabela 20: Sistema para o ganho direto e indireto sem PCMs.....	62
Tabela 21: Sistema para o ganho direto com PCMs.....	63
Tabela 22: sistema para o ganho indireto com PCMs	64
Tabela 23: Sistema para o ganho direto e indireto sem PCMs.....	65
Tabela 24: Relação do SSF com LCR.....	70
Tabela 25: Dados da altura máxima para as zonas climáticas.....	80
Tabela 26: Dados da relação Altura/Comprimento da pala para as zonas climáticas	82
Tabela 27: Valores de cada parâmetro	84
Tabela 28: Valores do SHF e SLR, para o caso da estação de aquecimento, calculados por Balcomb <i>et al.</i>	85
Tabela 29: Valores dos calores auxiliares para Boston	86
Tabela 30: Melhores resultados obtidos em cada um dos casos.....	90
Tabela 31: Valor da condutância total da estrutura do edifício	93

LISTA DE SIGLAS

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
ASHRAE	American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers
BASF	Baden Aniline and Soda Factory
BEI	Banco Europeu de Investimento
BLAST	Building Loads Analysis and System Thermodynamics
CaCl ₂	Cloreto de Cálcio
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CO ₂	Dióxido de Carbono
CSM	Compact Storage Model
DMQ	Desvio dos Mínimos Quadrados
DOE	Department of Energy
E	Este
ELENA	European Local ENergy Assistance
ENE	Estrategia Nacional de Energia
EUA	Estados-Unidos de América
FTP	Plano de testes factorial
INETI	Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação
IPHA	International Passive House Association
LCR	Load Colector Ratio
MAH	Mudança de Ar por Hora
N	Norte
Na ₂ SO ₄	Sulfato de Sódio
NLC	Net Load Coefficient

O	Oeste
PCM	Phase Change Materials
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PUR	Poliuretano
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RFAV	Razão do Fluxo de Ar Volumétrico
SHF	Solar Heating Fraction
SLR	Solar Load Ratio
SN	Signal to Noise
SSF	Solar Saving Fraction
TMY	Typical Meteorological Year
UA	Universidade de Aveiro
UE	União Europeia
WWR	Window to Wall Ratio
XPS	Poliestireno Extrudido

NOMENCLATURA

Símbolo	Descrição	Unidades
A	Área	$[m^2]$
C_p	Calor específico a pressão constante	$[J\ K^{-1}\ K^{-1}]$
G	Energia solar	$[KWh\ m^{-2}\ mês^{-1}]$
GD	Graus dias	$[°C\ dia]$
G_{sc}	Constante solar	$[W\ m^{-2}]$
H	Radiação solar	$[J\ m^{-2}]$
k	Condutividade térmica	$[W\ m^{-1}\ K^{-1}]$
q	Transferência de calor	$[W\ m^{-2}]$
Q	Energia	$[J]$
R	Resistência térmica	$[m^2\ K\ W^{-1}]$
T	Temperatura	$[K, °C]$
U	Coeficiente global de transferência de calor	$[W\ m^{-2}\ K^{-1}]$
$U.A$	Coeficiente de perda	$[W\ K^{-1}]$
ΔT	Intervalo de temperatura	$[K, °C]$
α	Coeficiente de absorção	$[-]$
ρ	Massa específica	$[Kg\ m^{-3}]$
τ	Transmissividade	$[-]$

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

1.1.1 Política energética na União Europeia

Hoje em dia, a questão da eficiência energética é um assunto cada vez mais pertinente para todos os setores que usam energia. Para além das supostas alterações climáticas e seus efeitos nefastos observe-se, igualmente, uma necessidade em diminuir o consumo energético devido a escassez dos combustíveis fósseis. Nessas últimas décadas, a União Europeia (UE) decidiu implementar algumas medidas para prevenir o desperdício de energia e assim diminuir, consideravelmente, as emissões de efeito de estufa exigidas pelo Protocolo de Quioto, que na altura da assinatura do protocolo, em 1997, foi estipulada uma meta de redução de 8% de emissões no período entre 2008 e 2012, em relação aos níveis de 1990 (Samagaio, 2011). Em março de 2007, o Conselho Europeu estabeleceu um plano de medidas sobre as alterações climáticas, conhecido como a meta dos 20-20-20 e que tem como principais objetivos, até ao ano de 2020 (Euro. Com., 2012).

- Reduzir, 20% de emissões de gases com efeito de estufa
- Aumentar em 20% a eficiência energética na União Europeia
- Usar 20% das energias renováveis no consumo total da energia na União Europeia

Este plano de medidas foi aprovado nos dias 11 e 12 de dezembro de 2008, pelos 27 Estados membros da união (Cons. U.E., 2009). No ano de 2009, foi lançado o projeto ELENA (European Local ENergy Assistance) que tem como finalidade ajudar as cidades e regiões europeias para estruturar e implementar projetos de energia sustentável de modo mais eficiente (Managenergy, 2009). A Comissão Europeia pretende financiar por si só mil milhões de euros às autoridades locais que pretendem alcançar as metas globais de energia da UE (Martinerge, 2010). Outros fundos de financiamento são disponíveis como os bancos locais e o Banco Europeu de Investimento (BEI). No dia 30 de abril de 2009, o município de Vila Nova de Gaia aderiu ao projeto ELENA, no qual foi-lhe atribuído um financiamento de 73,4 milhões de euros concedidos pelo BEI (Euro. Inv. B., 2011).

1.1.2 Política energética em Portugal

Em Portugal, algumas medidas foram criadas como o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE), no ano de 2008, pela resolução do Conselho de Ministros nº80/2008 que visa alcançar e suplantar os objetivos impostos pela UE, relativa a eficiência na utilização final de energia (ADENE, 2011). Foi, igualmente, desenvolvido um plano energético denominado por Estratégia Nacional para a Energia (ENE2020) aprovada pela Resolução de Conselho de Ministros 29/2010 de 15 de Abril para os próximos 10 anos em que foram definidos como objetivos principais até ao ano de 2020:

- Reduzir a dependência energética para 74%
- As fontes renováveis deverão constituir 31% do consumo final bruto de energia
- Cerca de 55% da eletricidade é produzida a partir de fontes renováveis
- Aumentar de 20% a eficiência energética

Com a adoção deste plano, foi publicado o Decreto-Lei nº50/2010, de 20 de Maio que cria o Fundo de Eficiência Energética previsto no PNAEE, com uma dotação inicial de 1,5 milhões de euros (Martinerge, 2010).

1.1.3 Política energética no setor da construção

O setor da construção (doméstico e serviços) é o setor que consome mais energia na UE, com 40 % do consumo total de energia, depois do setor do transporte (30%) e da indústria (30%) e é responsável por emitir mais de 20% das emissões total de CO₂, ao nível mundial, representando o maior potencial na redução de gases de efeito de estufa ligados à energia, no horizonte de 2030 (Eur-Lex, 2010). Foi implementado pelo Parlamento Europeu e do Conselho, a Diretiva 2010/31/EU de 19 de Maio de 2010 relativo ao desempenho energético dos edifícios (J. Ofic. U.E., 2010). Esta diretiva impõe novos desafios dirigidos sobretudo aos novos edifícios, tais como a instalação de equipamentos que usam tecnologias por via ativa como as energias renováveis, em que se destacam os painéis solares fotovoltaicos e térmicos. Dentro dessa diretiva, destacam-se, ainda, os novos critérios de conceção dum edifício que devem ser cumpridos de acordo com as condições climáticas locais. A Diretiva 2010/31/EU aprova, igualmente, ações de renovação de edifícios existentes de forma a combater os desperdícios energéticos.

Em Portugal, verifica-se que o setor dos transportes é o setor que consome mais energia, tendo-se registados valores com 37,5% do consumo energético total, enquanto o setor doméstico e de serviços representam 29,7% do consumo energético total, para o ano de 2010. A Figura 1 mostra um diagrama circular apresentando os consumos energéticos para os principais sectores da atividade, em Portugal, para o ano de 2010 (Coelho, 2010). Todavia, o setor doméstico é um dos setores onde se consome e se polui mais em Portugal e constitui portanto uma área onde se tem que intervir, igualmente, de forma a alcançar os objetivos fixados pela UE sendo que a Estratégia Nacional de Energia (ENE) prevê que em 2020, 35% dos edifícios terão altos níveis de rendimentos energéticos (Dir. Ger. Ener. Geo., Inst. Nac. Est., 2010). Nessa estratégia, destaca-se a obrigatoriedade de instalar sistemas solares térmicos em todos os novos edifícios. As medidas de eficiência energética no setor doméstico e serviços são principalmente a instalação do solar térmico, a melhoria do isolamento térmico, e a colocação de vidro duplo de elevada eficiência, etc.

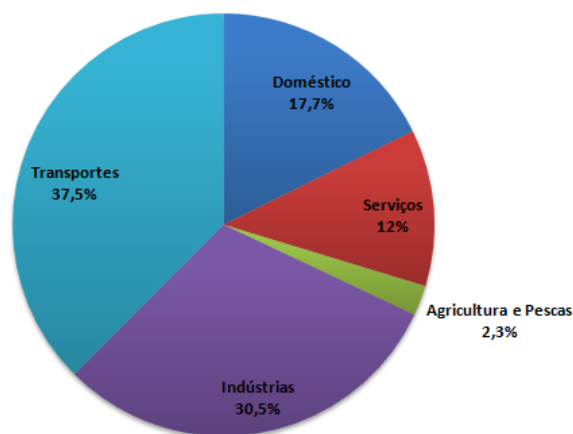


Figura 1: Consumos energéticos em cada setor no ano de 2010 em Portugal (Fonte: (Dir. Ger. Ener. Geo., Inst. Nac. Est., 2010))

1.1.4 Edifícios bioclimáticos

Num projeto de eficiência energética de um edifício ou na reabilitação deste, devem-se escolher as melhores soluções construtivas, os equipamentos que permitem um menor consumo, e as fontes de energias renováveis, sempre que possível. A partir destes propósitos, aparece o conceito de bioclima ou arquitetura bioclimática (Gonçalves, 2004). Ao nível nacional, foi criado o Decreto-Lei 80/2006, de 4 de abril, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) que apresenta as estratégias bioclimáticas mais adequadas para cada região portuguesa, identificadas em zonas climáticas, que contribuem significativamente para a melhoria do desempenho global dos edifícios (Reg. Car. Comp. Tér. Ed., 2006). Nisto surge um tipo de edifício que constitui o princípio da arquitetura bioclimática, denominado por edifício solar passivo. Estes tipos de edifícios foram criados e desenvolvidos nos anos 70 e já existem modelos deste género sobretudo no norte da Europa, mas só atualmente é que se depara pelas suas potencialidades um pouco por todo o mundo. Os edifícios solares passivos constituem uma boa solução para responder às exigências ao nível da eficiência energética como económica. Alguns estudos mostram maiores desempenhos energéticos através de edifícios que usam energia passiva em relação aos edifícios que usam energia ativa, e uma construção com o rótulo de habitat passivo pode consumir até dez vezes menos energia do que uma casa convencional para seu aquecimento e produção de água quente (AGEDEN, 2010). Antes de se efetuar qualquer montagem requer-se estabelecer estudos rigorosos e pormenorizados na avaliação da orientação e a forma como o edifício irá ser implementado para um dado sítio. Existem métodos de cálculo que ajudam ao projecionista estimar o desempenho energético e o conforto térmico segundo estas configurações (Balcomb, 1992). Há alguns anos, foi introduzido um certo tipo de material na perspectiva de melhorar o rendimento energético mantendo um certo nível razoável de conforto. Este tipo de material, cuja principal característica é mudar de fase conservando a temperatura ambiente no interior do edifício, é apelidado de material de mudança de fase, mais conhecido por PCM (“Phase Change Material”). Alguns estudos realizados demonstraram que a adição de PCMs nestes edifícios pode reduzir ainda mais o consumo energético mantendo um conforto térmico aceitável dentro da casa.

1.2 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em seis capítulos e contempla cinco objetivos principais.

O primeiro objetivo consiste na pesquisa e enquadramento de documentos mais relevantes, em que se aborda, em primeiro lugar, o conceito bioclimático relacionado com edifícios solares passivos, em segundo lugar, as ferramentas, designadas de conceituais, que definem os procedimentos a por em prática antes de se efetuar a construção de um edifício solar passivo, e em terceiro lugar, as características e métodos de uso dos materiais de mudanças de fase, mais habitualmente denominados por PCMs (capítulo 2).

O segundo objetivo aborda os principais intervenientes, para a realização do estudo, nomeadamente; os locais adotados e estabelecidos segundo as diferentes zonas climáticas em Portugal; uma “célula-de-teste” em que se efetua uma análise detalhada dos diversos materiais que a compõe; os tipos de PCMs, previamente avaliados e selecionados, de modo a se integrar nos elementos construtivos da “célula-de-teste” (capítulo 3).

O terceiro objetivo consiste em descrever, principalmente, os diferentes métodos existentes que possibilitam a realização de ensaios, entre os quais; um método de suporte para o presente trabalho, que contempla um plano de testes estabelecendo algumas regras a dar seguimento e os parâmetros a utilizar, cujos valores encontram-se definidos para uma determinada gama de valores; um método, ainda mais elaborado em relação ao anterior, em que se procura determinar planos de ensaios, mais apropriados, de forma a poder inserir alguns parâmetros e valores mais relevantes para o presente estudo; um método que aplica técnicas de cálculo de configuração simples de modo a avaliar o desempenho térmico de um edifício solar passivo com e sem PCMs (capítulo 4).

O quarto objetivo passa pela validação do método de cálculos de configuração simples, descrito anteriormente, com recurso a um programa de simulação (final do capítulo 4), assim como, efetuar os testes e a análise do desempenho térmico e da fração solar com auxílio do método de plano de testes, indicado como sendo mais elaborado, no terceiro objetivo, utilizando o mesmo programa de simulação (capítulo 5).

O quinto objetivo passa por apresentar comentários do que foi efetuado, ao longo do trabalho, e uma análise conclusiva dos resultados finais do desempenho térmico e da fração solar, efetuando uma última apreciação sobre a implicação destes resultados em relação ao presente estudo (capítulo 6).

2 EDIFÍCIOS SOLARES PASSIVOS

2.1 CONCEITO BIOCLIMÁTICO

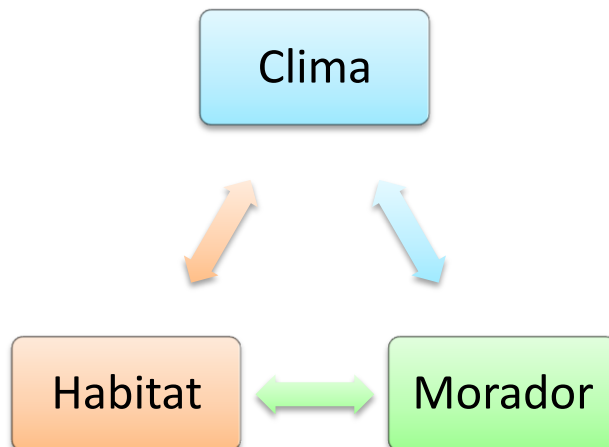


Figura 2: Representação esquemática da relação entre os principais intervenientes no habitat bioclimático (Fonte: (Bio-mag, 2012))

A conceção bioclimática do habitat consiste em encontrar a melhor adequação entre o habitat, o comportamento dos seus ocupantes e do clima, para reduzir ao máximo as necessidades de aquecimento e arrefecimento (Bio-mag, 2012). A Figura 2 mostra um esquema de relação entre os principais intervenientes na arquitetura bioclimática. Um processo bioclimático desenvolve-se em 5 pontos cruciais:

- Atrair o calor ou arrefecimento
- Filtrar e transformar a energia
- Difundir com menos perdas possíveis
- Conservar a energia restituída
- Captar a luz natural

A procura de uma casa termicamente eficiente e confortável não é relativamente recente até porque esta procura é muito mais antiga do que se pensa. Algumas pesquisas elaboradas por historiadores mostram que o homem começou cedo a querer desenvolver habitats do género solar passivo. No período paleolítico, os homens pré-históricos eram caçadores e sobretudo nómadas em que construía os seus próprios refúgios tais como cabanas mas eram realizadas de forma rudimentar com pele de animais e portanto muito fáceis de se degradar. Foi a partir do período neolítico, entre 7000 e 4000 anos A.C., que o homem começou a procurar desenvolver casas capazes de criar um ambiente mais dignos de se viver por um longo período de tempo. Naquela altura, o homem tornou-se num criador de animais de gado e agricultor ficando mais dependente do seu habitat. Isto contribui a que estes habitats fossem desenvolvidos ainda mais com o decorrer do tempo, para fazer frente às diferentes condições climáticas adversas. Os materiais utilizados eram essencialmente madeiras emprenhadas de argila para o telhado e tijolos de barro para as paredes (What-When-How, 2012). Nalgumas zonas mediterrânicas, foram descobertas vestígios de cabanas do período neolítico em que foram especialmente concebidas para que sejam aquecidas pela parede, no inverno e

arrefecidas pelo solo, no verão (Ren.Ther., 2011). A Figura 3 e a Figura 4 mostram um exemplo de duas ilustrações de habitats do período paleolítico (Center Blog, 2011) e do período neolítico (Foster *et al.*, 2008), respetivamente.



Figura 3: Representação de um habitat com peles de animais, na era paleolítica (Fonte: (Center Blog, 2011))



Figura 4: Representação infográfica de um exemplo de uma moradia, na era neolítica (Fonte: (Foster *et al.*, 2008))

Foi na civilização greco-romana que se notou um maior interesse pelo desenvolvimento de projetos de arquitetura bioclimática. Na Grécia antiga, o ilustre filósofo Sócrates defendia que a entrada de uma casa deveria possuir uma orientação a sul. Este conceito simples foi usado para o desenvolvimento da arquitetura das cidades instaurando um direito em captar radiação solar para cada parcela, no interior da qual os moradores podiam dispor as salas e outros espaços para aproveitar do sol consoante as casas. A Figura 5 mostra um exemplo de uma planta de arquitetura típica grega na altura, onde se pode notar os espaços abertos virados para a luz do sol (Technomc, 2012).

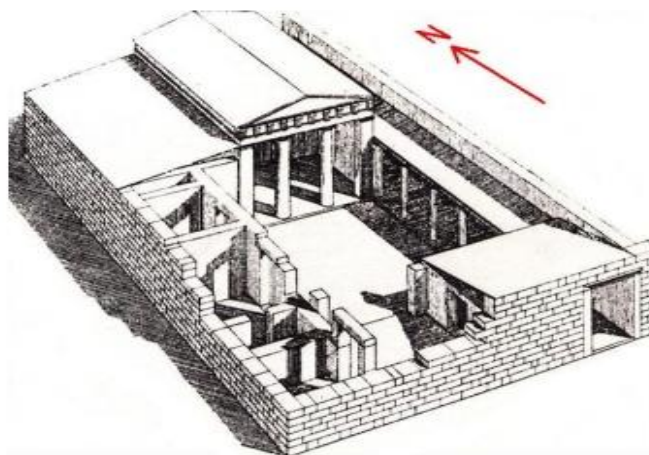


Figura 5: Planta típica de uma casa grega, em Delos, cerca do século 400 A.C. (Fonte: (Technomc, 2012))

A época românica foi igualmente protagonizada por alguma arquitetura que dependia das diferentes estações do ano e é de salientar que os romanos foram os pioneiros em desenvolver e usar concreto nas paredes e vidros para as janelas. As habitações típicas romanas possuíam um átrio no qual os moradores viviam naquela zona, na época de inverno, em que o sol penetrava no complúvio e no verão os moradores mudavam-se

num lugar mais fresco denominado por peristilo. As Figuras 6, 7 e 8 mostram um exemplo de uma moradia típica romana (Hoff, 2010; Nat. Gal. Art, 2009; Studyblue, 2012).



Figura 6: Ilustração de uma moradia típica romana no século A.C. (Fonte: (Hoff, 2010))



Figura 7: Representação de uma pintura em que se pode observar o átrio com o complúvio (Fonte: (Nat. Gal. Art., 2009))



Figura 8: Imagem de um peristilo típico romano (Fonte: (Studyblue, 2012))

Através da Figura 9, em que se mostra uma parte de uma planta de arquitetura romana, pode-se observar que os romanos já tinham alguma preocupação em aproveitar ao máximo a radiação solar no inverno, concebendo aberturas de cada espaço devidamente dimensionadas para este efeito. As palas e a vegetação foram implementadas de forma a criar sombreamento, na época do verão, e a construção de um pequeno lago no meio proporcionava a refrigeração por evaporação necessária para o conforto, nos dias mais quentes (Hoff, 2010).

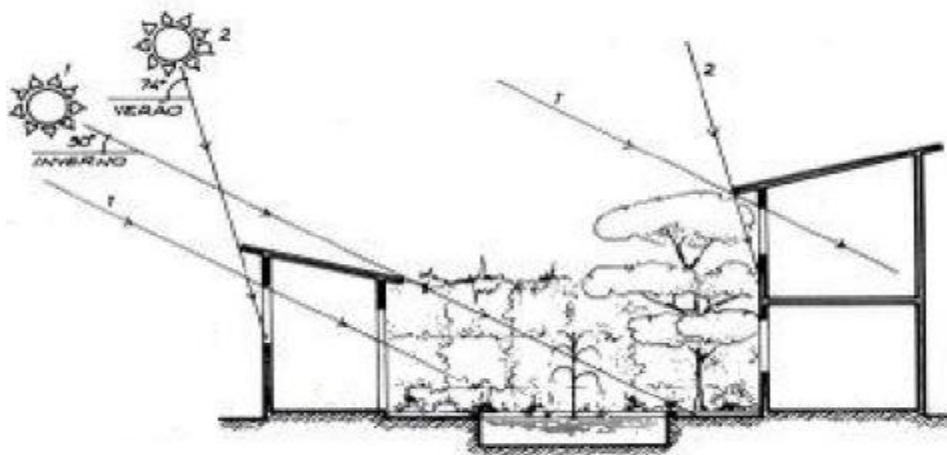


Figura 9: Representação esquemática de uma planta de uma moradia romana (Fonte: (Hoff, 2010))

Em Portugal, o conceito da arquitetura bioclimática já existia desde há alguns anos para cá, pois já se construíam casas cuja arquitetura e materiais de construção estavam adaptadas e dependiam da região. Hoje em dia, a elaboração de um edifício para tirar maior proveito da energia solar tem muito evoluído ao longo dos anos graças a proliferação de novos materiais e tecnologias pelo que o conceito de edifício solar passiva começou verdadeiramente nos anos 70, década onde se originou a famosa crise petrolífera, e teve sobretudo origem na Alemanha e nos países escandinavos, países reputados muito frios onde se verifica um importante consumo energético. As Figuras 10 e 11 mostram duas imagens de casas com rótulo edifício solar passivo (Univ. Utah, 2012; Creat. H. Id., 2012). As características destas casas são notórias à primeira vista; janelas de grandes dimensões a ocupar quase toda a fachada e pouca ou nenhuma vegetação ou qualquer outro tipo de obstáculo a rodear por perto da fachada envidraçada. O edifício solar passivo foi concebido para tirar maior proveito da energia solar graças à sua conceção como a forma, a orientação, o isolamento, etc., à qualidade das suas componentes; tais como a parede, o solo, o teto, as janelas, etc.; e ao seu bom desempenho ao nível da ventilação de maneira a melhor controlar as contribuições do ar e o grau de humidade. O sombreamento é um fator igualmente importante especialmente em meses em que se começam a sentir aumento de temperatura e que, apesar do sol ficar numa posição mais elevada no céu, convém o telhado possuir uma altura e dimensão suficiente de modo a diminuir a radiação solar no interior do edifício. Pode-se recorrer ainda às palas que funcionam perfeitamente como protetor à luz do sol e à vegetação circundante mais abundante nesta ocasião. Ao abrigo das normas do iPAH, são requeridos três critérios para definir uma casa solar passiva; necessidade de aquecimento menor que $15 \text{ kWh} / \text{m}^2$ ano, impermeabilização ao ar, e consumo total de energia da própria casa menor que $120 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ano de energia primária pelo que a necessidade de energia não deve ultrapassar $50 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ano (PHIUS, 2011). Para conceber uma casa solar passiva é necessário obedecer a seis princípios fundamentais (Imm. Mod. Emp., 2011):

1. Isolação térmica reforçada com vãos envidraçados de boa qualidade
2. Eliminação de pontes térmicos
3. Excelente impermeabilização ao ar
4. Ventilação com duplo fluxo (com recuperador de calor)
5. Captura ideal, mas passiva da energia solar e do calor vindo do solo
6. Limitação dos consumos de energia dos aparelhos eletrodomésticos



Figura 10: Edifício solar passivo com sistema de ganho indireto (Fonte: (Univ. Utah, 2012))



Figura 11: Edifício solar passivo com sistema de ganho direto (Fonte: (Creat. H. Id., 2012))

Em Portugal, é possível encontrar algumas casas solares passivas que foram construídas nestas últimas duas décadas mas ainda são poucas às que exibem tal tipo de arquitetura. Existe um exemplo de uma casa antiga que foi sujeita a uma reabilitação bioclimática, em Entre-os-Rios, e que no final se verificou uma redução dos consumos energéticos em 50% (Energuaia, 2010). O custo de uma casa desse género é significativo, sendo que na Alemanha e nos países escandinavos existe uma ajuda financeira concedida pelo estado com o propósito em diminuir o custo e o consumo gerado, em relação a uma casa tradicional. As pessoas que optam por construir um edifício solar passivo podem vir a pagar entre 7% e 15% a mais do que às que preferem viver numa casa tradicional, mas ao fim de 5 a 10 anos o valor da construção de uma casa solar passiva é rapidamente amortizada. As configurações possíveis existentes de aproveitamento dos raios solares, nos edifícios solares passivos, são principalmente de ganho direto ou ganho indireto. A imagem da Figura 10 mostra um exemplo de uma casa com sistema de ganho indireto e a imagem da Figura 11 mostra um exemplo de uma casa com sistema de ganho direto.

2.2 FERRAMENTAS DE CONCEÇÃO

As ferramentas de conceção são indispensáveis para uma ótima abordagem daquilo que se pretende conceber antes de se iniciar qualquer montagem de um edifício solar passivo. Estas compreendem; as ferramentas esquemáticas, as ferramentas de desenvolvimento e as ferramentas finais (Balcomb, 1992).

2.2.1 Ferramentas conceituais

As ferramentas conceituais são usadas na fase mais inicial da conceção, pois estes avaliam o local em que se quer construir o edifício, a forma e a orientação do edifício. A avaliação do local visa estudar principalmente três pontos cruciais: o melhor relacionamento estético em relação ao local, o melhor programa de construção e a melhor estratégia para o consumo global de energia. Relativamente ao último ponto, o consumo global de energia direciona outras três análises que devem ser igualmente consideradas: a iluminação natural, o aquecimento solar, e o arrefecimento passivo. Por outro lado, a forma do edifício é ainda um ponto essencial pois esta é sobretudo determinante relativamente ao aproveitamento ou não da energia solar, consoante a

estação da época de arrefecimento ou da época de aquecimento. Uma das variáveis mais importantes na orientação de um edifício é saber qual a radiação solar e sua incidência. As ferramentas esquemáticas incluem regras de ouro (ver subcapítulo 2.2.2, em “Regras de ouro”) e gráficos simples que fornecem as primeiras dimensões, formatação e informação da colocação para os elementos de um edifício num sítio específico. As ferramentas de desenvolvimento permitem efetuar comparações entre sistemas completos ao longo de uma estação típica de aquecimento (inverno) e arrefecimento (verão) e são apropriadas para fazer a distinção entre o que é melhor para o programa particular de construção e o que é melhor para o desempenho térmico (ver subcapítulo 2.2.4, em “Ferramentas para a estimação do desempenho térmico”). As ferramentas finais efetuam simulações detalhadas, hora à hora, proporcionando a última relação entre a dimensão, tipo de sistema, programa de construção, e desempenho detalhado.

2.2.2 Regras de ouro

As regras de ouro são muito úteis aos projecionistas como ponto de partida antes de efetuar a construção de um edifício. Por definição, uma regra de ouro é uma regra em que a observação e a aplicação são particularmente aproveitadas. Tem-se o exemplo em que se quer seleccionar a orientação dum edifício solar passivo de modo a aproveitar ao máximo a radiação solar. Hoje em dia, sabe-se que é mais conveniente orientar um edifício solar passivo com a fachada virada a sul numa localidade situada no hemisfério norte (Gonçalves *et al.*, 2004). No que diz respeito ao aquecimento passivo surge o critério da transferência de calor global, para cada componente do edifício (parede, teto ou solo), para o tipo de clima e para o tipo de edifício (residencial ou não residencial). Para o arrefecimento, existe uma técnica em que usa um gráfico que permite instaurar estratégias de arrefecimento passivo aplicáveis. Existe igualmente uma regra de ouro no que diz respeito a luz natural. Por exemplo, a área do sol deve se situar entre 2 e 2,5 vezes a altura da janela da parede exterior. Exemplo para o sistema de ganho direto, sendo a fachada envidraçada orientada a sul, no hemisfério norte. No entanto, algumas dificuldades surgem como o sobreaquecimento em dias claros no inverno. Porém, isto pode ser rapidamente ultrapassado se a espessura da massa térmica do solo estiver bem relacionada com as dimensões da janelas e ainda se forem adicionados materiais de mudança de fase no solo. Alguns artigos, relativamente ao ganho direto, dão maior importância a superfície da massa térmica do que propriamente o peso da massa térmica e recomendam uma massa mínima com um rácio de 6:1 de superfície de abertura do envidraçado (Balcomb, 1992). Outra condição, no que se refere a prevenção de sobreaquecimento, relaciona-se com o rácio da área do vão envidraçado com a área do pavimento sobre o exterior em que não deve exceder mais de 7% (Epsea.org, 2011). No presente estudo, identificam-se outras regras de ouro ou referências para projetos de sistemas de aquecimento passivo, que se descrevem mais à frente.

2.2.3 Geometria solar

Os diferentes percursos do sol, ao longo do dia, para as diferentes estações do ano, são muito importantes na conceção de uma casa solar passiva. O estudo da forma do edifício e das obstruções à incidência da radiação do sol designa-se por “Geometria da Insolação ou Geometria Solar” (Gonçalves *et al.*, 2004). Geralmente incluem-se neste estudo, os efeitos de palas e sombreamento do próprio edifício bem como os efeitos de

sombreamento circundante. Foram desenvolvidas ferramentas que permitem avaliar a posição do sol segundo as zonas de sombreamento (Balcomb, 1992). É um dos processos mais fastidiosos visto que o estudo, que visa obter gráficos da posição do sol, segundo as diferentes zonas de sombreamento, deve ser realizado para cada localização e cada superfície de construção. Neste caso, realçam-se ferramentas tais como o “Sun Locator” para dias curtos, o “Sun Chart” para o ano inteiro, e o “Solar Pathfinder”. Podem ser encontradas ferramentas mais sofisticadas que permitem facilitar o estudo dos sombreamentos como o “Solar Calculator” e o recente software de modelagem 3D, o “Google Sketchup”, e até telemóveis como “Smartphones”.

2.2.3.1 Método usando o “Sun Locator” para dias curtos

Este método rudimentar só funciona para algumas latitudes pelo que as medições só deverão ser efetuadas no dia 21 de dezembro, dia mais curto do ano (para a latitude norte) em que o sol aparece na posição mais baixa no céu. Após se ter efetuado as medições pode-se estimar uma boa aproximação para os meses anteriores ou posteriores a esta data. Esta ferramenta foi igualmente concebida para as latitudes compreendidas entre 43°N e 47°N ou entre 43°S e 47°S, pelo que se pode efetuar uma ótima aproximação para as latitudes mais pertos. A Figura 12 mostra o “Sun Locator”, e a Figura 13 mostra como se deve proceder às medições com o “Sun Locator” (Rimstar, 2011).

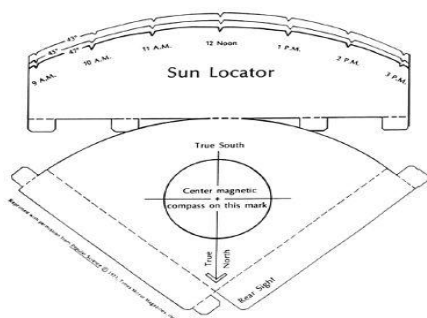


Figura 12: Imagem do “Sun Locator” (Fonte: (Rimstar, 2011))



Figura 13: Imagem do “Sun Locator” ao ser utilizado (Fonte: (Rimstar, 2011))

2.2.3.2 Método usando uma ferramenta Elevação/Azimute e “Sun Chart”

Este método, muito mais eficaz, consiste em recolher informações da elevação e do azimute dos objetos (edifícios, vegetação, etc.), que estão em torno do que será o local onde se deseja implementar, em geral, um coletor solar, em que se pretende transportar essa elevação e esse azimute no gráfico solar. Este princípio funciona, igualmente, para as diferentes concepções de edifícios solares passivos (ganho direto, ganho indireto, etc.). O gráfico solar indica em que altura do ano, o coletor solar estiver sombreado. A Figura 14 mostra uma “ferramenta” de fabrico caseiro que apresenta uma configuração eficaz para determinar a elevação e o azimute dos objetos (Rimstar, 2011). Estes dois gráficos, ambos semelhantes, designam-se por “Sun Chart” desempenhando a mesma tarefa, isto é, avaliam os ângulos, sendo um (gráfico na posição vertical) delimita a elevação dos objetos e outro (gráfico na posição horizontal) delimita o azimute dos objetos. As

Figuras 15 e 16 mostram duas imagens de como se deve efetuar, na prática, a determinação dos ângulos da elevação e do azimute em que se encontram os objetos, utilizando os gráficos “Sun Chart” (Rimstar, 2011).

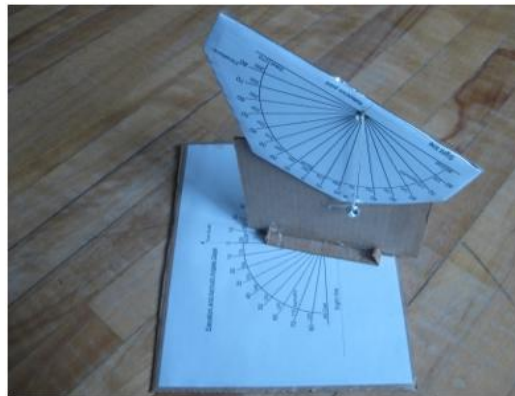


Figura 14: Imagem de uma ferramenta de fabrico doméstico para medir o azimute (parte horizontal) e a altitude (parte vertical) dum objeto (Fonte: (Rimstar, 2011))

Coloca-se a ferramenta no local, onde se pretende implementar o coletor solar, e começa-se a medir de uma ponta a outra os ângulos da elevação e do azimute para cada objeto, anotando-os um por um. Neste caso, a imagem mostra que o objeto, que está a ser localizado, é uma porção de ramos de uma árvore.



Figura 15: Medições da elevação (Fonte: (Rimstar, 2011))

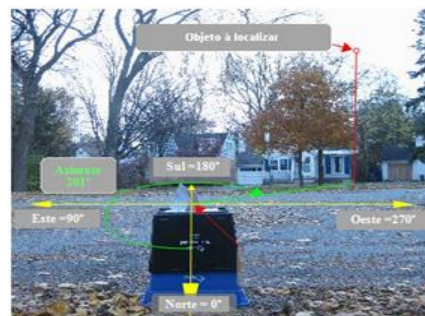


Figura 16: Medições do azimute (Fonte: (Rimstar, 2011))

A Figura 17 mostra os “resultados finais” após a determinação dos ângulos da elevação e do azimute dos objetos (Rimstar, 2011). De seguida, transcreve-se os dados recolhidos para o gráfico solar. De salientar que todas as localidades possuem o seu próprio gráfico solar, pois a posição do sol não é o mesmo em qualquer sítio, pelo que se pode arranjar facilmente, através de alguns “Sites” da Internet, alguns gráficos consoante a latitude e a longitude do local (Sol. Rad. M. Lab., 2007). Pode-se observar, através do gráfico da Figura 17, que o limite por baixo representa o sombreamento e por cima a luz solar. As curvas de cor azul representam alguns dias do ano e as curvas de cor vermelha, as horas do dia. Por exemplo, neste local concreto, adivinha-se que haverá muito menos radiação solar nos meses de novembro e dezembro, devido sobretudo a vegetação.

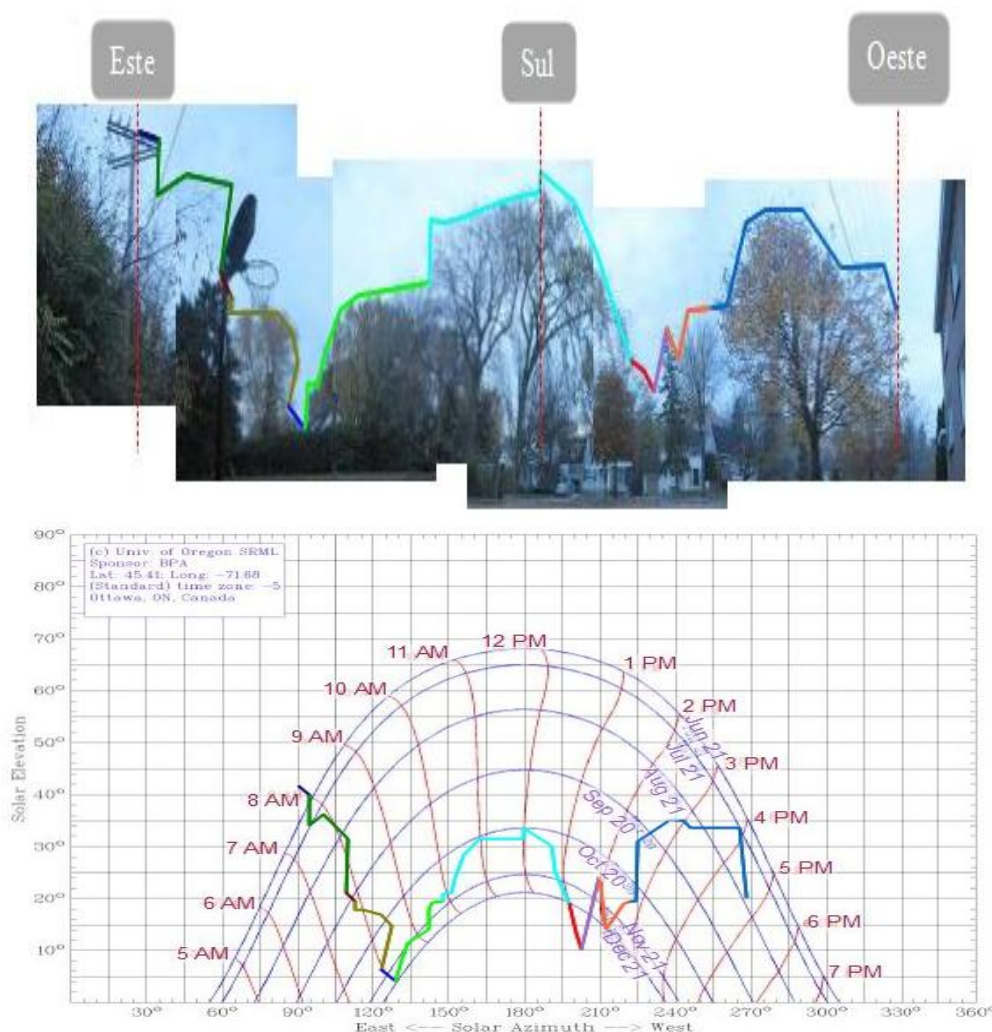


Figura 17: A imagem de cima mostra linhas a cores que delimita a zona de sombra da zona clara. A imagem de baixo mostra a transposição destas linhas no “Sun Chart” (Fonte: (Rimstar, 2011))

2.2.3.3 Método usando o “Sun Pathfinder”

O “Sun Pathfinder” é uma das ferramentas mais simples de usar, no intuito de procurar zonas de sombreamento, e pode ser efetuado em qualquer altura do dia e do ano. O traçado da zona de sombreamento é diretamente efetuado num pequeno gráfico solar, inserido dentro do “Sun Pathfinder”, com a ajuda de uma caneta especial para este efeito. As Figuras 18 (a), 18 (b) e 18 (c) mostram exemplos de imagens do “Sun Pathfinder” e do seu gráfico solar (Simp. Ener. W., 2010; Sol. Path., 2012).

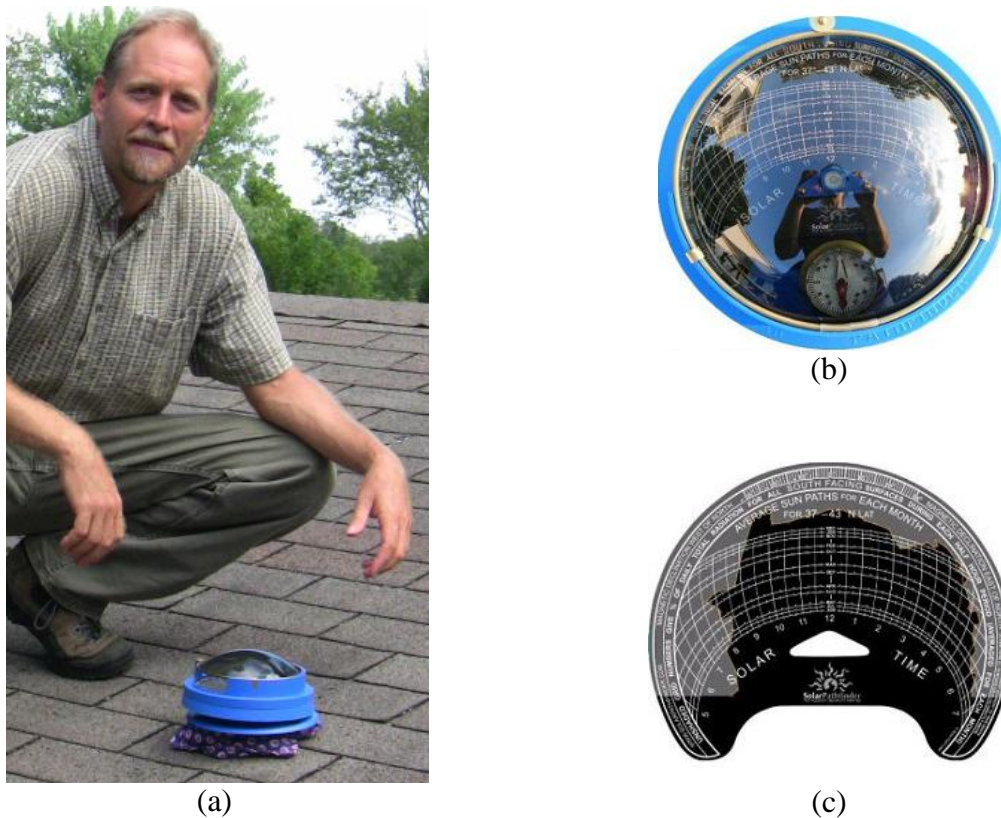


Figura 18: (a) Imagem de um “Sun Pathfinder” no seu tamanho real (Fonte: (Simp. Ener. W., 2010)) (b) Imagem de topo do “Sun Pathfinder” em que se pode observar as zonas de sombreamento circundantes (Fonte: (Sol. Path., 2012)) (c) Imagem do gráfico solar com o limite da zona de sombreamento em cinzento (Fonte: (Sol. Path., 2012))

A Figura 19 mostra em pormenor um gráfico solar especialmente concebido para o “Sun Pathfinder” (Sol. Path., 2012). Os gráficos solares, desta ferramenta, são igualmente diferentes consoante a latitude em que se encontra o local em estudo e para a orientação em que se pretende implementar, por exemplo, um coletor solar. Neste caso concreto, este gráfico funciona unicamente para efetuar medições nas latitudes compreendidas entre 37° e 43°N com orientação a sul.

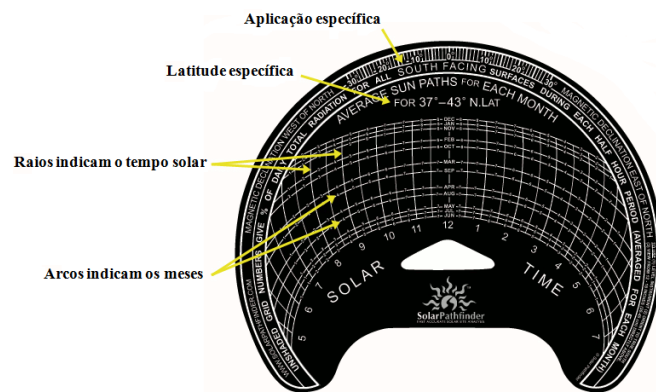


Figura 19: Imagem de um gráfico solar especialmente concebido para o “Sun Pathfinder” (Fonte: (Sol. Path., 2012))

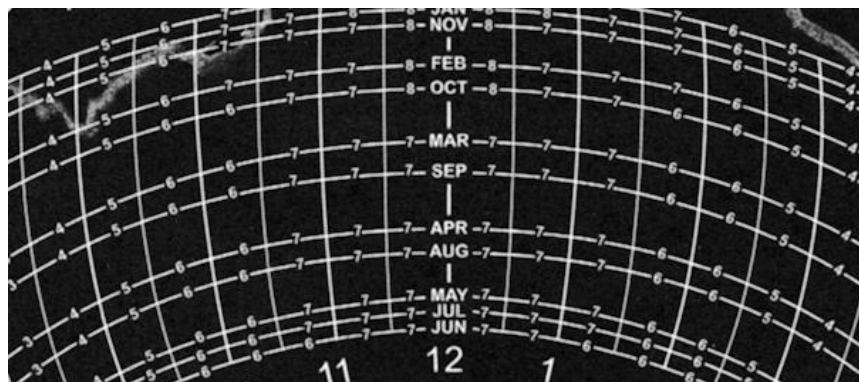


Figura 20: Imagem em pormenor do gráfico solar em que se mostra pequenos números intercalados para cada mês. Estes números representam a percentagem de radiação solar que devem ser contabilizados quando estes se encontram na parte exposta ao sol (Fonte: (JR's Blog, 2012))

A figura 20 mostra, em pormenor, o gráfico solar em que se pode observar pequenos números que estão representados ao longo dos arcos de cada mês (JR's Blog, 2012). Estes números representam a percentagem de radiação solar e servem para quantificar o total de radiação solar. Basta somar os números que estão na parte exposta ao sol para encontrar a percentagem total de radiação solar para cada mês.

2.2.4 Ferramentas para a estimação de desempenho térmico

Existem ferramentas que permitem grosso modo efetuar uma análise numérica a fim de prever as necessidades do aquecimento e arrefecimento auxiliar sob condições climáticas médias (Balcomb, 1992). Foram desenvolvidos vários métodos para avaliar o desempenho térmico e as necessidades de aquecimento e arrefecimento auxiliares de um edifício solar passivo com sistema de ganho direto e indireto. Entre eles destacam-se o método da razão do coletor de carga (LCR: “Load Colector Ratio”) que permite estimar anualmente a fração solar (SHF_{anual} : “Solar Heating Fraction”) e a razão de carga solar (SLR: “Solar Load Ratio”) que permite avaliar a fração solar mensalmente (SHF) (Balcomb *et al.*, 1978). O método SLR é um método empírico, baseado em estudos de simulação extensivos de desempenhos de muitos sistemas de aquecimento passivo, que permite estimar as necessidades da energia auxiliar e da energia solar mensal (Duffie *et al.*, 2006). Os resultados anuais do método LCR apresentam uma menor margem de erro com cerca de 3% em relação ao método calculado mensalmente (SLR). Faz-se uma abordagem mais detalhada na secção 4 em “Metodologia de avaliação”, em relação a estes métodos, para os sistemas de ganho direto e indireto.

2.2.5 Ferramenta para a estimação do conforto térmico

A quantificação do conforto térmico é mais difícil estimar do que em relação a quantificação das necessidades de aquecimento auxiliar pois envolve fatores fisiológicos e psicológicos. O conforto térmico varia com a temperatura do ar, temperatura da superfície, movimento do ar como também a qualidade do ar. O conforto, para uma dada medida de ambiente interior, depende de muitas condições

como da idade da pessoa, da sua atividade, do vestuário usado, e podem variar com as estações e o contexto cultural.

2.3 AQUECIMENTO SOLAR NOS EDIFÍCIOS PASSIVOS

Distingue-se, habitualmente, dois tipos de procedimento do aquecimento solar: Os sistemas “mecânicos” ou ativos como os ventiladores e as bombas de calor e os sistemas “naturais” conhecidos, igualmente, por sistemas passivos, que utilizam, unicamente, meios naturais de transmissão de energia como a convecção, condução e radiação.

2.3.1 Técnicas de aquecimento solar naturais

Refere-se aos dispositivos de aquecimento solar que usam, unicamente, meios naturais de transmissão da energia térmica. Neste caso, o dispositivo de armazenamento está integrado, maioritariamente, na estrutura do edifício (por exemplo, para um dado tipo de armazenamento térmico), e isto traz benefícios no plano económico. No entanto, esta integração dos elementos solares, na construção, constitui um entrave arquitetural para o desenhador que lhe-deixará menor liberdade comparativamente a um sistema de aquecimento solar mecanizado. Dentro dessas técnicas de aquecimento solar natural, podem-se destacar os sistemas naturais do tipo janela ou, numa linguagem mais técnica, do tipo vão envidraçados. Essa técnica é igualmente conhecida como de ganho direto. A Figura 21 mostra um exemplo de um esquema de um habitat solar passivo que utiliza sistema de ganho direto (Extension, 2010). Estes sistemas naturais são os menos sofisticados.

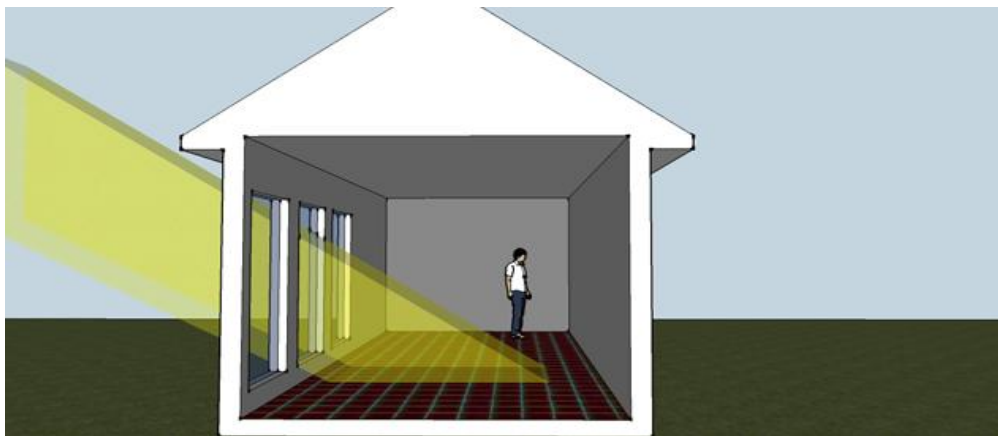


Figura 21: Representação esquemática de uma casa solar passiva do tipo ganho direto (Fonte: (Extension, 2010))

A energia solar é captada através de vãos envidraçados, geralmente, virados a sul de maneira a tirar partido dos benefícios fornecida pela superfície nas latitudes nortes, temperadas: contribuição máxima no inverno (posição baixa do sol) e mínima no verão (posição alta do sol). A Figura 22 mostra exatamente as diferentes posições do sol para o inverno e o verão em que se verifica uma maior quantidade de radiação solar à

incindir no interior do edifício para a época de inverno (Buid. Mod. G., 2012). A energia é acumulada nas outras partes da construção: calçadas, divisórias, paredes com isolamento exterior, etc.

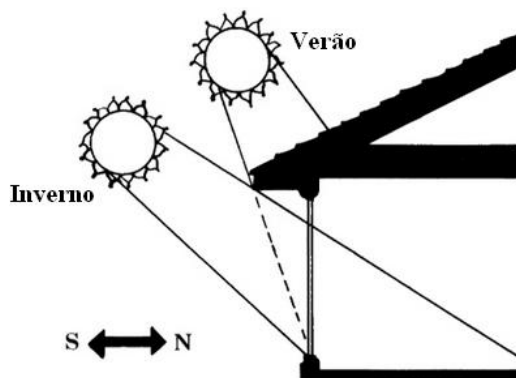


Figura 22: Representação esquemática das diferentes posições do Sol, com os raios a incidir dentro ou fora edifício, consoante a estação de aquecimento (inverno) e de arrefecimento (verão) (Fonte: (Build. Mod. G., 2012))

As persianas e as coberturas podem regular as necessidades solares. Porém, estes sistemas de tipos de vão envidraçados apresentam dois sérios inconvenientes: É necessário aceitar sobreaquecimento durante o período de insolação de modo a assegurar acumulação para a noite; a regulação da restituição da energia acumulada é impossível de ser obtida. Outra técnica de aquecimento solar natural é o uso de fachada acumulável, ou ganho indireto. O mais conhecido deste procedimento é o que foi posto em prática, em 1956, por Félix Trombe¹ no “Laboratoire de l’Energie Solaire du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)”, em França, no qual é denominado por parede de Trombe.

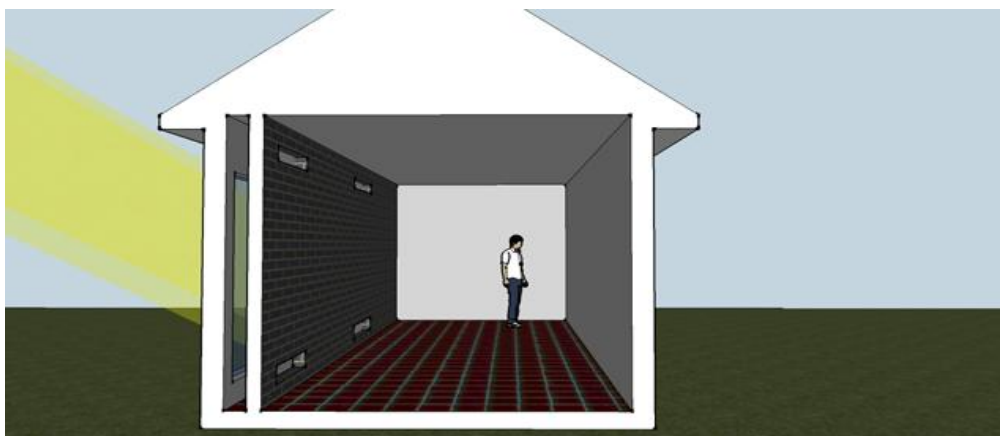


Figura 23: Representação esquemática de uma casa solar passiva do tipo ganho indireto, usando uma parede Trombe (Fonte: (Extension,2010))

¹ Félix Trombe (1906-1985) – Licenciado em engenharia química, tanto trabalhou na área dos isolamentos como na área de produção de calor e frio, na parte dos edifícios. Apesar de ter dedicado uma grande parte dos estudos nos edifícios, Félix Trombe é mais conhecido em França por ter praticado espeleologia.

O princípio é muito próximo ao sistema de tipo ganho direto e para limitar os superaquecimentos inerentes neste tipo de instalação, uma massa acumulável é interposta entre a cobertura seletiva e o volume a aquecer. A Figura 23 esquematiza uma parede Trombe em posição de aquecimento, que é geralmente composta por alvenaria pesada (Extension, 2010). A parede acumulável pode igualmente ser realizada a partir de elementos que contém água ou materiais fusíveis. A energia solar é capturada entre uma cobertura seletiva (envidraçado duplo, por exemplo) e a superfície da parede que aquece. A distância entre o envidraçado e a parede deverá se situar entre 1 e 15 cm de modo a criar um pequeno espaço de ar (Hadorn, 2004). Parte da energia, que é transmitida neste pequeno espaço de ar, aquece, eleva-se por convecção e penetra no volume a aquecer em orifícios situados na parte superior da parede. Ar fresco é aspirado, naturalmente, da sala para um orifício situado na parte inferior da parede próximo do solo. Essa termocirculação de ar é eficaz, praticamente, durante toda a duração da insolação da fachada que se pode prolongar durante duas ou três horas. Outra parte da energia é transmitida por condução, através da parede, e manifesta-se na sua superfície interior, depois de um desfasamento que é função, principalmente, da natureza e da espessura do material, por uma elevação da temperatura. A energia é assim restituída ao volume a aquecer por convecção e radiação. A Figura 24 esquematiza alguns dos processos descritos anteriormente (Trombe, 1989). Convém realçar que na ausência de radiação solar, o fluxo convectivo inverte-se originando um arrefecimento acelerado no interior do edifício. De modo a prevenir este pequeno desagrado, será necessário instalar válvulas de encerramento manual ou automático nos orifícios. A parede de Trombe deverá conter materiais de alvenaria (betão, tijolo, concreto, etc.) e uma espessura que deve situar-se entre 20 e 30 cm revestidos com um material preto facilitando assim a absorção da energia solar (Hadorn, 2004). Para períodos de aquecimento, as paredes Trombe apresentam um rendimento na ordem de 30%, que é muito comparável ao rendimento dos sistemas mais sofisticados.

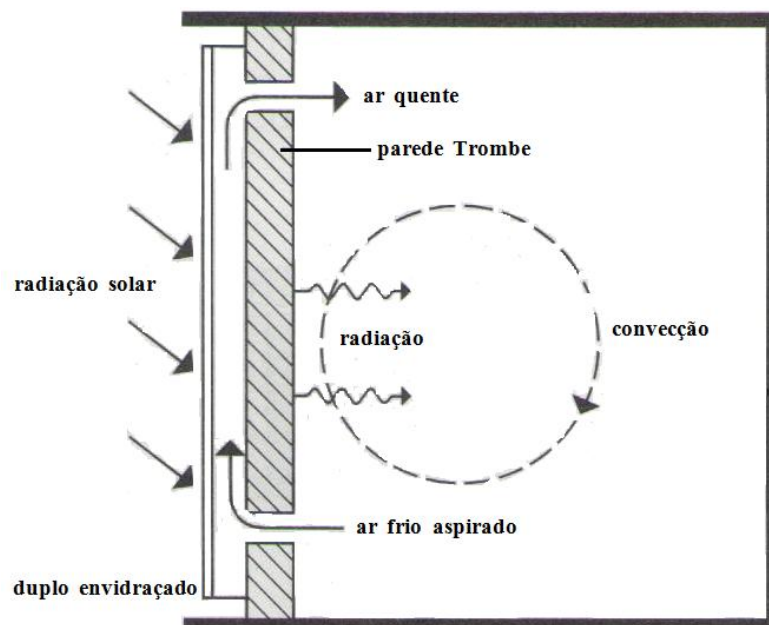


Figura 24: Representação esquemática de uma parede Trombe ventilada, com todo o processo envolvente no caso dos radiação solar incidir sobre a parede (Fonte: (Trombe, 1989))

Pode-se encontrar outra variante, na qual a parede não contém nenhum orifício o que leva a excluir quaisquer efeitos de termocirculação. Este tipo de parede de armazenamento térmico é conhecido como parede Trombe não ventilada no qual pode ser observado um exemplo esquemático através da Figura 25 (Trombe, 1989).

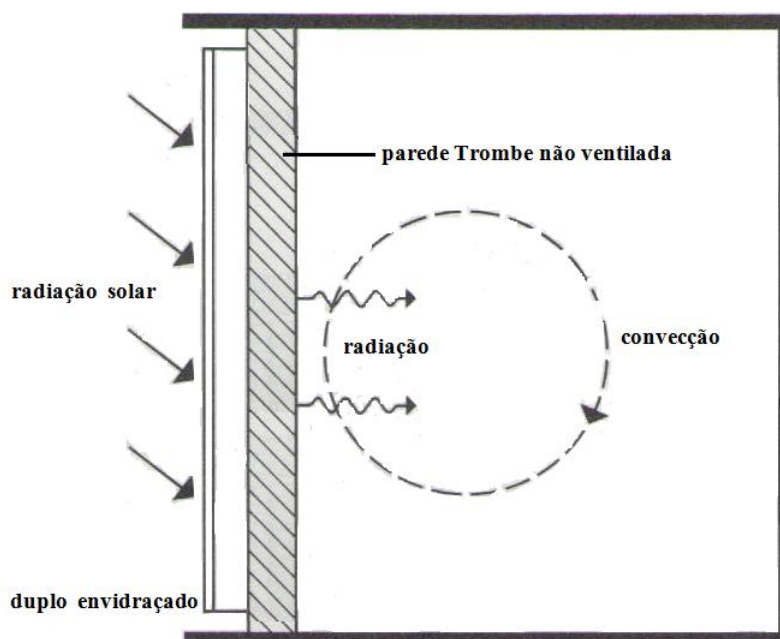


Figura 25: Representação esquemática de uma parede Trombe não ventilada, com todo o processo envolvente no caso dos radiação solar incidir sobre a parede (Fonte: (Trombe, 1989))

Outro procedimento, em que se utiliza a técnica de ganho indireto, é efetuado através da parede Trombe com água. Uma parede Trombe com água é similar à uma parede Trombe comum que pode funcionar tanto como de aquecimento e arrefecimento, mas como esta é translúcida tem a vantagem em deixar passar a luz do dia para o interior. Ainda possui outra vantagem que é a transferência de calor efetuada por convecção por toda a massa térmica de forma mais rápida em relação a uma parede Trombe com alvenaria, que se baseia unicamente na condução, e devido ao maior calor específico da água, esta armazena mais calor do que outros materiais (Saadatian *et al.*, 2012). Para aumentar a absorção da radiação solar, tem que se lhe adicionar um revestimento obscurecido na parte exterior à parede Trombe com água. Contudo, a contenção de líquidos como a água, dentro da parede Trombe é muito mais difícil do que a contenção de materiais sólidos tal como alvenaria pelo que este tipo de parede não é muito mais apreciado do que uma parede Trombe clássica. Ainda se pode encontrar outra variedade de aquecimento solar natural conhecida como “Attached Sunspace” ou varanda anexada. A varanda anexada é uma extensão vidrada orientada para o sul do edifício que funciona como uma parede Trombe ventilada (Autodesk, 2011). A Figura 26 mostra exemplos de varandas anexadas como meio alternativo em adquirir energia solar (Duffie *et al.*, 2006). A circulação de ar quente para o edifício pode ser efetuada por convecção natural ou com auxílio de ventiladores controláveis. Se a varanda possuir uma parede espessa entre ela e o edifício, pode ser considerada como uma parede coletora de armazenamento, com espaço alargado entre o envidraçado e a parede (ver exemplo Figura 26 (a)). Se a sua parte envidraçada estiver essencialmente no lado sul e o armazenamento é efetuado na sala (*i.e.*, a própria varanda) a ser aquecida, pode ser considerada como um sistema de ganho direto (ver Figura 26 (b) e 26 (c)).

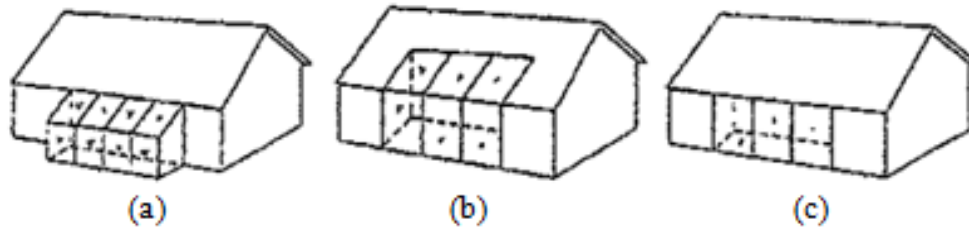


Figura 26: Representação esquemática de diferentes configurações de varandas anexadas (a) Ganho indireto (b e c) Ganho direto (Fonte: (Duffie *et al.*, 2006))

2.4 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM)

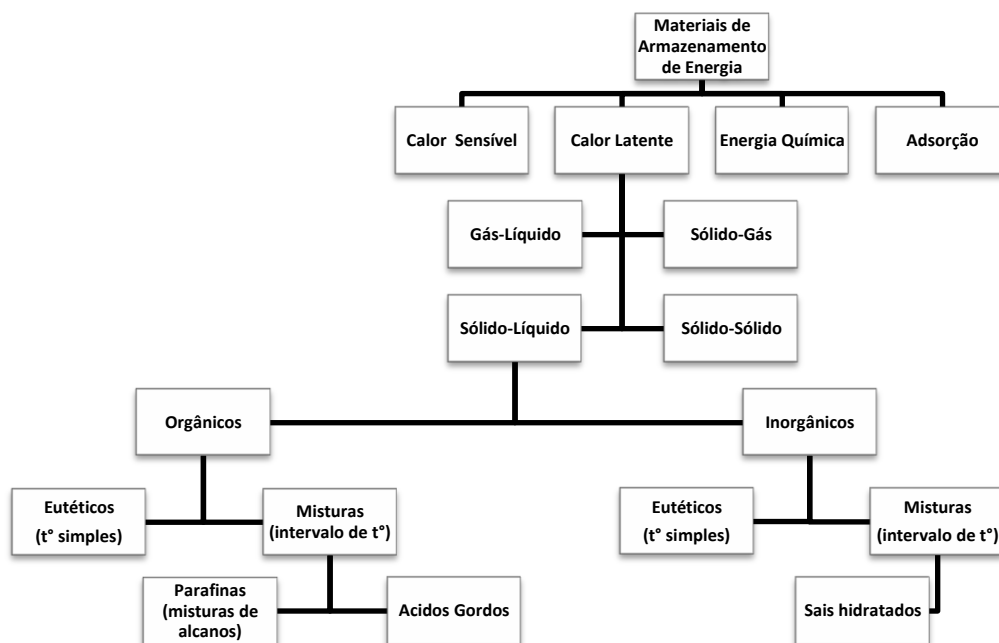


Figura 27: Classificação dos materiais de armazenamento de energia (Fonte: (Schmidt, 2005))

Os materiais de mudança de fase, mais conhecidos como PCMs (“Phase Change Materials”), são materiais cujas características podem ser vantajosas no seu uso para os edifícios solares passivos. Em relação aos outros materiais mais convencionais como o concreto ou alvenaria, os PCMs permitem armazenar uma maior quantidade de calor para uma mesma proporção. A Figura 28 mostra um exemplo de comparação entre a capacidade de armazenamento de calor para cada material usado na construção de um edifício (Dieckmann, 2006). Pode-se observar, através da Figura 28, que se necessita de uma menor espessura no caso de recorrer aos PCMs, comparativamente aos outros materiais para a mesma quantidade de armazenamento térmico.

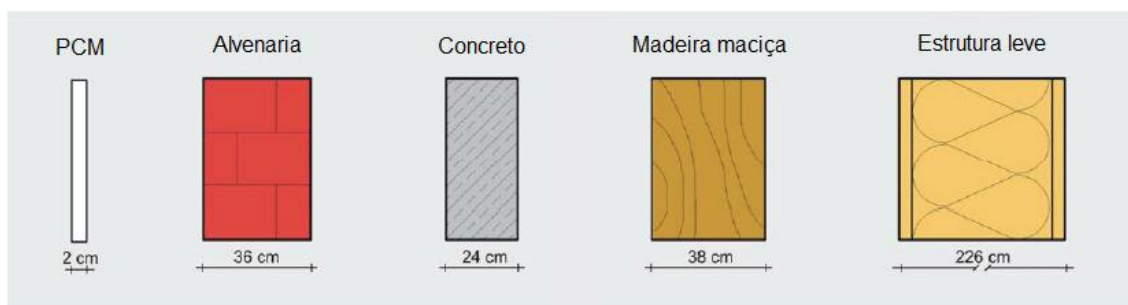


Figura 28: Comparação da espessura entre o PCM e os outros materiais (Fonte: (Dieckmann, 2006))

Isto verifica-se, de facto, devido às próprias características dos PCMs; ao contrário dos outros materiais que efetuam armazenamento térmico por calor sensível, isto é, as características físicas desses materiais mantêm-se inalteráveis verificando-se no entanto mudança de temperatura no meio, os PCMs têm a faculdade em mudar de fase, em geral fazendo a transição da fase sólida para a fase líquida e vice-versa, mantendo a temperatura do meio constante. A este fenómeno designa-se por calor latente ou entalpia de mudança de estado. Os PCMs podem ser divididos por compostos orgânicos e inorgânicos. Os PCMs orgânicos compreendem as parafinas e os ácidos gordos e os PCMs inorgânicos são, na maioria, constituídos por sais hidratados. A Figura 27 mostra uma classificação, em forma de esquema, dos diferentes modos de armazenamento de energia, nomeadamente o fenómeno de calor latente característico dos PCMs (Schmidt, 2007). Neste caso, os tipos de PCMs que têm sido sujeitos aos testes e análises e que são mais dirigidos nos edifícios solares passivos são as parafinas e os sais hidratados. A Tabela 1 apresenta as vantagens e desvantagens destes PCMs. Os sais hidratados são muito atrativos devido a estes apresentarem alta densidade volumétrica de armazenamento, alto ponto de fusão, baixa alteração de volume e menor custo em relação às parafinas (Cabeza *et al.*, 2011). Porém, os sais hidratados apresentam problemas de estabilidade cíclica por causa de se separarem potencialmente em diferentes fases e mostram igualmente sobrearrefecimento por não se cristalizarem no mesmo ponto de solidificação (Bajare *et al.*, 2011). Pelo simples motivo que efetuar a escolha certa entre um sal hidratado e uma parafina não ser uma tarefa muito fácil. No entanto certas companhias de produção de PCMs já desenvolveram produtos capazes de corrigir algumas lacunas apresentadas por esses tipos de PCMs. Relativamente aos dados históricos, o uso dos materiais de mudança de fase surgiu nos anos 40 e foram sobretudo aplicados em tanques de armazenamento térmico. Durante os anos 80, começou-se a integrar os PCMs nos edifícios e sua utilização tem vindo a aumentar nas últimas décadas, devido à necessidade de reduzir o consumo de energia e o seu custo (Izquierdo-Barrientos *et al.*, 2012). Nos edifícios, as primeiras colocações de PCMs, incorporadas em massa encapsulada, foram efetuadas junto às janelas das casas. Porém, este método de colocação revelou-se inadequado na finalidade de transmitir energia térmica para o ambiente. Desde então, muitos estudos e ensaios foram efetuados para fazer frente a esse problema e começou-se a implementar os PCMs nos elementos de construção tais como nas paredes dos edifícios (Obitayo, 2011). Os PCMs podem ser incorporados diretamente ou indiretamente em diferentes materiais, nomeadamente; placas de gesso, madeiras em concreto de peso leve, blocos de concreto, tijolos, painéis “sandwich”, etc. Nos subcapítulos 2.4.1 e 2.4.2, efetua-se uma abordagem mais detalhada na forma como os PCMs são utilizados para os sistemas de ganho indireto e direto, respetivamente. As Figuras 29 e 30 mostram, de uma forma simplificada, o funcionamento dos PCMs. A Figura 29 mostra os PCMs absorverem energia solar,

durante o dia, em que ocorre a transição de fase sólida para a fase líquida. À noite acabam por libertar a energia armazenada, mudando de fase líquida para a fase sólida, podendo ser visto na Figura 30 (BASF, 2012).

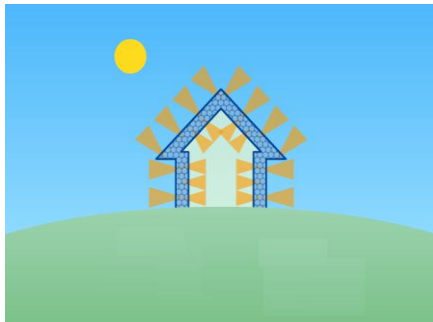


Figura 29: PCMs armazenando energia solar, durante o dia (Fonte: (BASF, 2012))



Figura 30: PCMs libertam a energia solar armazenada, durante a noite (Fonte: (BASF, 2012))

Tabela 1: Comparação das vantagens e desvantagens entre a Parafina e o Sal hidratado (Fonte: (Cabeza *et al.*, 2011))

	Parafina	Sal hidratado
Vantagens	<p>Não corrosiva</p> <p>Baixo ou nenhum sobreaquecimento</p> <p>Estabilidade térmica e física</p>	<p>Maior entalpia de mudança de fase e temperaturas de ponto de fusão</p> <p>Alta capacidade de armazenamento térmico</p> <p>Menor custo</p>
Desvantagens	<p>Menor entalpia de mudança de fase e ponto de fusão</p> <p>Menor condutibilidade térmica</p> <p>Inflamabilidade</p>	<p>Sobreaquecimento</p> <p>Corrosivo</p> <p>Separação de fase</p> <p>Segregação de fase, ausência de estabilidade térmica</p>

O fenómeno de histerese nos PCMs, como é mostrado na Figura 31, que é mais comum no caso dos PCMs inorgânicos do que nos PCMs orgânicos, traduz-se pela mudança de fase, não simétrica que se caracterize pelo trajeto quando ocorre fusão do PCM (de baixo para cima), diferente do trajeto quando ocorre solidificação do PCM (de cima para baixo) (Delgado *et al.*, 2012). Neste caso, o PCM demora a solidificar-se durante o arrefecimento na fase líquida. Porém, quando o PCM fica cristalizado, a temperatura mantém-se constante durante a transformação.

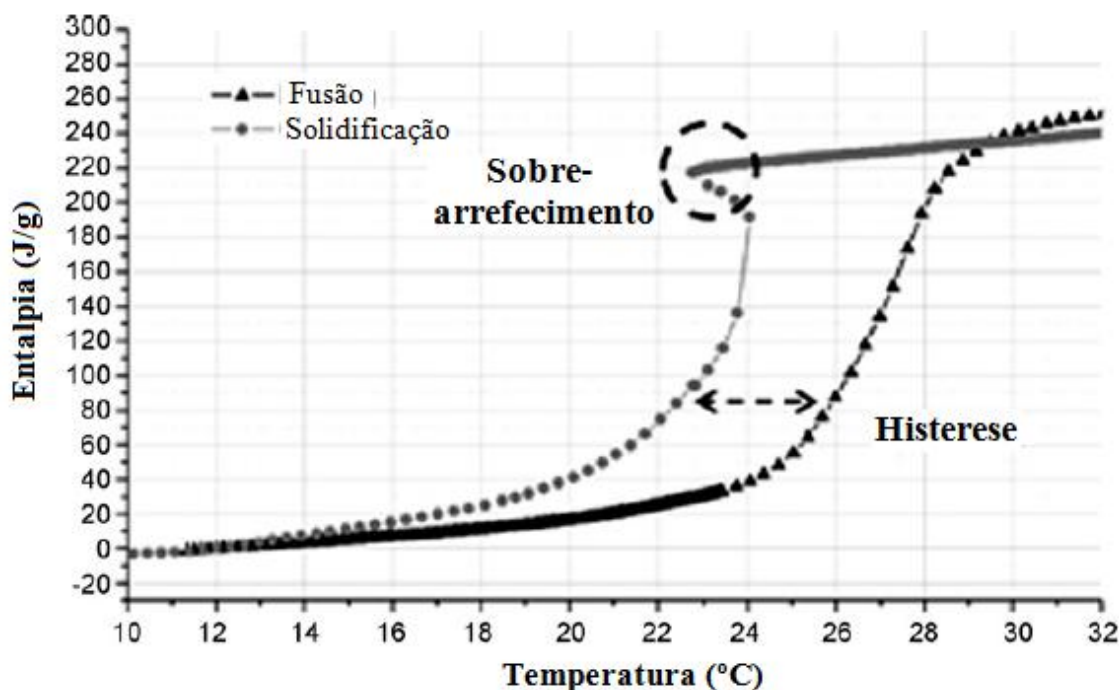


Figura 31: Figura representando os fenômenos de histerese e de sobrearrefecimento, fenómeno sobretudo comuns nos sais hidratados (Fonte: (Delgado *et al.*, 2012))

Existem muitos efeitos que originam fenómeno de histerese devido à ação do PCM pelo que o mais comum é o efeito de sobrearrefecimento, como se mostra na Figura 31. O efeito de sobrearrefecimento consiste no atraso da solidificação durante o período de arrefecimento da fase líquida do PCM; o PCM não se solidifica na fase da temperatura de equilíbrio líquido-sólido mas à uma temperatura mais baixa. Quando ocorre solidificação, a temperatura sobe para a temperatura de equilíbrio de mudança de fase, durante o resto da transformação.

2.4.1 Modo de incorporação

Existem vários modos de incorporar os PCMs nos elementos construtivos; estes podem ser efetuados diretamente ou indiretamente e por norma dentro dos elementos construtivos como em paredes, solo e teto.

2.4.1.1 Modo direto

O modo direto de incorporação é o método mais simples que consiste em inserir diretamente o PCM numa cavidade pré-concebida no elemento construtivo, como por exemplo, no interior de elementos de fachada. Alguns ensaios foram levados a cabo na introdução de PCMs efetuada diretamente em paredes (Huang *et al.*, 2006). Porém este método apresenta algumas desvantagens como o fenómeno de vazamento podendo provocar fissuras danificando o elemento construtivo pelo que nem todos os tipos de PCMs podem ser utilizados pelo método direto.

2.4.1.2 *Modo indireto*

Aparece outro modo de incorporação que é efetuado pelo método indireto ou encapsulação. O objetivo primário da encapsulação é reter a fase líquida e/ou sólida do PCM, mantendo-o isolado das componentes circundantes evitando assim males menores na deterioração dos elementos construtivos, como por exemplo risco de fissuras e fenômenos de vazamento. Existe outras vantagens deste modo de aplicação como o aumento da taxa de transferência de calor e a melhoria da estabilidade térmica e mecânica do PCM (Salunkhe *et al.*, 2012). Neste método, o PCM é colocado em contentores que podem ser de tamanhos diferentes. Quando se efetua a colocação de PCMs em contentores de grandes dimensões como em tubos ou painéis, designa-se a este modo de aplicação por macroencapsulação. São considerados de macroencapsulação, os contentores que apresentam uma dimensão superior a 1 mm (Salunkhe *et al.*, 2012). A Figura 32 mostra as diferentes geometrias possíveis da macroencapsulação dos PCMs. Quando o PCM se apresenta em forma de cápsulas, em geral de configuração esférica, e é introduzido em “Fin” polimérico de alto peso molecular; designa-se a este modo de aplicação por microencapsulação. As partículas revestidas podem ser, de seguida, incorporadas em matrizes que sejam compatíveis com a película encerrada nas capsulas (Maldonado, 2011). Neste caso, as dimensões podem variar entre 0 e 1000 μm (Salunkhe *et al.*, 2012).

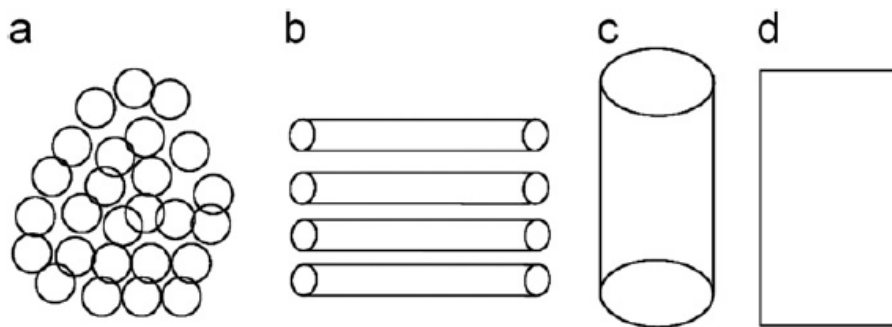


Figura 32: Representação de diferentes configurações possíveis no caso da macroencapsulação de PCMs. As Configurações podem ser (a) Esféricos (b) Tubos finos (c) Cilíndricos (d) Painéis (Fonte: (Salunkhe *et al.*, 2012))

Apesar dos contentores, que envolvem processos por macroencapsulação, serem menos complexo em ser produzidos, em relação aos contentores que envolvem processos por microencapsulação, este método apresenta algumas inconveniências como interferências com a construção envolvente e baixa transferência de calor, enquanto o fenómeno de transferência de calor é maior para o método por microencapsulação (Schossig *et al.*, 2006). Isto é devido ao facto da área de superfície ser substancialmente maior em relação ao volume, apresentando uma capacidade em resistir à alteração do volume durante o processo de mudança de fase e uma menor reatividade química do PCM com o material de revestimento (Salunkhe *et al.*, 2012). O método por microencapsulação apresenta algumas desvantagens como o sobreaquecimento do PCM (Salunkhe *et al.*, 2012). Verifica-se que a encapsulação de sais hidratados pode constituir um sério problema devido a sua natureza corrosiva e ser completamente solúvel em água, ao contrário dos PCMs orgânicos. Existem algumas empresas, como a Rubitherm, que desenvolveram alguns tipos de produto tal como painéis especialmente concebidas para incorporar PCMs, de modo a colmatar essas inconveniências. É efetuada uma descrição

mais detalhada deste produto, mais a frente na secção 3.3 em “Aplicação de PCMs na “célula-de-teste”. Pela quantidade de informações disponíveis, abordou-se principalmente a incorporação dos PCMs pelo método direto e indireto por macroencapsulação e microencapsulação que se apresenta, igualmente, na secção 3.3.

2.4.2 Ganho indireto (parede Trombe)

A incorporação de PCMs, na parede Trombe, faz com que estes mudam de estado, *i.e.*, da fase sólida para a fase líquida, quando a parede absorve radiação solar, durante o dia. À noite, o calor retido é redistribuído para aquecer o edifício. Como foi referido anteriormente, na secção 2.4, uma das vantagens do uso de PCMs reside no facto de se poder diminuir a massa térmica da parede Trombe, nomeadamente ao nível da espessura. Se por um lado, verifica-se que o sistema de ganho indireto, utilizando por exemplo uma parede Trombe ventilada e não ventilada, é o mais indicado para os edifícios solares passivos, em termos duma melhor gestão no aquecimento e no arrefecimento, observa-se, por outro lado, que a introdução de PCMs, nestes tipos de parede de armazenamento térmico, pode conduzir sérios problemas na transferência de calor, sobretudo no período da estação de aquecimento. Se ainda se pode notar o processo de fluxo convectivo, para o caso da parede Trombe, que permite extração de ar quente quando a radiação solar embate no vão envidraçado, a utilização de PCMs, nestas condições, pode prejudicar a condução de calor através da parede para o interior do edifício devido às próprias características dos PCMs. Os materiais de mudança de fase, por si só, são isolantes devido às suas propriedades físicas em reter o calor absorvido durante o dia, pelo que a necessidade energética, durante a noite, aquando da transferência de calor para o interior do edifício quando o PCM começa a solidificar-se, revela-se insuficiente. Por isso, para tirar maior partido da energia retida pelos PCMs, uma maior transferência energética só poderia ser realizável se for instalado um sistema que permite originar convecção forçada, como do tipo ventilador. A faixa da temperatura de fusão dos PCMs, no caso de estes serem implementados para este tipo de sistema, deverá situar-se entre os 22 e 50°C (Kara *et al.*, 2012). Em relação ao presente trabalho, experimentaram-se várias posições de colocação dos PCMs na parede Trombe a fim de avaliar qual a posição mais adequada em que se aproveite melhor os PCMs. Porém, após se ter efetuado as simulações, os resultados ficaram sempre inalterados aquando das diferentes posições dos PCMs. Neste caso concreto, optou-se implantar os PCMs na posição mais externa da parede Trombe, como se mostra no esquema da Figura 33. Esta escolha desta posição é fundamentada, considerando que a interação do PCM com o meio exterior é mais importante do que se PCM fosse colocado numa posição ainda mais interna da parede Trombe, visto que a espessura da parede é muito significativa e por possuir um material, o betão, que em si já é muito denso. A Tabela 2 mostra as propriedades físicas do betão, em que se usou para o presente estudo. Descreve-se, ainda, na secção 3.3 em “Aplicação de PCMs na “célula-de-teste”, os tipos de PCMs que foram abordados para o caso do ganho indireto em relação ao presente estudo.

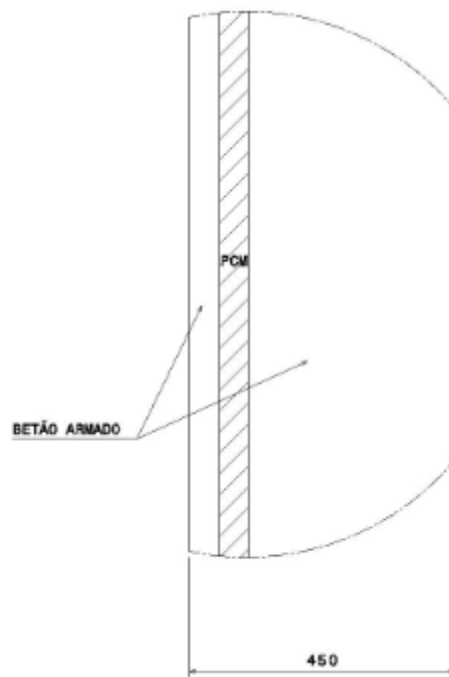


Figura 33: Representação esquemática da colocação dos PCMs no interior da parede Trombe

Tabela 2: Propriedades físicas do betão

Tipo de material	Propriedades físicas		
	Condutividade Térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Massa específica (Kg m^{-3})	Calor específico ($\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
Betão armado	1,73	2350	1000

2.4.3 Ganho direto

O método de incorporação dos PCMs, em relação ao caso do ganho direto, pode ser efetuada ao nível do solo ou das paredes interiores do edifício. Resultados experimentais, que envolvem a implementação de PCMs no solo, demonstram que num dia de céu claro, a radiação solar pode gerar, na área iluminada em relação ao pavimento sobre o exterior, uma temperatura de superfície mais elevada de 8°C do que na área sombreada, ao meio do dia (Athienitis *et al.*, 2000). Outra experiência foi conduzida numa “célula-de-teste”, na perspectiva de se colocar PCMs dentro de ladrilhos de cerâmica, ao nível do pavimento sobre o exterior, mais apropriada para estação de aquecimento, em que os resultados revelaram a estabilização da temperatura interior e a diminuição do consumo energético durante a noite (Cerón *et al.*, 2011). Neste caso, a implementação de PCMs é efetuada no pavimento sobre o exterior, na parte superior do betão que apresenta uma espessura de 15 cm, como se mostra na Figura 34. As propriedades físicas do betão são similares aquelas usadas na Tabela 2.

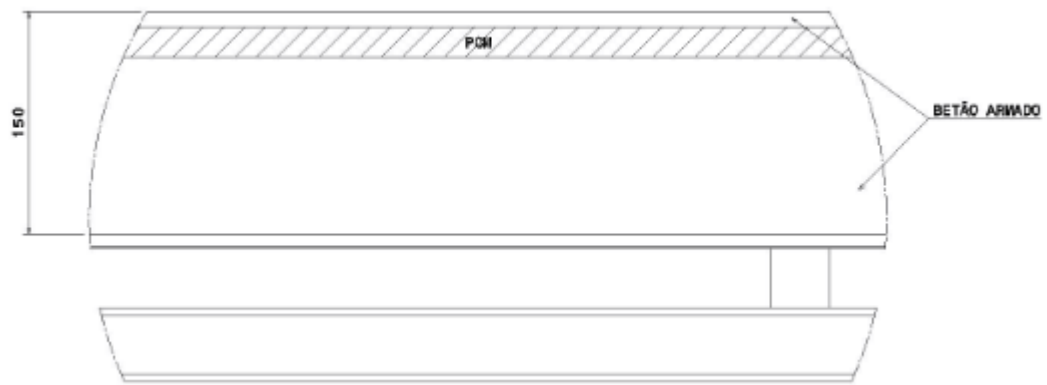


Figura 34: Representação esquemática da colocação dos PCMs no interior da camada de betão situada na parte superior do pavimento sobre o exterior

3 CASO DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÕES GEOGRÁFICAS

Segundo a classificação de Kopp n², o continente português possui um clima essencialmente mediterrânico, com um verão quente e seco e um inverno ameno e húmido. Apesar do território português ser relativamente pequeno, com cerca de 92000 km², Portugal apresenta muitas diversidades ao nível paisagístico com fortes contrastes na fauna e flora, e observa-se que as condi es climatéricas não são assim tão idênticas ao longo do território; exemplo disso, o inverno   muito mais frio e húmido no norte do que no sul, do país. Por outro lado, a radia o solar   diferente para cada região, mesmo entre regiões vizinhas. Devido aos diferentes percursos efetuados pelo sol, ao longo do ano, este apresenta uma posi o mais alta no verão e mais baixa no inverno, no hemisfério norte. Foi criado o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios conhecido como RCCTE que define os limites das necessidades nominais de aquecimento e arrefecimento de cada edifício. A RCCTE definiu, para cada concelho do país, zonas climat icas baseadas na variável graus dias de inverno (estaa o de aquecimento) e temperatura externa do projeto de verão (estaa o de arrefecimento). O país   dividido em três zonas climat icas de inverno; I1, I2 e I3, e três zonas climat icas de verão; V1, V2 e V3. As Figuras 35 (a) e 35 (b) apresentam a divisão das três zonas climat icas de inverno e de verão para Portugal continental. Por outro lado, as zonas de verão estão divididas em região Norte e região Sul. A região Sul abrange toda a área ao sul do rio Tejo e ainda o concelho de Lisboa (Camelo *et al.*, 2006).

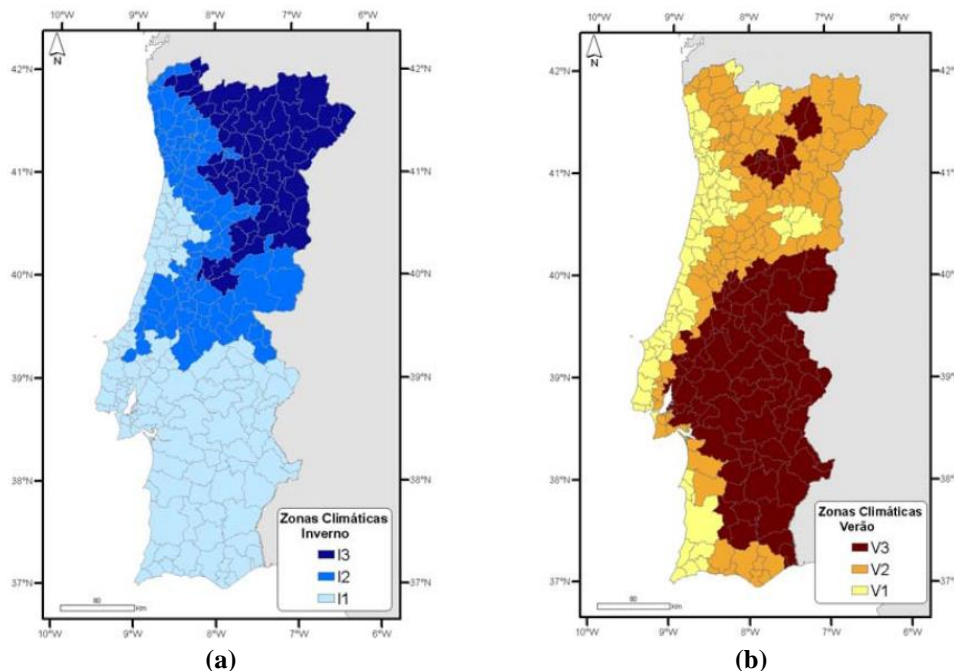


Figura 35: Representa o, no mapa de Portugal, (a) Zonas Climat icas de Inverno (I1, I2, I3) (b) Zonas Climat ica de Verão (V1, V2, V3) (Fonte: (Camelo *et al.*, 2006))

² Vladimir Kopp n (1846-1940) – Foi um cientista alemão que realizou algumas pesquisas na área da climatologia e da meteorologia, e que desenvolveu, por volta de 1900, um “mapa” climat ico para todas as regiões do globo, denominado de Classifica o de Kopp n.

3.1.1 Zonas climáticas de inverno

Os limites das três zonas climáticas de inverno foram estabelecidos à partir do número de graus dias de aquecimento na base de 20°C (Camelo *et al.*, 2006). “Graus dias de aquecimento (base 20°C)” é um número que caracteriza a severidade de um clima durante a estação de aquecimento e que é igual ao somatório das diferenças positivas registadas entre uma dada temperatura de base 20°C e a temperatura do ar exterior durante a estação de aquecimento. As diferenças são calculadas com base nos valores horários da temperatura do ar (termómetro seco) (Reg. Car. Comp. Tér. Edif., 2006). Pela observação do quadro sobre a distribuição dos concelhos de Portugal, segundo as zonas climáticas de inverno relativamente ao número de graus dias (GD), chega-se a seguinte dedução:

- $GD < 1500$; corresponde a I1
- $1500 \leq GD \leq 2000$; corresponde a I2
- $GD > 2000$; corresponde a I3

Outra variável importante, relativamente às zonas climáticas de inverno, diz respeito à duração de estação de aquecimento pelo que os valores da duração podem ser semelhantes ou diferentes entre as zonas.

3.1.2 Zonas climáticas de verão

Os limites das três zonas climáticas de verão foram estabelecidos com base nos valores atualizados da temperatura exterior de projeto de verão na qual corresponde à temperatura seca do ar exterior (Camelo *et al.*, 2006). “Temperaturas exteriores de projeto” é a temperatura exterior que não é ultrapassada inferiormente, em média, durante mais do que 2,5% do período correspondente à estação de aquecimento, ou excedida, em média, durante mais do que 2,5% do período correspondente à estação de arrefecimento, sendo portanto as temperaturas convencionadas para o dimensionamento corrente de sistemas de climatização (Reg. Car. Comp. Tér. Edif., 2006). Pela observação do quadro sobre a distribuição dos concelhos de Portugal, segundo as zonas climáticas relativamente à temperatura externa do projeto, chega-se a seguinte dedução:

- $Temperatura\ externa\ do\ projeto \leq 31$; corresponde a V1
- $31 < Temperatura\ externa\ do\ projeto < 34$; corresponde a V2
- $Temperatura\ externa\ do\ projeto \geq 34$; corresponde a V3

Aparece, igualmente, outra variável essencial relativamente às zonas climáticas de verão designado por amplitude térmica. “Amplitude térmica diária” é o valor médio das diferenças registadas entre as temperaturas máximas e mínimas diárias no mês mais quente (Reg. Car. Comp. Tér. Edif., 2006). Os valores desta variável podem ser semelhantes ou diferentes entre as zonas.

3.1.3 Seleção de concelhos

Foram selecionados nove concelhos de Portugal continental para nove zonas climáticas. A seleção dos concelhos foram efetuadas propositadamente em que se verifica o maior

número de habitantes para cada zona climática. A Tabela 3 apresenta os nove concelhos escolhidos e as respetivas zonas climáticas com o número de habitantes (Inst. Nac. Est., 2012). A localização destes concelhos e as respetivas zonas climáticas são mostradas na Figura 36, no mapa de Portugal continental.

Tabela 3: Zonas climáticas com o nº de habitantes no ano de 2011 (Fonte: (Inst. Nac. Est., 2012))

Concelho	Zona Climática	População (nº de habitantes)
Portimão	I1 V1	56530
Lisboa	I1 V2	547265
Beja	I1 V3	34769
Porto	I2 V1	242232
Braga	I2 V2	177840
Castelo Branco	I2 V3	54436
Guarda	I3 V1	40726
Vila Real	I3 V2	52781
Mirandela	I3 V3	23275

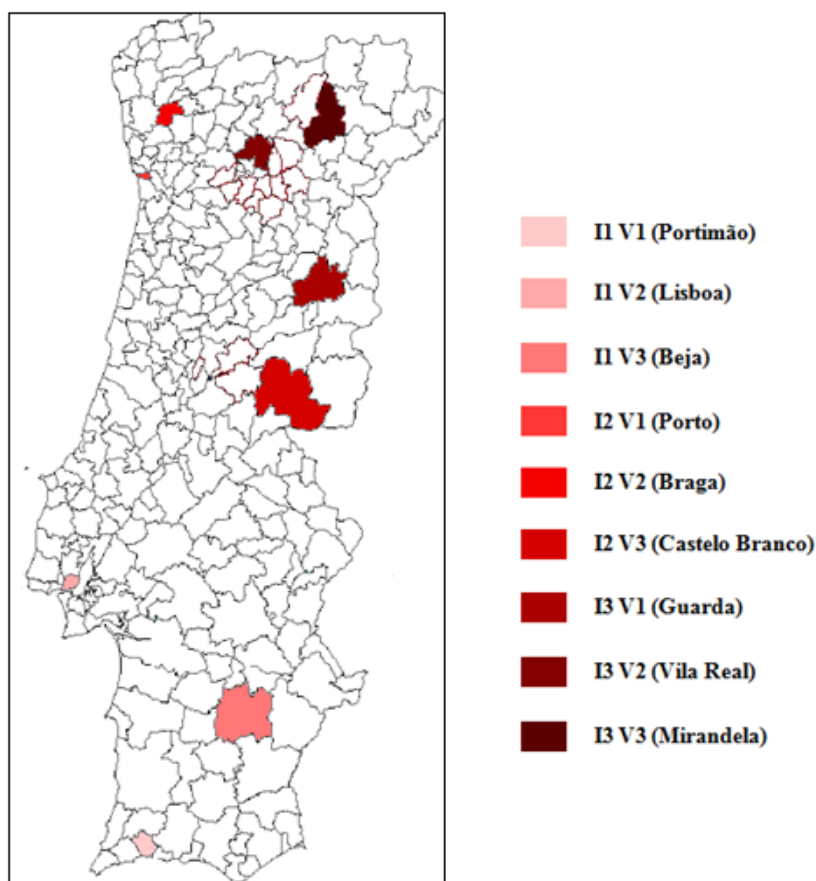


Figura 36: Localização das zonas climáticas no mapa de Portugal

Mostra-se igualmente a distribuição dos concelhos selecionados segundo as zonas climáticas e correspondentes dados climáticos de referência, através da Tabela 4 (Reg. Car. Comp. Tér. Edif., 2006).

Tabela 4: Indicação de alguns dados para cada zona climática (Fonte: (Reg. Car. Comp. Tér. Edif., 2006))

Concelho	Zona climática de inverno	Número de Graus-dias (GD) (°C dias)	Duração da estação de aquecimento (meses)	Zona climática de verão	Temperatura externa do projeto (°C)	Amplitude térmica (°C)
Beja	I1	1290	5,7	V3 (Sul)	36	17
Braga	I2	1800	7	V2 (Norte)	32	13
Castelo Branco	I2	1650	6,7	V3 (Norte)	35	15
Guarda	I3	2500	8	V1 (Norte)	31	13
Lisboa	I1	1190	5,3	V2 (Sul)	32	11
Mirandela	I3	2270	7,3	V3 (Norte)	34	16
Portimão	I1	940	5,3	V1 (Sul)	31	11
Porto	I2	1610	6,7	V1 (Norte)	30	9
Vila Real	I3	2660	7	V2 (Norte)	33	15

Apresenta-se na Tabela 5, a energia solar média mensal incidente numa superfície vertical orientada a sul na estação de aquecimento (G_{sul}) para Portugal continental (Reg. Car. Comp. Tér. Edif., 2006).

Tabela 5: Valores da energia solar média mensal (G_{sc}) para as zonas climáticas de inverno (Fonte: (Reg. Car. Comp. Tér. Edif., 2006))

Zona de inverno	G_{sul} (kWh m ² mês ⁻¹)
I1: Continente	108
I2: Continente	93
I3: Continente	90

3.2 “CÉLULA-DE-TESTE”

3.2.1 Dimensões e estrutura

A “célula-de-teste” situada junto a universidade de Aveiro (UA) possui dimensões 7x2,35x2,28m sendo repartido em duas partes iguais com dimensões 3,5x2,35x2,28m. A Figura 37 apresenta uma fotografia tirada da “célula-de-teste”.



Figura 37: Imagem da “célula-de-teste”

A Figura 38 mostra uma imagem da “célula-de-teste” realizada em 3D com recurso ao programa “CATIA”. As outras figuras mostram imagens, igualmente realizadas com o programa “CATIA”, das diferentes partes dos elementos construtivos da “célula-de-teste” sendo que a Figura 39 (a) representa os elementos de fachada, a Figura 39 (b) representa o pavimento sobre o exterior, a Figura 39 (c) representa a parede divisória e a Figura 39 (d) representa a cobertura exterior. A seguir, mostra-se uma imagem frontal da “célula-de-teste” em 2D, através da Figura 40, com os elementos construtivos a serem realçados com as letras A até D, em que se apresentam, através das Figuras 41 (a) até 41 (d), os tipos de materiais existentes nesses elementos construtivos.

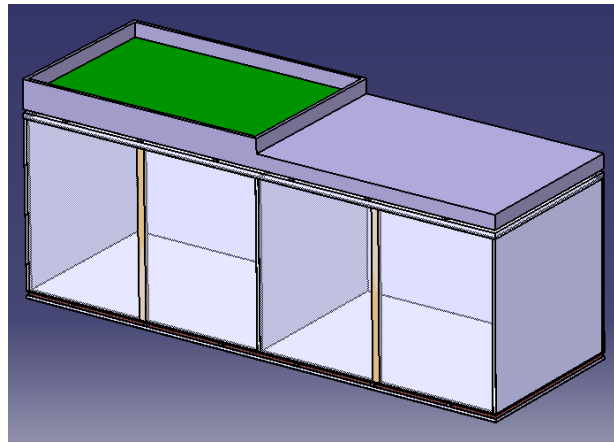


Figura 38: Representação da “célula-de-teste” em 3D, realizada com o programa “CATIA”

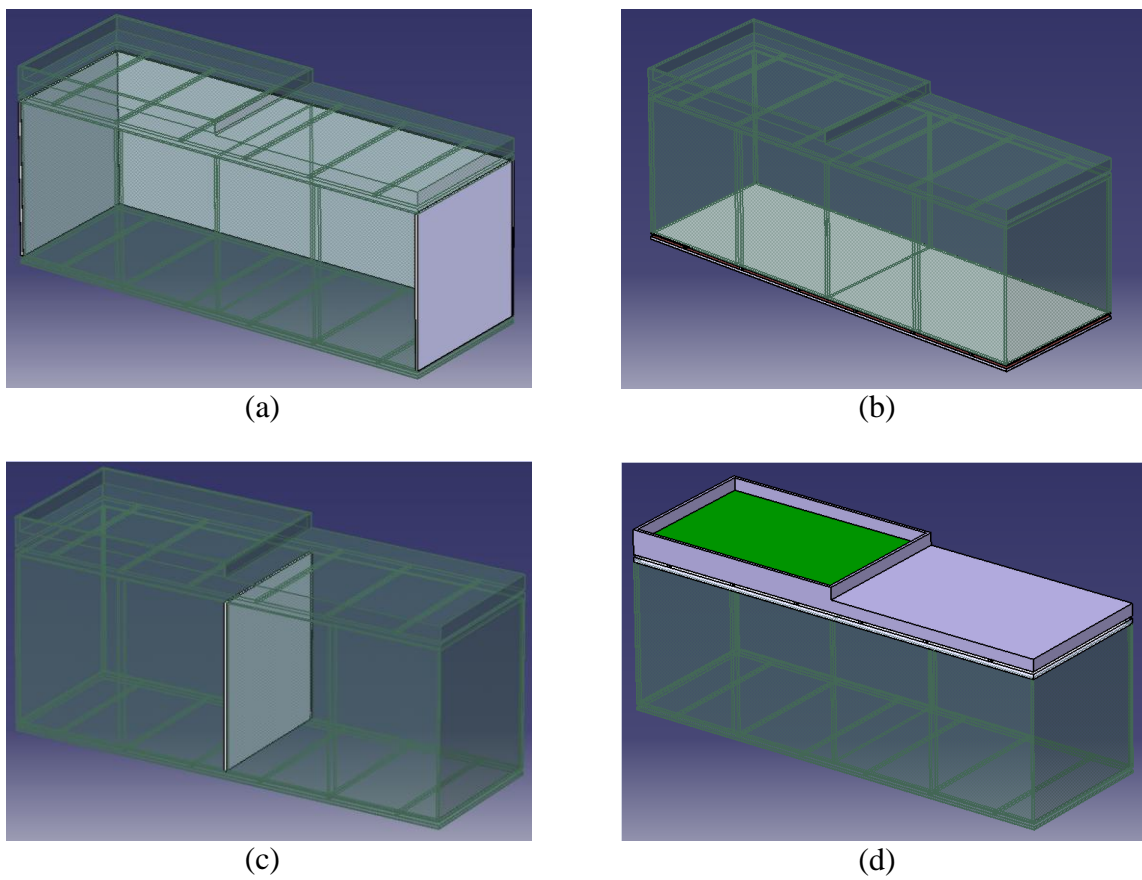


Figura 39: Esquemas realçando os elementos construtivos (a) Elementos de fachada (N, E, O) (b) Pavimento sobre o exterior (c) Fachada divisória (d) Cobertura exterior

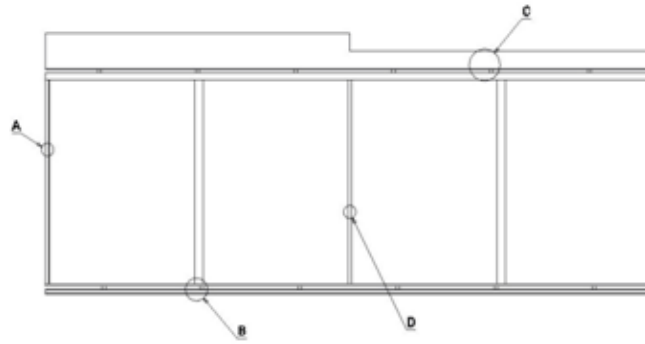


Figura 40: Representação da “célula-de-teste” com os elementos construtivos a serem realçados

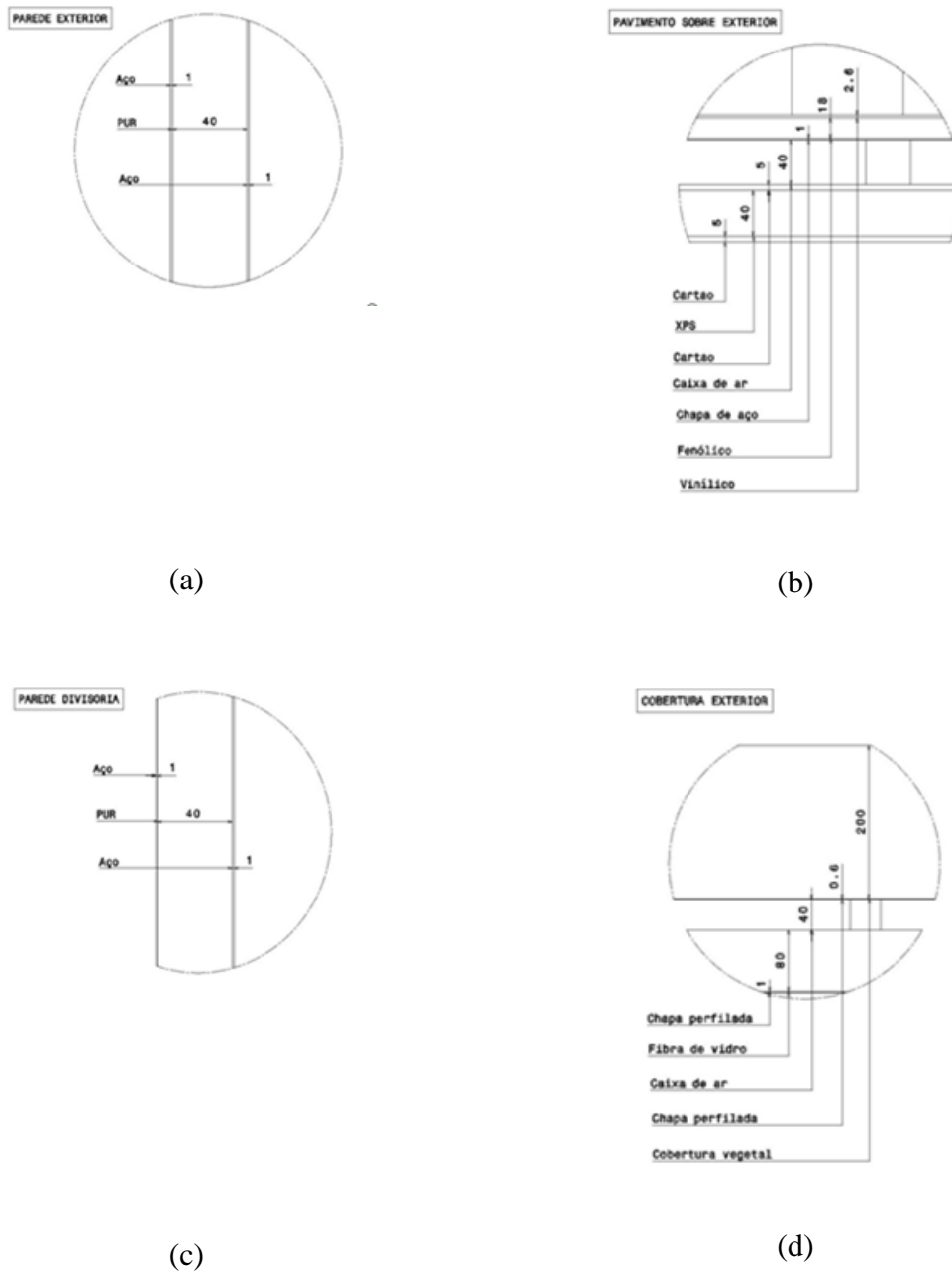


Figura 41: Tipo de materiais nos elementos construtivos em (a) Parede exterior (b) Pavimento sobre o exterior (c) parede divisória (d) Cobertura exterior

A Tabela 6 mostra as propriedades físicas para os diferentes materiais utilizados na “célula-de-teste”, pelo que estes materiais podem ser observados, em pormenor, na Figura 41 (a) até a Figura 41 (d), relativamente aos elementos construtivos.

Tabela 6: Propriedades físicas dos materiais usados na “célula-de-teste”

Tipo de material	Propriedades físicas		
	Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Massa específica (Kg m ⁻³)	Calor específico (J Kg ⁻¹ K ⁻¹)
Aço	50,0	7800	450
Cartão	0,240	1000	1700
Chapa de aço	50,0	7800	450
Chapa perfilada	50,0	7800	450
Fenólico	0,300	1300	1700
Fibra de vidro	0,040	57,5	840
Poliuretano (PUR)	0,037	42,5	1590
Vinílico	0,170	1390	900
Poliestireno extrudido (XPS)	0,037	32,5	1400

3.2.2 Análise termográfica



Figura 42: Imagem da “célula-de-teste”, com o aparelho de aquecimento, colocado na parte direita da “célula-de-teste”, que está representado a vermelho

Foi colocado, na parte direita da “célula-de-teste”, representada a vermelho mostrada na Figura 42, um pequeno aparelho de aquecimento, que pode ser identificado na Figura 43, de modo a gerar calor a fim de se poder observar as perdas térmicas, com ajuda de um termógrafo.



Figura 43: Imagem do aparelho de aquecimento

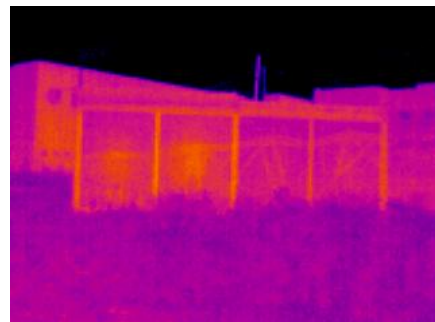


Figura 44: Imagem termográfica da “célula-de-teste”

Apresenta-se algumas imagens obtidas pelo termógrafo, em que se pode observar nitidamente, através da Figura 44, as diferenças de temperaturas, mais elevadas na parte direita representada a cor laranja, do que na parte esquerda da “célula-de-teste”. A escala de cores atribuída às diferentes temperaturas está apresentada na Figura 45 (b). Pode-se notar, igualmente, através da Figura 45 (b), algumas perdas térmicas, representadas a cor laranja, nos cantos da porta de entrada situada na parte traseira do

lado direito da “célula-de-teste”. A Figura 45 (a) mostra uma fotografia tirada da mesma porta. No interior da “célula-de-teste”, as Figuras 45 (c) e 45 (d) revelam maiores pontes térmicas situados nos cantos entre o envidraçado a sul e o pavimento sobre o exterior e nos cantos entre o envidraçado a sul e a cobertura exterior, onde se acumula uma grande parte do calor gerado pelo aparelho de aquecimento resultando, conseqüentemente, na perda de calor para o exterior da “célula-de-teste”.

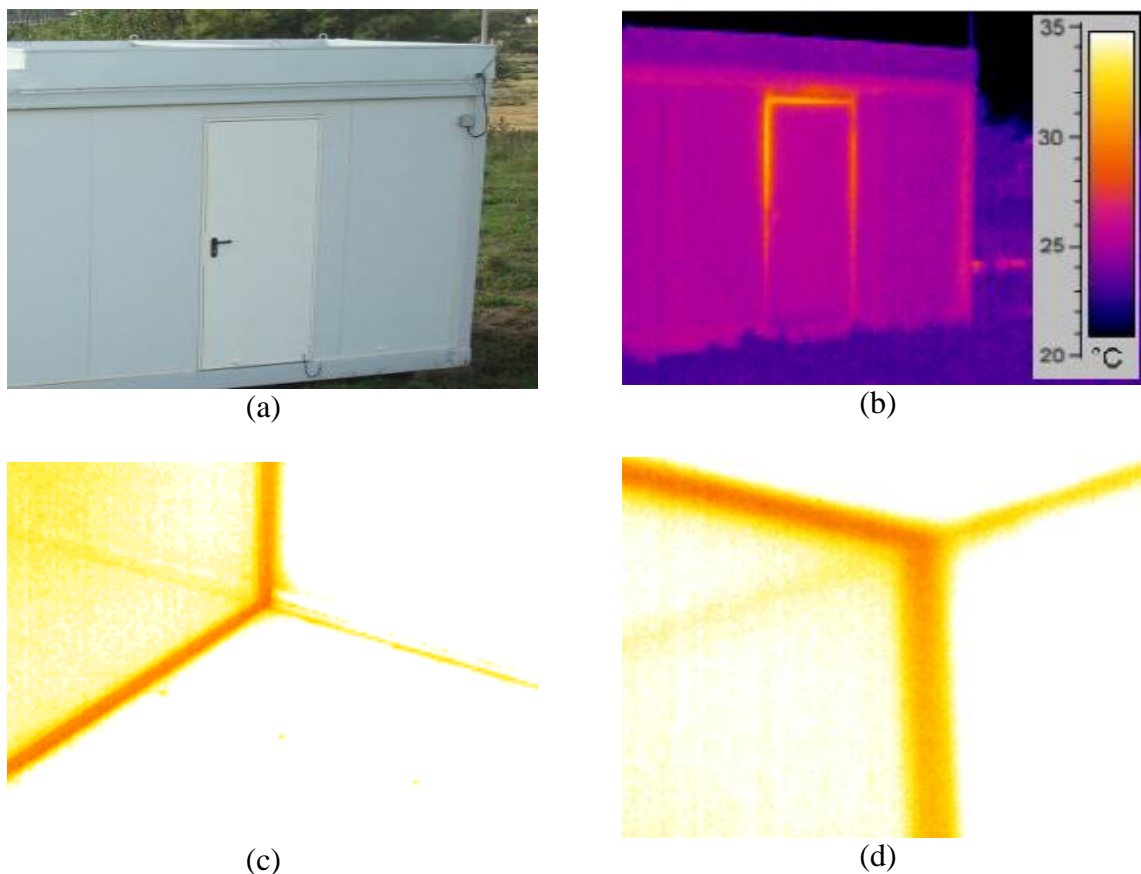


Figura 45: (a) Imagem da porta exterior (b) Imagem termográfica da porta exterior com e escala de cores (c) Imagem termográfico do canto inferior, dentro da “célula-de-teste” (d) Imagem termográfico do canto superior, dentro da “célula-de-teste”

A importância de uma casa bem isolada permite prevenir perdas de calor, possibilitando um máximo de aproveitamento do consumo energético reduzindo as necessidades auxiliar de aquecimento e evitando assim menores emissões de dióxido de carbono. A Figura 46 mostra uma fotografia tirada da parte baixa da “célula-de-teste” em que se pode observar que o pavimento sobre o exterior não chega a atingir o solo ambiente. Este pormenor é importante pois o programa de simulação “EnergyPlus” exige a introdução da temperatura média mensal do solo ambiente caso se verifique sua influência nessa parte de elemento construtivo. Portanto, não se implementou nenhuma temperatura que afetaria a parte da zona do pavimento sobre o exterior da “célula-de-teste”, no “EnergyPlus”.



Figura 46: Imagem da parte inferior da “célula-de-teste”

3.3 APLICAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE NA “CÉLULA-DE-TESTE”

Os tipos de PCMs, que foram utilizados para as experiências, em relação ao sistema de ganho direto e indireto, estão indicados na Tabela 7 com as respectivas temperaturas de fusão. No total, foram abordados oito tipos de PCMs entre os quais três são do tipo parafina e cinco do tipo sal hidratado. A Tabela 7 mostra, igualmente, para que tipos de sistema foram empregados cada PCM, sendo uns utilizados para ambos os sistemas. As temperaturas de fusão dos PCMs devem situar-se na gama entre os 20°C e 27°C para o caso dos edifícios (Bajare *et al.*, 2011). Temperaturas de fusão compreendidas entre os 20 e 21°C são mais dirigidas para climas mais frios no inverno, uma temperatura de fusão de 23°C é mais apropriada no caso de se querer manter a temperatura interna, dentro da zona de conforto em aplicações ativos e passivos, e temperaturas de fusão para além dos 26°C são mais adequadas para regiões mais quentes no verão, em aplicações passivas. São mostradas, na secção 4.2 em “Método de Taguchi”, as diferentes aplicações.

Tabela 7: PCMs usados no presente estudo

Nome do PCM	T° de fusão (°C)	Tipo de produto	Tipo de sistema	Fonte
RT21	21	Parafina	Direto	Rubitherm GmbH
Micronal	23	Parafina	Indireto	BASF
SP22	23	Sal Hidratado	Direto	Rubitherm GmbH
SP25	25	Sal hidratado	Direto/Indireto	Rubitherm GmbH
SP26	27	Sal hidratado	Direto/Indireto	Rubitherm GmbH
HS29P	29	Sal hidratado	Direto/Indireto	Rgees
ClimSel C32	32	Sal hidratado	Direto/Indireto	Climator
RT35	35	Parafina	Indireto	Rubitherm GmbH

3.3.1.1 PCM Rubitherm

A Rubitherm GmbH é uma empresa alemã, com sede em Berlim, que começou a criar e desenvolver PCMs, e outro tipo de produtos afins, em 1993, para a indústria, transporte logística, habitações, etc. (Rubitherm, 2012). A Rubitherm possui uma gama muito diversificada de produtos, nomeadamente, PCMs como as parafinas RT e sais hidratados SP. As parafinas RT são produzidas à base de parafinas com n-alcenos de fórmula química C_nH_{2n+2} , e ceras apresentando características técnicas com elevado grau de pureza o que lhes conferem alto armazenamento térmico mesmo para uma pequena faixa de temperatura de fusão (Evers, 1989). As parafinas RT possuem temperaturas de fusão que podem situar-se entre os -10°C e 100°C . As parafinas que se usaram na experiência são as parafinas RT21 e RT35 com uma temperatura de fusão de 21°C e 35°C , respetivamente. As propriedades de ambas estão indicadas na Tabela 8 (Rubitherm, 2012). Em relação aos sais hidratados SP, estes possuem uma composição maioritariamente de sais hidratados com combinações orgânicas. Quanto às

características técnicas, os SP apresentam uma condutividade térmica ainda mais elevada comparativamente às parafinas RT, para uma temperatura de fusão idêntica, e possuem temperaturas de fusão que se situam entre os 21°C e 30°C. Os sais hidratados de tipo SP22, SP25 e SP26 foram os sais hidratados que se usaram para as simulações. As suas propriedades estão apresentadas na Tabela 8. Pode-se observar, igualmente, a estrutura interna da parafina, na Figura 47 (a), e a estrutura interna do sal hidratado, na Figura 47 (b) (Bajare *et al.*, 2011). A Rubitherm desenvolveu um tipo de painel designado por CSM (“Compact Storage Model”) de modo a poder incorporar os PCMs de tipo RT e de tipo SP, nos elementos construtivos (Rubitherm, 2012). A Figura 47 (c) mostra um exemplo de uma imagem deste painel. O painel CSM de alumínio, com revestimento eficiente anticorrosivo, apresenta uma dimensão 450x300mm com uma espessura que pode variar segundo o tipo de convecção (forçada e natural) entre os 5mm e os 27mm. Em caso de se usar um sistema passivo, com auxílio de ar fresco durante a noite de modo a solidificar os PCMs, a Rubitherm aconselha usar uma espessura inferior a 15mm. Para além deste valor, incita-se em utilizar um sistema ativo, tal como um ventilador de modo a criar convecção forçada. Por outro lado, a Rubitherm recomenda usar unicamente os sais hidratados SP neste tipo de painel por causa das parafinas RT serem altamente inflamáveis pelo que em caso de incêndio, os painéis CSM começam a fundir desencadeando a combustão da parafina. A Rubitherm recomenda igualmente colocar os painéis CSM na posição horizontal de modo a reduzir as tensões mecânicas que seriam inerentes no caso do painel ser colocado na posição vertical. A Figura 48 mostra um exemplo de uma configuração em que estes tipos de painéis podiam ser colocados no caso da “célula-de-teste” da UA no pavimento sobre o exterior no que diz respeito ao sistema de ganho direto.

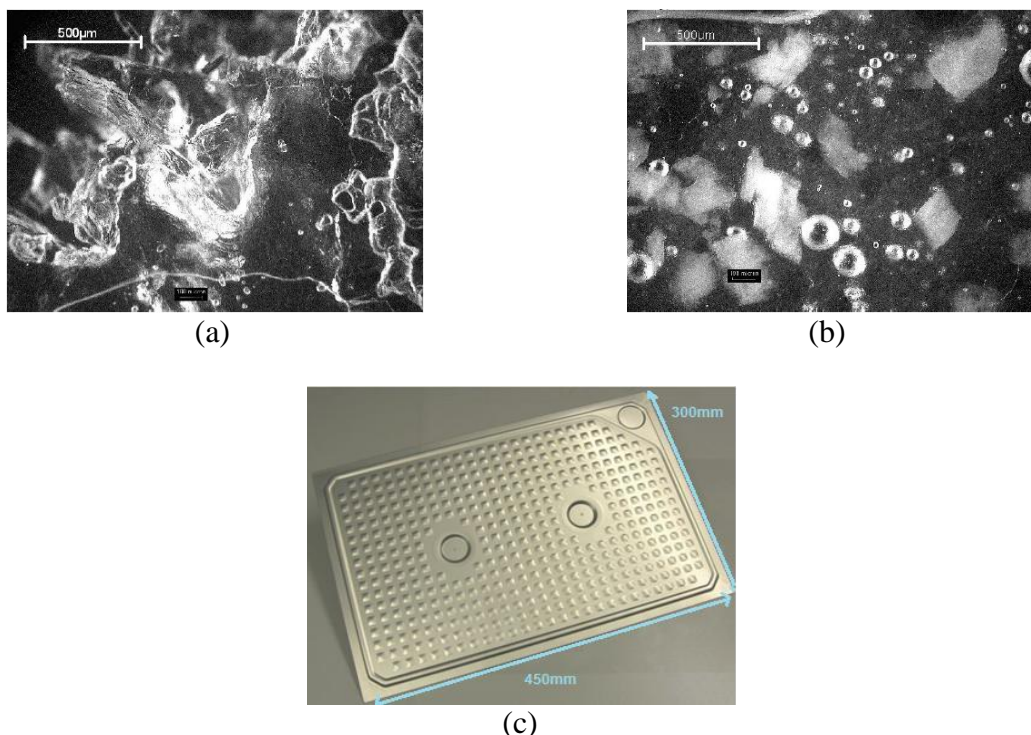


Figura 47: (a) Estrutura da parafina (b) Estrutura do sal hidratado (Fonte: (Bajare *et al.*, 2011)) (c) Imagem do painel CSM (Fonte: (Rubitherm, 2012))

Tabela 8: Propriedades físicas dos PCMs RT e SP (Fonte: (Rubitherm, 2012))

Tipo de PCM	T° de fusão (°C)	Calor latente de fusão (kJ kg ⁻¹)	Calor específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Massa específica (kg m ³)	Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)
RT21	21	134	2100	825	0,2
SP22	23	150	1500	1460	0,6
SP25	25	160	1500	1330	0,6
SP26	27	170	1500	1450	0,6
RT35	35	170	2000	760	0,2

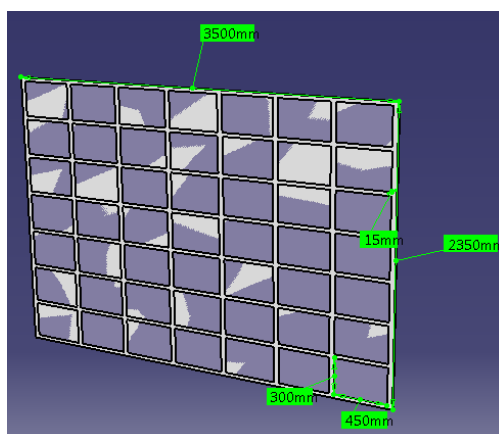


Figura 48: Representação esquemática de painéis CSM numa das partes da “célula-de-teste”, nomeadamente no pavimento sobre o exterior

3.3.1.2 PCM BASF

Outra empresa alemã, muito conhecida mundialmente, a BASF desenvolveu um produto designado por Micronal-PCM cujo material de mudança de fase usado é cera de parafina (BASF, 2012). O modo de encapsulação deste material é realizado por microencapsulação, na qual a cera de parafina é revestida com polímero acrílico, cuja dimensão não ultrapassa os 5µm. A Figura 49 mostra, em detalhe, a cera de parafina encerrada pelo polímero (Tekes, 2010). Estes tipos de PCMs podem ser misturados com outros tipos de materiais, como o gesso ou o cimento, de forma a originar uma parede, como se mostra na Figura 50 (M.L., 2006). Existe um modelo de parede, desenvolvida pela BASF, designado por Micronal SmartBoard Gypsum (DS 5007 existe em dispersão ou em pó, mas é a dispersão que é a mais usada.), em que consiste numa placa, cuja

espessura é de 15mm, e é constituída por cerca de 30% de parafina misturadas com gesso. As propriedades desta placa são expostas na Tabela 9 (BASF, 2012). A comparação, em termos de espessura, deste produto com outros tipos de materiais de construção, com igual capacidade de armazenamento térmico, é reveladora duma diferença muito significativa; 1,5cm para uma parede de gesso com PCMs de tipo Micronal contra 9cm para uma parede de betão e 12cm para uma parede de alvenaria convencional. Neste caso como é um material mais dirigido para ser implementado em fachadas ou paredes, foi usado o Micronal unicamente para o sistema de ganho indireto, mais concretamente na parede Trombe.

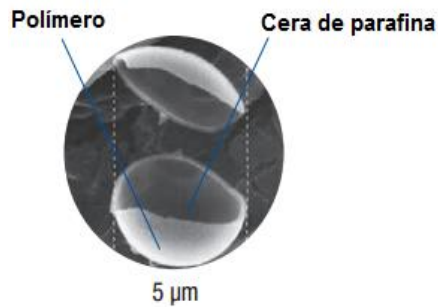


Figura 49: Estrutura interna do PCM Micronal (Fonte: (Tekes, 2010))

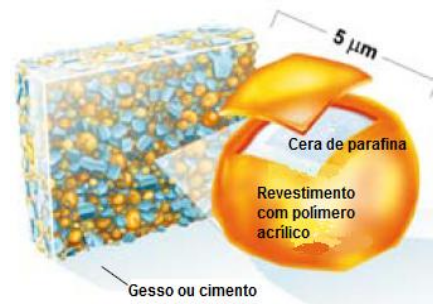


Figura 50: Exemplo de aplicação do PCM Micronal (Fonte: (M.I., 2006))

Tabela 9: Propriedades físicas do PCM Micronal (Fonte: (BASF, 2012))

Tipo de PCM	T° de fusão (°C)	Calor latente de fusão (kJ kg ⁻¹)	Calor específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Massa específica (kg m ³)	Condutividade térmica (W m K ⁻¹)
Micronal	23	330	1200	980	0,18

3.3.1.3 PCM Rgees

A empresa Rgees é uma empresa norte-americana que produz materiais de mudança de fase, com a designação de Savenerg que podem ser de tipo orgânicos e inorgânicos. Esta empresa concebe PCMs que podem servir em várias aplicações como por exemplo, no caso da energia solar térmica, ou então para o controlo de temperatura nos edifícios, tais como materiais eletrónicos, ou para o controlo de temperatura em relação às embalagens, etc. No que diz respeito ao uso de PCMs em edifícios, a Rgees apresenta vários modelos de configurações, em que é efetuado macroencapsulação dos seus PCMs, como tubos, capsulas e painéis (Reinhart, 2012). Ultimamente, uma equipa de investigadores utilizou PCMs inorgânicos de tipo sal hidratado, cujo nome é HS29P que é uma mistura de cloreto de cálcio (CaCl₂) com outros sais, macroencapsulados em painéis, ambos manufaturadas pela Rgees, para uso em edifícios solares passivos mais propriamente para armazenar o calor gerado pelos coletores solares térmicos de ar quente (P.C.M., 2011). Estes painéis preenchidos unicamente de PCMs são produzidos à base de polietileno de alta densidade e reforçados por dentro evitando assim a

modificação da sua forma durante a mudança de fase do PCM. As dimensões deste painel são 450x200x20mm. As propriedades do PCM, HS29P, estão descritas na Tabela 10 e mostra-se igualmente um exemplo de imagem do painel na Figura 51. A Figura 52 mostra um exemplo de uma configuração em que estes tipos de painéis podiam ser colocados, relativamente à “célula-de-teste” da UA, no pavimento sobre o exterior no que diz respeito ao sistema de ganho direto.

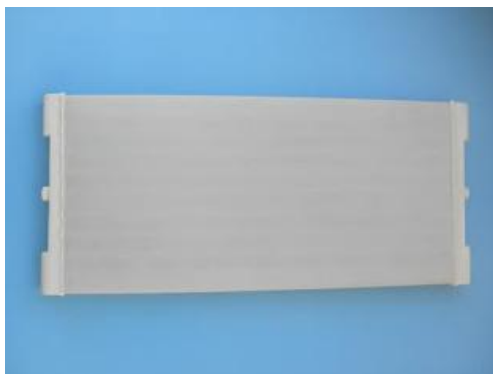


Figura 51: Imagem de um painel especialmente concebido para os PCMs HS29P (Fonte: (Reinhart, 2012))

Tabela 10: Propriedades físicas do PCM HS29P (Fonte: (Rgees, 2010))

Tipo de PCM	T° de fusão (°C)	Calor latente de fusão (kJ kg ⁻¹)	Calor específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Massa específica (kg m ³)	Condutividade térmica (W m K ⁻¹)
HS29P	29	190	2260	1700	0,8

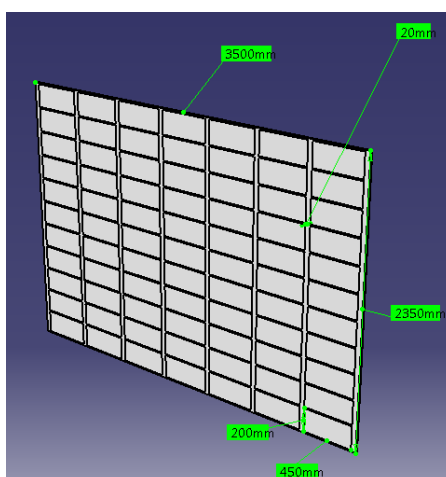


Figura 52: Representação esquemática de painéis contendo PCMs HS29P numa das partes da “célula-de-teste”, nomeadamente no pavimento sobre o exterior

3.3.1.4 PCM Climator

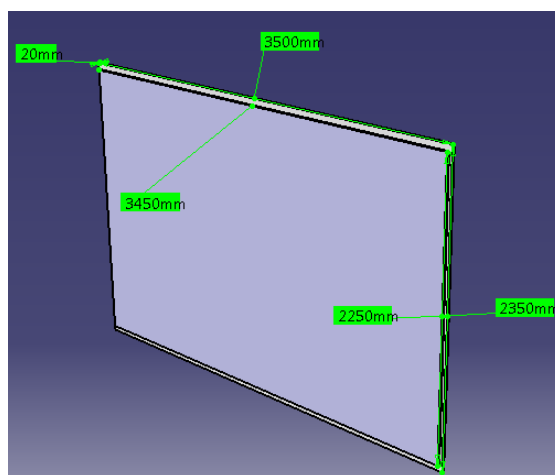
A Climator é uma companhia sueca fundada em 1979, ano em que começou a desenvolver, produzir e vender seus próprios PCMs designados por ClimSel. Esta empresa trabalha exclusivamente com sais hidratados por possuírem alta capacidade térmica, sem repercussões para o meio ambiente e por serem mais económicos. Os principais constituintes destes PCMs são sulfato de sódio, água e aditivos. O sulfato de sódio é um sal de fórmula química Na_2SO_4 , sendo o sal de sódio do ácido sulfúrico. Pode-se observar um exemplo de uma imagem de sulfato de sódio através da Figura 53 (Lenzing, 2012). A Climator, que desenvolve seus produtos essencialmente para o transporte de logística, edifícios e equipamentos vestuários, apresenta uma gama de PCMs em que as temperaturas de fusão são compreendidas entre -21°C e 70°C . O PCM escolhido para as simulações é designado por ClimSel C32, com uma temperatura de fusão de 32°C , que constitui a temperatura de fusão mais alta para este estudo. As suas principais propriedades estão listadas na Tabela 11 (Climator, 2012). O modo de encapsulação, para os edifícios, empregado pela empresa Climator, é efetuado essencialmente por macroencapsulação. No entanto existe pouca informação disponível acerca do tipo de contentor utilizado (Cabeza *et al.*, 2011). Pasupathy *et al.* efetuaram um estudo sobre o efeito de dupla camada com diferentes PCMs no topo de uma “célula-de-teste” em que utilizaram, entre outros, o ClimSel C32. Implementaram nos topos, painéis de aço inoxidável preenchidos com 48% deste PCM e 52% de água (Pasupathy *et al.*, 2008). As dimensões dos painéis, nesse estudo, são de $2000 \times 2000 \times 250\text{mm}$. Relativamente ao presente estudo, foi estabelecida uma espessura do painel de 200mm de forma a constituir uma média de espessura entre o painel utilizado para o estudo das “células-de-teste”, desenvolvidos por Pasupathy *et al.* e os painéis desenvolvidos pelas empresas Rgees e Rubitherm. A Figura 54 mostra um exemplo de uma configuração em que este tipo de painel podia ser colocado, em relação à “célula-de-teste” da UA, no pavimento sobre o exterior no que diz respeito ao sistema de ganho direto.



Figura 53: Imagem do sulfato de sódio (Fonte: (Lenzing, 2012))

Tabela 11: Propriedades físicas do ClimSel C32 (Fonte: (Climator, 2012))

Tipo de PCM	T° de fusão (°C)	Calor latente de fusão (kJ kg ⁻¹)	Calor específico (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Massa específica (kg m ³)	Condutividade térmica (W m K ⁻¹)
ClimSel C32	32	188	3600	1485	0,6

**Figura 54: Representação esquemática do painel contendo PCMs ClimSel C32 numa das partes da “célula-de-teste”, nomeadamente no pavimento sobre o exterior**

4 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

4.1 “GOOGLE SKETCHUP” E “MATLAB”

A empresa norte-americana “Google” disponibiliza um software de modelização em 3 dimensões designado por “Google SketchUp”. O “Google SketchUp” é um software especialmente dirigido para a arquitetura e que permite conceber qualquer tipo de edifício. As ferramentas presentes na interface estão imediatamente ao alcance do utilizador e são muito fáceis de se usar. Existe uma forma de interação entre o “Google SketchUp” e o programa de simulação “EnergyPlus”, isto é, a modelização de um edifício no “Google SketchUp” permite introduzir as coordenadas de forma automática para o “EnergyPlus”. Este programa permite igualmente simular em tempo real a posição do sol e as sombras circundantes à volta do edifício. As Figuras 55 e 56 mostram a modelização efetuada no caso para a “célula-de-teste” em estudo e pela Figura 56 observa-se as zonas de sombreamento devido à luz solar e que constitui uma das opções do “Google SketchUp”.

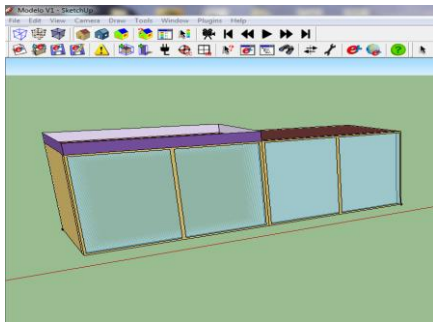


Figura 55: Modelização da “célula-de-teste” no “Google SketchUp”

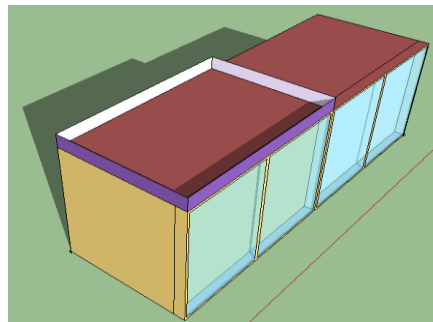


Figura 56: “Célula-de-teste” com os efeitos de sombreamento

De modo a visualizar o sombreamento no interior e no exterior do edifício para um dado local, o “Google SketchUp” disponibiliza outra opção em que é possível entrar coordenadas geográficas do local e em seguida inserir automaticamente, através do “Google Earth”, para o sítio onde se quer implementar o edifício. A Figura 57 mostra um exemplo de uma imagem da “célula-de-teste” implantada virtualmente em Portimão através do “Google Earth”. É interessante efetuar um estudo mais pormenorizado para o caso do ganho direto, na época de inverno, em que se pode observar, através do “Google SketchUp”, em que altura do dia do ano, a luz solar incide no solo assim como na parede virada a norte. Como foi referido no subcapítulo 2.2.3 em “Geometria solar”, existem ferramentas que permitem avaliar o percurso do sol não só para o exterior do edifício mas também para o interior. Por exemplo, o “Google Sketchup” disponibiliza imagens virtuais em que se pode observar exatamente em que altura do dia do ano, os raios solares embatem no interior do edifício. Neste caso, é interessante notar que os raios do sol não atingem por completo a parede situada a norte e que, por isso, a implementação de PCMs não deveria preencher totalmente esta parte do edifício. Além de se poder visualizar o nível de sombreamento no interior dum edifício, através do “Google SketchUp”, foi possível desenvolver um pequeno programa para duas dimensões, através do “Matlab”, em que é possível prever igualmente, com mais ou menos precisão, a altura máxima em que os raios solares atingem a parede a norte. Por

isso, foi necessário implementar algumas equações características para avaliar o ângulo solar para um dado local, mostradas e descritas na secção 4.1.1. Efetuou-se igualmente um estudo, através do “Matlab”, sobre a avaliação do comprimento e da altura em que se deve instalar a pala de modo a criar mais sombreamento na época da estação de arrefecimento, apresentado na secção 4.1.1.



Figura 57: “Célula-de-teste” na zona climática de Portimão

4.1.1 Avaliação da altura máxima nas fachadas interiores e da altura e comprimento da pala

Para estimar a altura máxima quando os raios solares embatem nas paredes do interior de um edifício, para qualquer altura do dia, é necessário determinar, em primeiro lugar, o ângulo da altitude solar (α_s), em (graus), e a seguir o ângulo de perfil (α_p), em (graus). A Figura 58 mostra um esquema em que se pode observar alguns ângulos através da linha incidente sobre um plano (Duffie *et al.*, 2006). O ângulo da altitude solar (α_s) corresponde ao ângulo entre a horizontal e a linha dos raios do sol quando atinge um plano. O ângulo entre a vertical e a linha dos raios solares corresponde ao ângulo zenital (θ_z), em (graus).

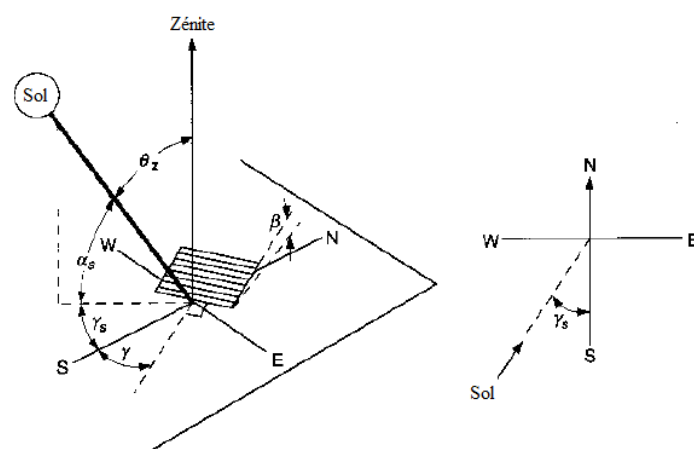


Figura 58: Esquema dos vários ângulos incidentes num plano (Fonte: (Duffie *et al.*, 2006))

A equação para o ângulo da altitude solar (α_s) pode ser escrita pela seguinte forma,

$$\alpha_s = 90 - \theta_z \quad (\text{Eq. 4.1})$$

A equação para determinar o ângulo zenital (θ_z) é dada por,

$$\theta_z = \cos^{-1} (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde o ângulo ϕ , em (graus), corresponde a latitude do local a norte, ou a sul, do equador, sendo o norte positivo; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$. O ângulo δ , em (graus), corresponde a inclinação, isto é, a posição angular do sol ao meio-dia relativamente ao plano do equador, com o norte positivo; $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$. Este ângulo pode ser determinado pela seguinte equação,

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (\text{Eq. 4.3})$$

O parâmetro n corresponde ao dia do ano, sendo $n=1$ quando o dia for o dia 1 de janeiro e $n=365$ quando o dia for o dia 31 de dezembro. A Tabela 12 mostra a média diária recomendada para os meses e os valores de n por mês. O ângulo ω , em (graus), corresponde ao ângulo horário, que é o ângulo de deslocação à leste ou ao oeste do sol em relação ao meridiano, devido a rotação da Terra no seu eixo equivalente a 15° por hora; de manhã é negativo, à tarde é positivo. A caracterização deste ângulo é efetuada através da seguinte forma,

$$\omega = 4 (L_{tp} - L_{loc}) + E \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Tabela 12: Média diária recomendada para os meses e valores de n por mês (Fonte: (Duffie *et al.*, 2006))

Mês	n para i dias do mês
Janeiro	i
Fevereiro	$31+i$
Março	$59+i$
Abril	$90+i$
Maio	$120+i$
Junho	$151+i$
Julho	$181+i$
Agosto	$212+i$
Setembro	$243+i$
Outubro	$273+i$
Novembro	$304+i$
Dezembro	$334+i$

O ângulo L_{tp} , em (graus), corresponde ao meridiano padrão para o fuso horário local; no caso de Portugal continental $L_{st}=0^\circ$, o ângulo L_{loc} , em (graus), corresponde a longitude do local; $0^\circ \leq L_{loc} \leq 360^\circ$. O parâmetro E , que corresponde à equação do tempo, em (minutos), pode ser determinado pela seguinte equação,

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868 \cdot \cos B - 0,032077 \cdot \sin B - 0,014615 \cdot \cos 2B - 0,04089 \cdot \sin 2B) \quad (\text{Eq. 4.5})$$

O parâmetro B pode ser encontrado pela seguinte equação,

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

O parâmetro n corresponde ao dia do ano (ver Tabela 12). O ângulo de perfil (α_p), em (graus), corresponde à projeção do ângulo da altitude solar α_s perpendicular ao plano em questão. A Figura 59 mostra um exemplo esquemático em que se pode observar o ângulo de perfil (α_p) (Duffie et al., 2006).

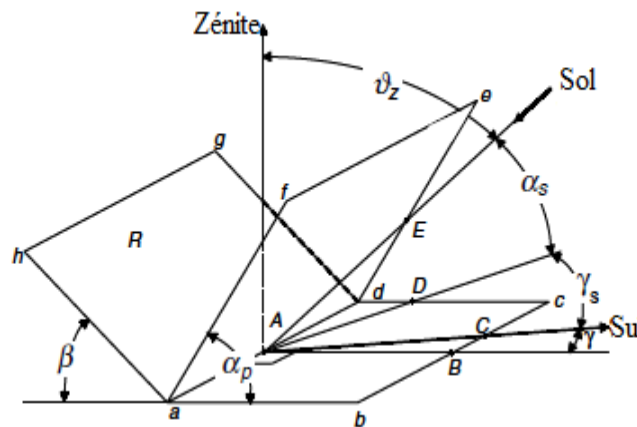


Figura 59: Ilustração de vários ângulos, nomeadamente de α_p (Fonte: (Duffie et al., 2006))

A equação para o ângulo de perfil (α_p) é descrita pela seguinte forma,

$$\alpha_p = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \alpha_s}{\cos(\gamma_s - \gamma)} \right) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

O ângulo γ , em (graus), corresponde ao ângulo de superfície azimutal que é o desvio da projeção num plano horizontal da normal para a superfície do meridiano local, sendo a direção leste negativa e oeste positiva; $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$. Para o caso do presente estudo, a “célula-de-teste” está virada a sul pelo que $\gamma=0^\circ$. O ângulo γ_s , em (graus), corresponde ao ângulo solar azimutal que é o deslocamento angular a partir do sul da projeção da radiação direta no plano horizontal, mostrado na Figura 59. Deslocamentos

a leste do sul são negativos e ao oeste do sul, positivos. O ângulo γ_s pode ser descrito pela seguinte equação, em que $\text{sign}(\omega)$ indica o sinal positivo ou negativo que toma o ângulo horário (ω), em (graus), através da Eq. 4.4,

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \cdot \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cdot \cos \phi} \right) \right| \quad (\text{Eq. 4.8})$$

A altura máxima é dada por Y_2 , em (m), pelo que a altura da janela é definida por Y_1 , em (m). O parâmetro X , em (m), corresponde a profundidade da “célula-de-teste”. A Figura 60 mostra um esquema com os parâmetros. A equação para determinar a altura máxima Y_2 é definida pela seguinte forma,

$$Y_2 = Y_1 - (\tan \alpha_p \cdot X) \quad (\text{Eq. 4.9})$$

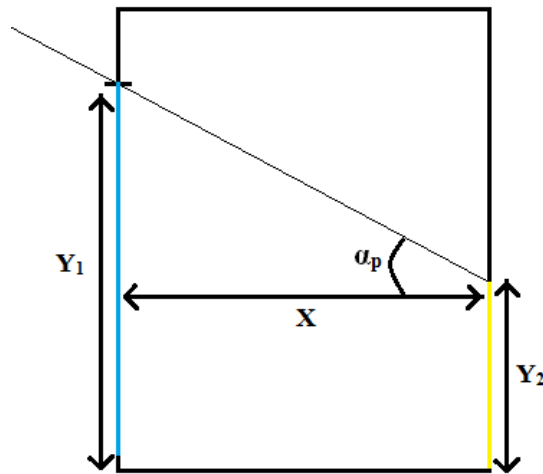


Figura 60: Esquema com parâmetro da altura máxima

Efetou-se, igualmente, um estudo sobre a implementação de uma pala que permite criar sombreamento em relação ao caso da estação de arrefecimento. Este estudo tem como finalidade em determinar a melhor altura e comprimento da pala de modo a evitar que os raios solares atinjam o interior do edifício para uma determinada época da estação de arrefecimento. Através da Eq. 4.9 e da Figura 60 pode-se associar as seguintes relações,

$$\begin{cases} Y_2 = \text{Alt. máx.} \\ X = \text{Prof.} \end{cases}$$

A Figura 61 mostra um esquema com os parâmetros, Alt.máx e prof. A altura da pala é dada por Y , em (m), onde,

$$Y = Alt. máx. + Y_3 \leftrightarrow \quad (Eq. 4.10)$$

$$Y_3 = Y - Alt. máx. \leftrightarrow \quad (Eq. 4.11)$$

O comprimento da pala é dada por X_1 , em (m), onde,

$$X_1 = X_2 - prof. \leftrightarrow \quad (Eq. 4.12)$$

$$X_2 = X_1 + prof. \leftrightarrow \quad (Eq. 4.13)$$

Consequentemente aplique-se a tangente do ângulo α_p , definida por,

$$\alpha_p = \tan^{-1} \left(\frac{Y_3}{X_2} \right) \quad (Eq. 4.14)$$

Com as relações (4. 11) e (4. 13), fica,

$$\alpha_p = \tan^{-1} \left(\frac{Y - Alt. máx.}{Prof. + X_1} \right) \quad (Eq. 4.15)$$

As equações para determinar o comprimento X_1 e a altura Y da pala, que são assinalados na Figura 61, são dadas por,

$$X_1 = \left(\frac{Y - Alt. máx.}{\tan(\alpha_p)} \right) - prof \leftrightarrow. \quad (Eq. 4.16)$$

$$Y = \tan \alpha_p (prof. + X_1) + Alt. máx. \leftrightarrow \quad (Eq. 4.17)$$

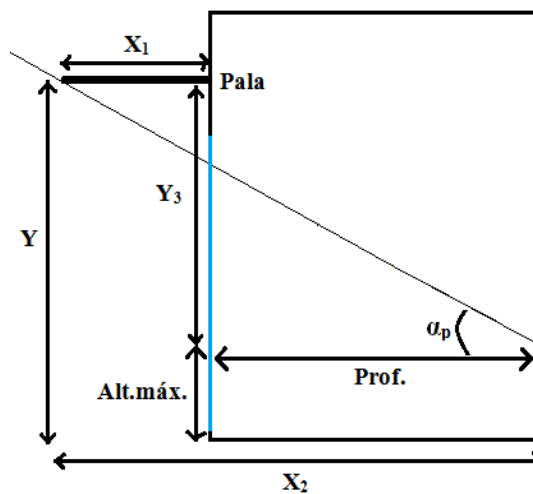


Figura 61: Esquema com parâmetros do comprimento e altura da pala

4.2 MODELOS DE AVALIAÇÃO PELO MÉTODO DE KOSAR

Centrou-se o estudo num modelo de experiência antigo que efetuou medições do desempenho energético, em edifícios de construção solar passiva, para todos os sistemas passivos. Este modelo, desenvolvido por D.R. Kosar, tem como pressuposto desenvolver metodologias mais alargadas na determinação do desempenho térmico (Kosar, 1981). Para este efeito, D.R. Kosar gerou vários planos de testes tais como um plano de testes de simulação e um plano de testes fatorial. O plano de testes de simulação contém algumas regras de ouro que incluem valores paramétricos necessários na investigação dos sistemas solares passivos. Cita-se apenas aqueles com carácter de maior interesse para o presente estudo. As características para modelos de referência de sistemas de aquecimento passivo são,

- Armazenamento térmico por metro quadrado de vidro: 920 kJ K^{-1}
- Distribuição mássica:

Sistema de ganho direto, onde a massa de armazenamento térmico é constituída por betão armado com uma espessura de 0,15m em que a área dos elementos de fachada (E,N,W) tem que ser 3 vezes a área do pavimento sobre o exterior com o betão.

Sistema de ganho indireto, onde a massa de armazenamento térmico é constituída por betão armado com uma espessura de 0,45m, de área igual ao vão envidraçado virado a sul.

- Propriedades da massa de armazenamento térmico:
 - Condutividade térmica= $1,73 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 - Capacidade calorífica= $2010 \text{ kJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
- Outra massa de edifício; negligenciado
- Nenhuma geração interna de calor
- Orientação do vidro; virado a sul
- Razão de carga do edifício para área coletora, $U.A/A_c$:
 - Entre $1,25$ e $35 \text{ W m}^2 \text{ K}^{-1}$
- Condutividade térmica do coletor, U_c :
 - Entre $1,56$ e $6,25 \text{ W m}^2 \text{ K}^{-1}$
- Transmissividade do coletor, τ_m :
 - Entre $0,56$ e $0,86$

- Absortância solar da massa de armazenamento térmico, α_s :

Entre 0,8 e 1,0

Com o intuito de efetuar testes de simulações, através do programa “PASSIM”, D.R. Kosar elaborou um plano de teste fatorial (FTP). Este plano de teste usa uma matriz quadrada em que os parâmetros são inseridos atribuindo para cada, valores diferentes para várias combinações. Mostra-se um exemplo desta tabela na Figura 62. Existe outro método muito semelhante ao descrito pelo D.R. Kosar, designado por método de Taguchi que possibilita efetuar determinadas simulações de uma forma rápida obtendo bons resultados. A abordagem deste método é apresentada a seguir.

FTP Block	X UA=50W/K A _c =34m ²	X UA=100W/K A _c =8m ²	X UA=300W/K A _c =50m ²	X UA=500W/K A _c =20m ²
Y U _c =6.25W/m ² -K τ _n =0.86 U _s =18.0W/m ² -K	Z #1 κ=1.0 T _{set} =15 C	Z #5 κ=0.6 T _{set} =21 C	Z #9 κ=0.3 T _{set} =19 C	Z #13 κ=0.1 T _{set} =17 C
Y U _c =3.12W/m ² -K τ _n =0.75 U _s =6.0W/m ² -K	Z #2 κ=0.6 T _{set} =17 C	Z #6 κ=0.3 T _{set} =15 C	Z #10 κ=0.1 T _{set} =21 C	Z #14 κ=1.0 T _{set} =19 C
Y U _c =2.10W/m ² -K τ _n =0.65 U _s =24.0W/m ² -K	Z #3 κ=0.3 T _{set} =19 C	Z #7 κ=0.1 T _{set} =17 C	Z #11 κ=1.0 T _{set} =15 C	Z #15 κ=0.6 T _{set} =21 C
Y U _c =1.56W/m ² -K τ _n =0.57 U _s =12.0W/m ² -K	Z #4 κ=0.1 T _{set} =21 C	Z #8 κ=1.0 T _{set} =19 C	Z #12 κ=0.6 T _{set} =17 C	Z #16 κ=0.3 T _{set} =15 C

Figura 62: Matriz de simulação usada por Kosar (Fonte: (Kosar, 1981))

4.3 MÉTODO DE TAGUCHI

O método de Taguchi, desenvolvido pelo engenheiro japonês Genichi Taguchi³, é uma ferramenta cujos objetivos principais são: minimizar a variabilidade dum projeto, reduzir o tempo de teste e efetuar a seleção dos parâmetros mais relevantes. Em termos de qualidade, este método pertence a categoria de métodos classificados de “fora-de-linha” por ser de utilização exterior a linha de produção. O método de Taguchi define etapas necessárias, durante todo o processo da avaliação do projeto, que estão caracterizadas na Tabela 13 (Chauveau *et al.*, 2012)

³ Genichi Taguchi (1924-2012) – Estudou engenharia na área têxtil. Em 1950, inicia sua carreira de estatístico no Laboratório de Comunicações em Tóquio, tendo desenvolvido um método de forma a reduzir custos e aumentar a qualidade para qualquer tipo de produto. Recebeu muitos prémios entre os quais a sua contribuição para o desenvolvimento da indústria japonesa.

Tabela 13: Definição das etapas

	Assunto
Etapas	
1	Formalizar o problema
2	Selecionar os parâmetros
3	Construir o plano
4	Realizar ensaios
5	Analisar os resultados
6	Concluir

As quatro primeiras etapas são descritas nesta secção pelo que as restantes etapas foram abordadas na secção 5 em “Resultados e discussão”.

4.3.1 Primeira etapa: Formalizar o problema

A primeira etapa define o problema e os objetivos a fixar.

- **Problema:**

Estudar e comparar o desempenho e conforto térmico de uma construção passiva, de sistema de ganho direto e indireto com adição de PCMs, em relação à uma construção passiva de referência, para as mesmas soluções construtivas e para a mesma orientação, em nove zonas climáticas em Portugal continental.

- **Objetivos:**

Melhorar o desempenho energético mantendo o conforto térmico para uma gama de temperatura razoável numa construção passiva, de sistema direto e indireto, com PCMs.

Tabela 14: Perguntas e respostas rápidas na determinação dos objetivos

Pergunta	Respostas imediatas
Quem mede?	O estudante.
O quê que mede?	O desempenho térmico para o caso do sistema de ganho direto e indireto com PCMs e para o caso do sistema de ganho direto e indireto sem PCMs.
Onde mede?	Na universidade ou em casa.
Quando mede?	No momento em que tiver disponível as propriedades dos PCMs e dos elementos construtivos da “célula-de-teste” para poder introduzir num programa de simulação.
Como mede?	Através de um programa de simulação, “EnergyPlus”.

4.3.2 Segunda etapa: Selecionar os parâmetros

A segunda etapa visa mostrar, de modo mais resumido e sob forma de tabelas, os tipos e o número de parâmetros que serão usados nas simulações. Definiram-se três tabelas; uma tabela para o sistema de ganho direto com PCMs (Tabela 15), outra tabela para o sistema de ganho indireto com PCMs (Tabela 16) e outra tabela que engloba o sistema de ganho direto e indireto sem PCMs (Tabela 17). Os valores estabelecidos, que se encontram nestas tabelas, são agrupados do mais baixo ao mais alto valor, à medida que se progride do nível 1 até ao nível 9. Os valores inseridos compreendem; três valores do coeficiente de perda do edifício ($U.A$), em ($W K^{-1}$), com a respetiva área do coletor solar (A_c), em (m^2), onde se efetua uma breve descrição da determinação deste valores, mais à frente. Os três valores do vão envidraçado, que se encontram nas tabelas, englobam; a transmissão térmica (U_c), em ($W m^{-2} K^{-1}$), e a transmissividade (τ_n), adimensional. Esses três valores representam a média global para o caso de um vão envidraçado com vidro duplo (Saint-Gobain, 2012). Os três valores do coeficiente de absorção solar (α_s), adimensional, indicados nas tabelas, representam o nível de ton escuro, para a parede Trombe e para o pavimento sobre o exterior para o caso do sistema de ganho direto, sendo que o valor mais alto exibe um tom de cor mais escuro em que, neste exemplo, se poderia comparar a cor preta. Os três valores da temperatura de ajuste (T° de ajuste), em ($^\circ C$), referem-se à temperatura que deverá ser sentida permanentemente dentro do edifício. A RCCTE definiu alguns limites de temperatura para o inverno e o verão, sendo que a temperatura mais aconselhável para os meses da estação de aquecimento correspondente à $20^\circ C$ (Reg. Car. Comp. Tér. Edif., 2006). Em relação ao “Tipo de PCM”, definiu-se agrupar os seis valores da temperatura de fusão, da menor a maior temperatura de fusão, tal como se pode observar nas Tabelas 15 e 16. As Zonas Climáticas são igualmente ordenadas nas tabelas, conforme à Tabela 3, na secção 3.1.3 em “Seleção de concelhos”.

Tabela 15: Tabela com os níveis e parâmetros definidos para o sistema de ganho direto com PCMs

Parâmetros							
Nível	U.A (WK^{-1}) (com valores de A_c (m^2))	U_c ($W m^{-2} K^{-1}$)	τ_n	α_s	T° de ajuste (°C)	Tipo de PCM	Zonas Climáticas
1	161 (16)	1	0,3	0,8	20	RT21	Portimão
2	282 (32)	2	0,5	0,9	22,5	SP22	Lisboa
3	1030 (56)	3	0,7	1,0	25	SP25	Beja
4	-	-	-	-	-	SP26	Porto
5	-	-	-	-	-	HS29P	Braga
6	-	-	-	-	-	ClimSel C32	Castelo Branco
7	-	-	-	-	-	-	Guarda
8	-	-	-	-	-	-	Vila Real
9	-	-	-	-	-	-	Mirandela

Tabela 16: Tabela com os níveis e parâmetros definidos para o sistema de ganho indireto com PCMs

Parâmetros							
Nível	U.A (WK⁻¹) (com valores de A_c (m²))	U_c (Wm⁻²K⁻¹)	τ_n	α_s	T° de ajuste (°C)	Tipo de PCM	Zonas climáticas
1	161 (16)	1	0,3	0,8	20	Micronal	Portimão
2	282 (32)	2	0,5	0,9	22,5	SP25	Lisboa
3	1030 (56)	3	0,7	1,0	25	SP26	Beja
4	-	-	-	-	-	HS29P	Porto
5	-	-	-	-	-	ClimSel C32	Braga
6	-	-	-	-	-	RT35	Castelo Branco
7	-	-	-	-	-	-	Guarda
8	-	-	-	-	-	-	Vila Real
9	-	-	-	-	-	-	Mirandela

Tabela 17: Tabela com os níveis e parâmetros definidos para o caso de ganho direto e indireto sem PCMs

Nível	Parâmetros					Zonas climáticas
	U.A (WK ⁻¹) (com valores de A _c (m ²))	U _c (Wm ⁻² K ⁻¹)	τ _n	α _s	T° de ajuste (°C)	
1	161 (16)	1	0,3	0,8	20	Portimão
2	282 (32)	2	0,5	0,9	22,5	Lisboa
3	1030 (56)	3	0,7	1,0	25	Beja
4	-	-	-	-	-	Porto
5	-	-	-	-	-	Braga
6	-	-	-	-	-	Castelo Branco
7	-	-	-	-	-	Guarda
8	-	-	-	-	-	Vila Real
9	-	-	-	-	-	Mirandela

4.3.2.1 Estimação de $U.A$ e A_c

Os valores do coeficiente de perda ($U.A$) e da área do coletor (A_c) foram determinados com base no cálculo da razão da área do vão envidraçado, virado a sul (no caso do hemisfério norte), com a área do pavimento sobre o exterior. Como foi descrito na secção 2.2.2 em “Regras de ouro”, alguns especialistas sugerem que a razão da área do vão envidraçado, virado a sul, com a área do pavimento sobre o exterior deveria ser +/- 7% de forma a evitar sobreaquecimento para o caso do sistema de ganho direto (Epsea.org, 2011). Se esta razão for bastante ultrapassada, tem que se considerar o princípio de $0,0929\text{m}^2$ de área de envidraçado por $0,51\text{m}^2$ de área de pavimento sobre o exterior. Em relação a “célula-de-teste”, do presente trabalho, encontrou-se uma razão muito elevada com cerca de 97%. Seguindo o mesmo princípio, calculou-se uma outra área do pavimento sobre o exterior, para o nível 1 da tabela de Taguchi, pelo que o novo valor da área do pavimento sobre o exterior estimado, é de aproximadamente $87,6\text{m}^2$. Desta forma, a profundidade do pavimento sobre o exterior apresenta um valor de 12,55m. As outras dimensões da “célula-de-teste”, para este nível, são $7 \times 12,55 \times 2,28\text{m}$. De seguida, calculou-se o coeficiente de perda total do edifício apresentando um novo valor de 161 W K^{-1} , mantendo a área de envidraçado de 16m^2 . Em relação ao nível 2, considerou-se duplicar a área do pavimento sobre o exterior da “célula-de-teste”. As outras dimensões da “célula-de-teste”, para este nível, ficam $14 \times 2,35 \times 2,28\text{m}$. Usando, uma vez mais, o mesmo princípio obteve-se uma outra área de envidraçado de $180,6\text{m}^2$ dando uma profundidade do pavimento sobre o exterior de 12,9m pelo que o novo valor do coeficiente de perda total foi estimado em 282 W K^{-1} , com uma área de envidraçado de 32m^2 . Em relação ao nível 3, considerou-se uma outra dimensão da “célula-de-teste” com $14 \times 2,35 \times 4\text{m}$, sendo a profundidade estimada para estas dimensões de 22m, pelo que se obteve um coeficiente de perda total de 1030 W K^{-1} , com uma área de envidraçado de 56m^2 .

4.3.3 Terceira etapa: Construir o plano de testes

Em relação aos casos de ganho direto e indireto com PCMs, definiu-se um plano de testes que contém, no total, 7 parâmetro ($P=7$), em que os parâmetros, “ $U.A$ (A_c), U_c , τ_n , α_s , T° de ajuste” possuem cada um, 3 níveis; o parâmetro, “Tipo de PCM” possui 6 níveis; e o parâmetro “Zonas Climáticas” possui 9 níveis. No total são 54 ensaios. As Tabelas 18 e 19, que mostram esse tipo de plano de testes, são do género $3^5 6^1 9^1$, isto é, 5 parâmetros de 3 níveis; 1 parâmetro de 6 níveis; e 1 parâmetro de 9 níveis.

Tabela 18: sistema para o ganho direto com PCMs

	U.A (A_c)	U_c	τ_n	α_s	T° de ajuste	Tipo de PCM	Zonas climáticas
	A	B	C	D	E	U	V
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	4
3	1	1	1	1	1	1	7
4	1	1	3	2	3	6	5
5	1	1	3	2	3	6	8
6	1	1	3	2	3	6	2
7	1	2	2	3	3	2	1
8	1	2	2	3	3	2	4

9	1	2	2	3	3	2	7
10	1	2	3	1	2	4	9
11	1	2	3	1	2	4	3
12	1	2	3	1	2	4	6
13	1	3	1	3	2	5	5
14	1	3	1	3	2	5	8
15	1	3	1	3	2	5	2
16	1	3	2	2	1	3	9
17	1	3	2	2	1	3	3
18	1	3	2	2	1	3	6
19	2	1	2	1	3	5	6
20	2	1	2	1	3	5	9
21	2	1	2	1	3	5	3
22	2	1	3	3	2	3	7
23	2	1	3	3	2	3	1
24	2	1	3	3	2	3	4
25	2	2	1	3	1	6	6
26	2	2	1	3	1	6	9
27	2	2	1	3	1	6	3
28	2	2	2	2	2	1	2
29	2	2	2	2	2	1	5
30	2	2	2	2	2	1	8
31	2	3	1	2	3	4	7
32	2	3	1	2	3	4	1
33	2	3	1	2	3	4	4
34	2	3	3	1	1	2	2
35	2	3	3	1	1	2	5
36	2	3	3	1	1	2	8
37	3	1	1	2	2	2	3
38	3	1	1	2	2	2	6
39	3	1	1	2	2	2	9
40	3	1	2	3	1	4	8
41	3	1	2	3	1	4	2
42	3	1	2	3	1	4	5
43	3	2	1	1	3	3	8
44	3	2	1	1	3	3	2
45	3	2	1	1	3	3	5
46	3	2	3	2	1	5	4
47	3	2	3	2	1	5	7
48	3	2	3	2	1	5	1
49	3	3	2	1	2	6	4
50	3	3	2	1	2	6	7
51	3	3	2	1	2	6	1
52	3	3	3	3	3	1	3
53	3	3	3	3	3	1	6
54	3	3	3	3	3	1	9

Tabela 19: Sistema para o ganho indireto com PCMs

	U.A (A _c)				T° de ajuste	Tipo de PCM	Zonas climáticas
	A	B	C	D			
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	4
3	1	1	1	1	1	1	7
4	1	1	3	2	3	6	5
5	1	1	3	2	3	6	8
6	1	1	3	2	3	6	2
7	1	2	2	3	3	2	1
8	1	2	2	3	3	2	4
9	1	2	2	3	3	2	7
10	1	2	3	1	2	4	9
11	1	2	3	1	2	4	3
12	1	2	3	1	2	4	6
13	1	3	1	3	2	5	5
14	1	3	1	3	2	5	8
15	1	3	1	3	2	5	2
16	1	3	2	2	1	3	9
17	1	3	2	2	1	3	3
18	1	3	2	2	1	3	6
19	2	1	2	1	3	5	6
20	2	1	2	1	3	5	9
21	2	1	2	1	3	5	3
22	2	1	3	3	2	3	7
23	2	1	3	3	2	3	1
24	2	1	3	3	2	3	4
25	2	2	1	3	1	6	6
26	2	2	1	3	1	6	9
27	2	2	1	3	1	6	3
28	2	2	2	2	2	1	2
29	2	2	2	2	2	1	5
30	2	2	2	2	2	1	8
31	2	3	1	2	3	4	7
32	2	3	1	2	3	4	1
33	2	3	1	2	3	4	4
34	2	3	3	1	1	2	2
35	2	3	3	1	1	2	5
36	2	3	3	1	1	2	8
37	3	1	1	2	2	2	3
38	3	1	1	2	2	2	6
39	3	1	1	2	2	2	9
40	3	1	2	3	1	4	8
41	3	1	2	3	1	4	2
42	3	1	2	3	1	4	5
43	3	2	1	1	3	3	8
44	3	2	1	1	3	3	2
45	3	2	1	1	3	3	5
46	3	2	3	2	1	5	4

47	3	2	3	2	1	5	7
48	3	2	3	2	1	5	1
49	3	3	2	1	2	6	4
50	3	3	2	1	2	6	7
51	3	3	2	1	2	6	1
52	3	3	3	3	3	1	3
53	3	3	3	3	3	1	6
54	3	3	3	3	3	1	9

Em relação aos casos de ganho direto e indireto sem PCMs, definiu-se um plano de testes que contém, no total, 6 parâmetros ($P=6$), em que se removeu o parâmetro “Tipo de PCM”. Os parâmetros e os níveis são idênticos aos definidos anteriormente, isto é os parâmetros “ $U.A (Ac)$, U_c , τ_n , α_s , T° de ajuste” possuem cada um, 3 níveis; e o parâmetro “Zonas Climáticas” possui 9 níveis. No total são 27 ensaios. A Tabela 20, que mostra esse tipo de plano, é do género $3^5 9^1$, isto é, 5 parâmetros de 3 níveis; e 1 parâmetro de 9 níveis.

Tabela 20: Sistema para o ganho direto e indireto sem PCMs

	U.A (A_c)	U_c	τ_n	α_s	T° de ajuste	Zonas Climáticas
	A	B	C	D	E	J
1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2
3	1	1	1	3	3	3
4	1	2	3	1	2	4
5	1	2	3	2	3	5
6	1	2	3	3	1	6
7	1	3	2	1	3	7
8	1	3	2	2	1	8
9	1	3	2	3	2	9
10	2	1	3	1	3	9
11	2	1	3	2	1	7
12	2	1	3	3	2	8
13	2	2	2	1	1	3
14	2	2	2	2	2	1
15	2	2	2	3	3	2
16	2	3	1	1	2	6
17	2	3	1	2	3	4
18	2	3	1	3	1	5
19	3	1	2	1	2	5
20	3	1	2	2	3	6
21	3	1	2	3	1	4
22	3	2	1	1	3	8
23	3	2	1	2	1	9
24	3	2	1	3	2	7
25	3	3	3	1	1	2
26	3	3	3	2	2	3
27	3	3	3	3	3	1

4.3.4 Quarta etapa: Realização de ensaios

Neste caso é só substituir os algarismos pelos parâmetros definidos anteriormente dependendo do caso; A Tabela 21 mostra o plano de testes definido para o sistema de ganho direto com PCMs, a Tabela 22 mostra o plano de testes definido para o sistema de ganho indireto com PCMs, e a Tabela 23 mostra o plano de testes definido para os sistemas de ganho direto e indireto, sem PCMs.

Tabela 21: Sistema para o ganho direto com PCMs

	U.A (A _c)	U _c	τ_n	α_s	T° de ajuste	Tipo de PCM	Zonas climáticas
	A	B	C	D	E	U	V
1	161(16)	1,0	0,3	0,8	20	RT21	Portimão
2	161(16)	1,0	0,3	0,8	20	RT21	Porto
3	161(16)	1,0	0,3	0,8	20	RT21	Guarda
4	161(16)	1,0	0,7	0,9	25	ClimSel C32	Braga
5	161(16)	1,0	0,7	0,9	25	ClimSel C32	Vila Real
6	161(16)	1,0	0,7	0,9	25	ClimSel C32	Lisboa
7	161(16)	2,0	0,5	1,0	25	SP22	Portimão
8	161(16)	2,0	0,5	1,0	25	SP22	Porto
9	161(16)	2,0	0,5	1,0	25	SP22	Guarda
10	161(16)	2,0	0,7	0,8	22,5	SP26	Mirandela
11	161(16)	2,0	0,7	0,8	22,5	SP26	Beja
12	161(16)	2,0	0,7	0,8	22,5	SP26	C. Branco
13	161(16)	3,0	0,3	1,0	22,5	HS29P	Braga
14	161(16)	3,0	0,3	1,0	22,5	HS29P	Vila Real
15	161(16)	3,0	0,3	1,0	22,5	HS29P	Lisboa
16	161(16)	3,0	0,5	0,9	20	SP25	Mirandela
17	161(16)	3,0	0,5	0,9	20	SP25	Beja
18	161(16)	3,0	0,5	0,9	20	SP25	C. Branco
19	282(32)	1,0	0,5	0,8	25	HS29P	C. Branco
20	282(32)	1,0	0,5	0,8	25	HS29P	Mirandela
21	282(32)	1,0	0,5	0,8	25	HS29P	Beja
22	282(32)	1,0	0,7	1,0	22,5	SP25	Guarda
23	282(32)	1,0	0,7	1,0	22,5	SP25	Portimão
24	282(32)	1,0	0,7	1,0	22,5	SP25	Porto
25	282(32)	2,0	0,3	1,0	20	ClimSel C32	C. Branco
26	282(32)	2,0	0,3	1,0	20	ClimSel C32	Mirandela
27	282(32)	2,0	0,3	1,0	20	ClimSel C32	Beja
28	282(32)	2,0	0,5	0,9	22,5	RT21	Lisboa
29	282(32)	2,0	0,5	0,9	22,5	RT21	Braga
30	282(32)	2,0	0,5	0,9	22,5	RT21	Vila Real
31	282(32)	3,0	0,3	0,9	25	SP26	Guarda
32	282(32)	3,0	0,3	0,9	25	SP26	Portimão
33	282(32)	3,0	0,3	0,9	25	SP26	Porto
34	282(32)	3,0	0,7	0,8	20	SP22	Lisboa
35	282(32)	3,0	0,7	0,8	20	SP22	Braga
36	282(32)	3,0	0,7	0,8	20	SP22	Vila Real
37	1030(56)	1,0	0,3	0,9	22,5	SP22	Beja

38	1030(56)	1,0	0,3	0,9	22,5	SP22	C. Branco
39	1030(56)	1,0	0,3	0,9	22,5	SP22	Mirandela
40	1030(56)	1,0	0,5	1,0	20	SP26	Vila Real
41	1030(56)	1,0	0,5	1,0	20	SP26	Lisboa
42	1030(56)	1,0	0,5	1,0	20	SP26	Braga
43	1030(56)	2,0	0,3	0,8	25	SP25	Vila Real
44	1030(56)	2,0	0,3	0,8	25	SP25	Lisboa
45	1030(56)	2,0	0,3	0,8	25	SP25	Braga
46	1030(56)	2,0	0,7	0,9	20	HS29P	Porto
47	1030(56)	2,0	0,7	0,9	20	HS29P	Guarda
48	1030(56)	2,0	0,7	0,9	20	HS29P	Portimão
49	1030(56)	3,0	0,5	0,8	22,5	ClimSel C32	Porto
50	1030(56)	3,0	0,5	0,8	22,5	ClimSel C32	Guarda
51	1030(56)	3,0	0,5	0,8	22,5	ClimSel C32	Portimão
52	1030(56)	3,0	0,7	1,0	25	RT21	Beja
53	1030(56)	3,0	0,7	1,0	25	RT21	C. Branco
54	1030(56)	3,0	0,7	1,0	25	RT21	Mirandela

Tabela 22: sistema para o ganho indireto com PCMs

	U.A (A _c)	U _c	τ_n	α_s	T° de ajuste	Tipo de PCM	Zonas climáticas
	A	B	C	D	E	U	V
1	161(16)	1,0	0,3	0,8	20	Micronal	Portimão
2	161(16)	1,0	0,3	0,8	20	Micronal	Porto
3	161(16)	1,0	0,3	0,8	20	Micronal	Guarda
4	161(16)	1,0	0,7	0,9	25	RT35	Braga
5	161(16)	1,0	0,7	0,9	25	RT35	Vila Real
6	161(16)	1,0	0,7	0,9	25	RT35	Lisboa
7	161(16)	2,0	0,5	1,0	25	SP25	Portimão
8	161(16)	2,0	0,5	1,0	25	SP25	Porto
9	161(16)	2,0	0,5	1,0	25	SP25	Guarda
10	161(16)	2,0	0,7	0,8	22,5	HS29P	Mirandela
11	161(16)	2,0	0,7	0,8	22,5	HS29P	Beja
12	161(16)	2,0	0,7	0,8	22,5	HS29P	C. Branco
13	161(16)	3,0	0,3	1,0	22,5	ClimSel C32	Braga
14	161(16)	3,0	0,3	1,0	22,5	ClimSel C32	Vila Real
15	161(16)	3,0	0,3	1,0	22,5	ClimSel C32	Lisboa
16	161(16)	3,0	0,5	0,9	20	SP26	Mirandela
17	161(16)	3,0	0,5	0,9	20	SP26	Beja
18	161(16)	3,0	0,5	0,9	20	SP26	C. Branco
19	282(32)	1,0	0,5	0,8	25	ClimSel C32	C. Branco
20	282(32)	1,0	0,5	0,8	25	ClimSel C32	Mirandela
21	282(32)	1,0	0,5	0,8	25	ClimSel C32	Beja
22	282(32)	1,0	0,7	1,0	22,5	SP26	Guarda
23	282(32)	1,0	0,7	1,0	22,5	SP26	Portimão
24	282(32)	1,0	0,7	1,0	22,5	SP26	Porto
25	282(32)	2,0	0,3	1,0	20	RT35	C. Branco
26	282(32)	2,0	0,3	1,0	20	RT35	Mirandela
27	282(32)	2,0	0,3	1,0	20	RT35	Beja

28	282(32)	2,0	0,5	0,9	22,5	Micronal	Lisboa
29	282(32)	2,0	0,5	0,9	22,5	Micronal	Braga
30	282(32)	2,0	0,5	0,9	22,5	Micronal	Vila Real
31	282(32)	3,0	0,3	0,9	25	HS29P	Guarda
32	282(32)	3,0	0,3	0,9	25	HS29P	Portimão
33	282(32)	3,0	0,3	0,9	25	HS29P	Porto
34	282(32)	3,0	0,7	0,8	20	SP25	Lisboa
35	282(32)	3,0	0,7	0,8	20	SP25	Braga
36	282(32)	3,0	0,7	0,8	20	SP25	Vila Real
37	1030(56)	1,0	0,3	0,9	22,5	SP25	Beja
38	1030(56)	1,0	0,3	0,9	22,5	SP25	C. Branco
39	1030(56)	1,0	0,3	0,9	22,5	SP25	Mirandela
40	1030(56)	1,0	0,5	1,0	20	HS29P	Vila Real
41	1030(56)	1,0	0,5	1,0	20	HS29P	Lisboa
42	1030(56)	1,0	0,5	1,0	20	HS29P	Braga
43	1030(56)	2,0	0,3	0,8	25	SP26	Vila Real
44	1030(56)	2,0	0,3	0,8	25	SP26	Lisboa
45	1030(56)	2,0	0,3	0,8	25	SP26	Braga
46	1030(56)	2,0	0,7	0,9	20	ClimSel C32	Porto
47	1030(56)	2,0	0,7	0,9	20	ClimSel C32	Guarda
48	1030(56)	2,0	0,7	0,9	20	ClimSel C32	Portimão
49	1030(56)	3,0	0,5	0,8	22,5	RT35	Porto
50	1030(56)	3,0	0,5	0,8	22,5	RT35	Guarda
51	1030(56)	3,0	0,5	0,8	22,5	RT35	Portimão
52	1030(56)	3,0	0,7	1,0	25	Micronal	Beja
53	1030(56)	3,0	0,7	1,0	25	Micronal	C. Branco
54	1030(56)	3,0	0,7	1,0	25	Micronal	Mirandela

Tabela 23: Sistema para o ganho direto e indireto sem PCMs

	U.A (A _c)	U _c	τ _n	α _s	T° de ajuste	Zonas Climáticas
	A	B	C	D	E	J
1	161(16)	1	0,3	0,8	20	Portimão
2	161(16)	1	0,3	0,9	22,5	Lisboa
3	161(16)	1	0,3	1,0	25	Beja
4	161(16)	2	0,7	0,8	22,5	Porto
5	161(16)	2	0,7	0,9	25	Braga
6	161(16)	2	0,7	1,0	20	C. Branco
7	161(16)	3	0,5	0,8	25	Guarda
8	161(16)	3	0,5	0,9	20	Vila Real
9	161(16)	3	0,5	1,0	22,5	Mirandela
10	282(32)	1	0,7	0,8	25	Mirandela
11	282(32)	1	0,7	0,9	20	Guarda
12	282(32)	1	0,7	1,0	22,5	Vila Real
13	282(32)	2	0,5	0,8	20	Beja
14	282(32)	2	0,5	0,9	22,5	Portimão
15	282(32)	2	0,5	1,0	25	Lisboa
16	282(32)	3	0,3	0,8	22,5	C. Branco
17	282(32)	3	0,3	0,9	25	Porto

18	282(32)	3	0,3	1,0	20	Braga
19	1030(56)	1	0,5	0,8	22,5	Braga
20	1030(56)	1	0,5	0,9	25	C. Branco
21	1030(56)	1	0,5	1,0	20	Porto
22	1030(56)	2	0,3	0,8	25	Vila Real
23	1030(56)	2	0,3	0,9	20	Mirandela
24	1030(56)	2	0,3	1,0	22,5	Guarda
25	1030(56)	3	0,7	0,8	20	Lisboa
26	1030(56)	3	0,7	0,9	22,5	Beja
27	1030(56)	3	0,7	1,0	25	Portimão

4.3.5 S/N (“Signal to Noise”)

O método Taguchi utiliza a relação sinal-ruído (S/N, “Signal to Noise”) para expressar a dispersão em torno do valor a atingir (Sharma *et al.*, 2011). Um valor elevado de S/N implica que o sinal seja muito maior do que o efeito aleatório dos fatores de ruído. Do ponto de vista da qualidade, existem 3 categorias possíveis das características da qualidade; menor é melhor (“Smaller is better”), nominal é melhor (“Nominal is better”), e maior é melhor (“Bigger is better”). No caso do presente estudo, pretende-se estimar o menor consumo energético para cada caso, isto é, para o caso direto sem PCMs e com PCMs e para o caso indireto sem PCMs e com PCMs. Neste sentido, a categoria que se adegue melhor para estas condições é a categoria; menor é melhor. Esta categoria é avaliada segundo uma função logarítmica baseada na desviação dos mínimos quadrados (DMQ), e é dada pela seguinte expressão,

$$\frac{S}{N} = -10 \log(DMQ) \quad (\text{Eq. 4.18})$$

A formula geral do DMQ é a soma ao longo do índice j dada por,

$$DMQ = (Y_{ij} - m)^2 \quad (\text{Eq. 4.19})$$

Quando o objetivo é estimar o valor mínimo, da categoria; menor é melhor, ($m=0$), esta expressão reduz-se para,

$$DMQ = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^4 (Y_{ij})^2 \quad (i = 1,2,3, \dots, 9) \quad (\text{Eq. 4.20})$$

4.4 MÉTODOS PARA A ESTIMAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO

Existem alguns métodos, que permitem avaliar o desempenho térmico de edifícios solar passivos, entre os quais se pode encontrar dois métodos desenvolvidos pelos

engenheiros norte-americanos J. Douglas Balcomb⁴ e Robert D. McFarland. O primeiro método, ou o *método A*, denominado por método da razão de carga do coletor (em inglês, “Load Colector Ratio”; LCR), permite avaliar a energia poupada e a energia auxiliar através da fração solar, adimensional (“Solar Saving Fraction”, SSF) e o segundo método, ou *método B*, denominado por razão de carga solar (“Solar Load Ratio”; SLR), método que origina o método LCR, permite avaliar a energia auxiliar através da fração solar, adimensional (“Solar Heating Fraction”; SHF) (Balcomb *et al.*, 1978). O SSF do método LCR é semelhante ao SHF do método SLR. O SHF corresponde aos meses de estação de aquecimento. Estes métodos foram originados para o estudo de desempenho térmico em sistemas ativos pelo que se verificou que são ainda mais precisos em sistemas passivos. O primeiro método avalia o desempenho térmico de um edifício, anualmente e o segundo método, mensalmente pelo que o erro da estimação efetuada, pelo método LCR, é relativamente menor (+/- 3%) do que o método SLR.

4.4.1 Método LCR

Balcomb *et al.* abordam, em primeiro lugar, o método LCR, que apelidaram de *método A*, pelo que este método é muito simples de utilizar e resulta do método SLR, que apelidaram de *método B*, muito mais complexo e pelo qual é analisado mais à frente. Este método só se pode aplicar para localizações específicas. O cálculo do LCR é efetuado pela seguinte expressão,

$$LCR = \frac{NLC}{A_c} \left(\frac{J \cdot GD^{-1}}{m^2} \right) \quad (\text{Eq. 4.21})$$

O numerador NLC (“Net Load Coefficient”) indica o coeficiente de perda do edifício em $(J \text{ } (^{\circ}C \text{ dias})^{-1})$ e o denominador A_c indica a área do coletor, em (m^2) . A estimação do NLC implica calcular o coeficiente de transmissão térmica superficial (U), em $(W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1})$, para cada elemento construtivo do edifício à exceção da área coletor solar, com as respetivas áreas dos elementos construtivos. O cálculo do NLC é efetuado da forma seguinte,

$$NLC = 24 \left[(U \cdot A)_{parede (N,E,O)} + (U \cdot A)_{solo} + (U \cdot A)_{teto} + (U \cdot A)_{infiltração} \right] \left(\frac{J}{GD} \right) \quad (\text{Eq. 4.22})$$

4.4.1.1 Sistema direto e indireto sem PCMs

O coeficiente de transmissão térmica superficial em zona corrente (U), expresso em $(W \text{ m}^{-2} \text{ K}^{-1})$, é a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente, por unidade de diferença de temperatura

⁴ J.Douglas Balcomb – Engenheiro reformado, que obteve o Ph.D. em engenharia nuclear, dedicou-se exclusivamente no trabalho da quantificação e avaliação de técnicas de aquecimento solar passivo desde 1975. Recebeu cinco prémios pela contribuição na sua área.

entre o ambiente que ele separa, e é calculado pela expressão geral (Camelo *et al.*, 2006),

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \left(\frac{W}{m^2 K} \right) \quad (\text{Eq. 4.23})$$

Em que R_j indica a resistência térmica da camada j em ($m^2 K W^{-1}$) e R_{si} , R_{se} indicam as resistências térmicas superficiais interiores e exteriores, respetivamente, em ($m^2 K W^{-1}$).

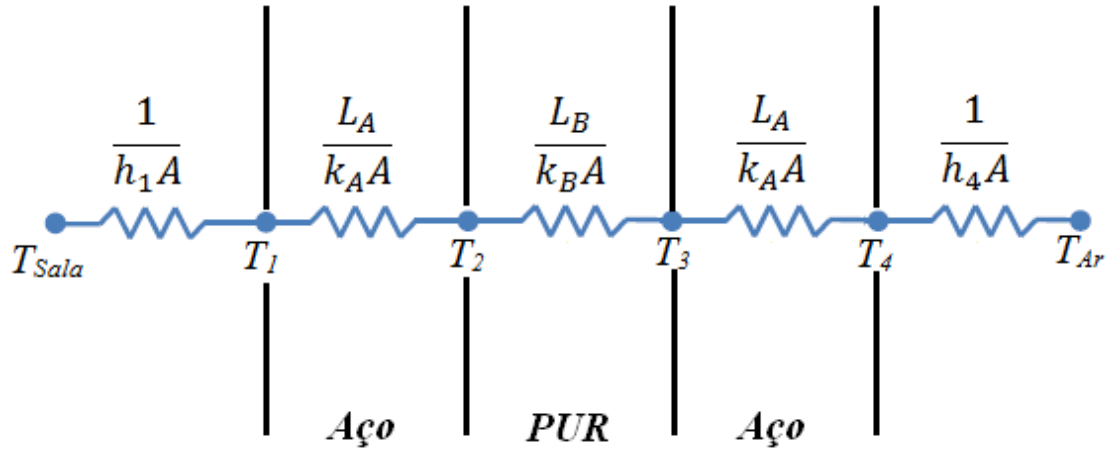


Figura 63: Paredes exteriores (N,E,O)

Sabendo que a transferência de calor (q), em (W), é efetuada do interior para o exterior do edifício nas paredes exteriores (Norte, Este e Oeste), em que se pode observar as diferentes camadas, através da Figura 63, q é definida pela expressão seguinte,

$$q = \frac{T_{Sala} - T_{Ar}}{\left[\left(\frac{1}{h_1 A} \right) + \left(2 \frac{L_A}{k_A A} \right) + \left(\frac{L_B}{k_B A} \right) + \left(\frac{1}{h_4 A} \right) \right]} (W) \quad (\text{Eq. 4.24})$$

Pela equação de Fourier, obtém-se o coeficiente de transmissão térmica (U), dado por,

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \leftrightarrow \quad (\text{Eq. 4.25})$$

$$q = U \cdot A (T_{Sala} - T_{Ar}) \leftrightarrow \quad (\text{Eq. 4.26})$$

$$U \cdot A = \frac{1}{R_{total}} \leftrightarrow \quad (\text{Eq. 4.27})$$

$$U = \frac{1}{A \cdot R_{total}} \leftrightarrow \quad (\text{Eq. 4.28})$$

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_1}\right) + \left(\frac{L_A}{k_A}\right) + \left(\frac{L_B}{k_B}\right) + \left(\frac{1}{h_4}\right)} \left(\frac{W}{m^2K}\right) \leftrightarrow \quad (\text{Eq. 4.29})$$

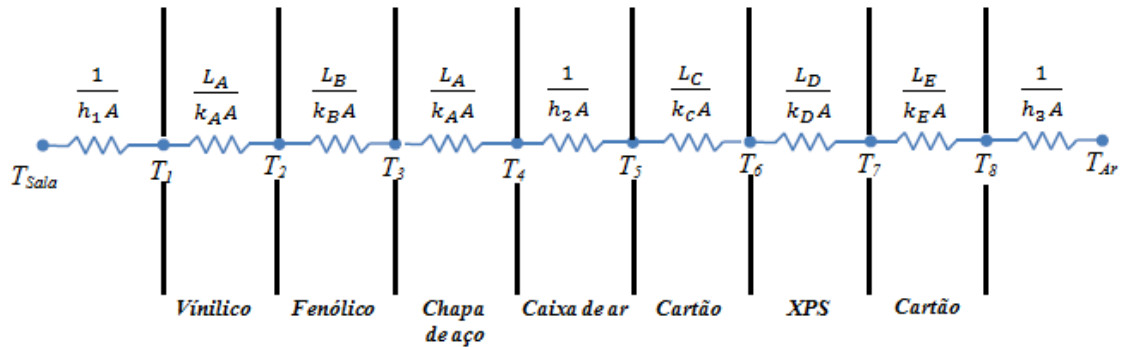


Figura 64: Pavimento sobre o exterior

Em relação ao pavimento sobre o exterior, em que se pode observar as diferentes camadas através da Figura 64, a transferência de calor (q), em (W) é definida pela seguinte expressão,

$$q = \frac{T_{Sala} - T_{Ar}}{\left[\left(\frac{1}{h_1A}\right) + \left(\frac{L_A}{k_{AA}}\right) + \left(\frac{L_B}{k_B A}\right) + \left(\frac{1}{h_2A}\right) + \left(\frac{L_C}{k_{CA}}\right) + \left(\frac{L_D}{k_{DA}}\right) + \left(\frac{L_E}{k_{EA}}\right) + \left(\frac{1}{h_3A}\right)\right]} (W) \quad (\text{Eq. 4.30})$$

Da mesma forma a Eq. 4.25 até a Eq. 4.29, obtém-se o coeficiente de transmissão térmica (U), em ($W K^{-1}$), dado por,

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_1}\right) + \left(\frac{L_A}{k_A}\right) + \left(\frac{L_B}{k_B}\right) + \left(\frac{1}{h_2}\right) + \left(\frac{L_C}{k_C}\right) + \left(\frac{L_D}{k_D}\right) + \left(\frac{L_E}{k_E}\right) + \left(\frac{1}{h_3}\right)} \left(\frac{W}{m^2K}\right) \quad (\text{Eq. 4.31})$$

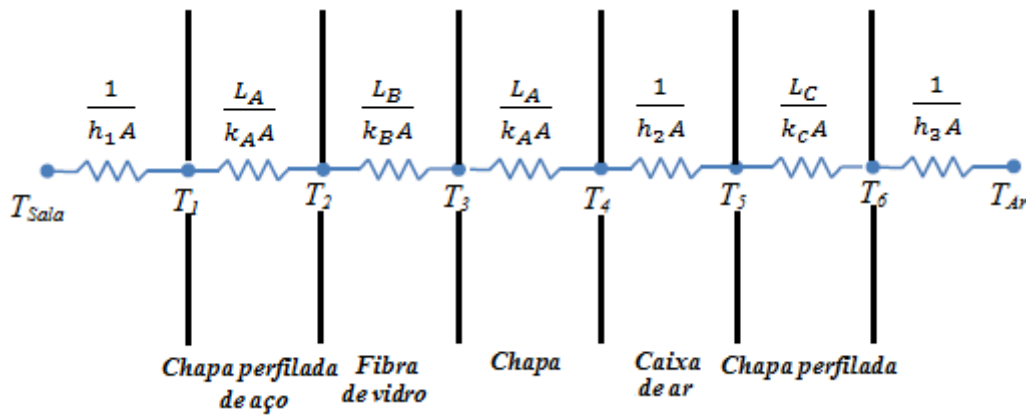


Figura 65: Cobertura exterior

Em relação a cobertura exterior, mostrada na Figura 65, a transferência de calor (q), em (W), é definida pela seguinte expressão,

$$q = \frac{T_{Sala} - T_{Ar}}{\left[\left(\frac{1}{h_1 A} \right) + \left(\frac{L_A}{k_A A} \right) + \left(\frac{L_B}{k_B A} \right) + \left(\frac{1}{h_2 A} \right) + \left(\frac{L_C}{k_C A} \right) + \left(\frac{1}{h_3 A} \right) \right]} \quad (W) \quad (Eq. 4.32)$$

Da mesma forma a Eq. 4.25 até a Eq. 4.29, obtém-se o coeficiente de transmissão térmica (U), em ($W m^{-2} K^{-1}$), dado por,

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_1} \right) + \left(\frac{L_A}{k_A} \right) + \left(\frac{L_B}{k_B} \right) + \left(\frac{1}{h_2} \right) + \left(\frac{L_C}{k_C} \right) + \left(\frac{1}{h_3} \right)} \quad \left(\frac{W}{m^2 K} \right) \quad (Eq. 4.33)$$

Uma vez estimada a razão de carga do coletor (LCR) recorre-se às tabelas desenvolvidas por Balcomb *et al.*, estas definidas para cada localidade, que permite relacionar LCR com a fração solar anual (SHF_{anual} ; “Annual Solar Heating Fraction”) (Balcomb *et al.*, 1978). Neste caso concreto, exprime-se o SHF_{anual} como sendo o SSF para o caso do método LCR. Por exemplo, supõe-se que a Tabela 24 é dada para um determinado local em que se encontrou um valor de $90 J GD^{-1} m^{-2}$ através da Eq. 4.21. O valor do LCR de $90 J GD^{-1} m^{-2}$ coincide com o valor do SSF que é de 0,2. Se outro valor do LCR for encontrado em que não aparece de forma direta, na tabela, mas entre dois valores de SSF, neste caso tem que se recorrer à interpolação.

Tabela 24: Relação do SSF com LCR

SSF	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
LCR	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10

É igualmente necessário determinar o coeficiente de perda da infiltração do edifício, ($(U.A)_{infiltração}$), em ($W K^{-1}$), em que é dado pela seguinte expressão,

$$(U.A)_{infiltração} = RFAV \cdot MAH \cdot Volume \text{ do edifício} \left(\frac{W}{K} \right) \quad (\text{Eq. 4.34})$$

Em que RFAV corresponde à razão do fluxo de ar volumétrico, em $(W K^{-1})$. O RFVA possui um valor médio de $1,21 \cdot 10^3 W K^{-1}$ ao nível do mar. O parâmetro MAH, que corresponde a mudança de ar por hora, é o volume de ar total que é transferido num edifício, por hora. A Energia auxiliar anual ($Q_{auxiliar \text{ anual}}$), em $(J \text{ ano}^{-1})$, é dada pela relação definida pelo SSF,

$$SSF = 1 - \frac{Q_{auxiliar \text{ anual}}}{U.A.GD_{anual}} \leftrightarrow \quad (\text{Eq. 4.35})$$

$$Q_{auxiliar \text{ anual}} = (1 - SSF)(U.A.GD_{anual}) \left(\frac{J}{ano} \right) \leftrightarrow \quad (\text{Eq. 4.36})$$

Neste caso GD_{anual} , em $(^{\circ}C \text{ dias})$, que define graus dias anual, compreende a adição dos graus dias mensal correspondente aos meses da estação de aquecimento. O cálculo de GD_{anual} é dado pela equação,

$$GD_{anual} = \sum_J GD_{mensal_j} \text{ (}^{\circ}C \text{ dias)} \quad (\text{Eq. 4.37})$$

Em que GD_{mensal_j} , em $(^{\circ}C \text{ dias})$, indica o número de graus dias para o mês j . O cálculo do parâmetro graus dias mensal (GD_{mensal}) é efetuado pela seguinte forma,

$$GD_{mensal} = n(T_{interna \text{ média}} - T_{externa \text{ média mensal}}) \text{ (}^{\circ}C \text{ dias)} \quad (\text{Eq. 4.38})$$

Em que o parâmetro n ; define o número de dias correspondente ao mês em questão (Ex: para o mês de fevereiro, $n=28$), $T_{interna \text{ média}}$ em $(^{\circ}C)$ define a temperatura interna média dentro do edifício em que, neste caso, corresponde a $20^{\circ}C$, para a estação dos meses de aquecimento, estipulada pela RCCTE, e $T_{externa \text{ média mensal}}$ em $(^{\circ}C)$ define a temperatura externa média mensal para cada uma das 9 Zonas Climáticas.

4.4.2 Método SLR

O método SLR, mencionado como *método B* por Balcomb *et al.*, é um método um pouco mais elaborado do que o método LCR porque é necessário efetuar cálculos, mensalmente, para estimar o calor auxiliar para os períodos correspondentes a estação de aquecimento. Segundo Balcomb *et al.*, o cálculo do SLR, adimensional, é efetuado através da seguinte expressão,

$$SLR = \frac{A_c \cdot H \cdot \alpha_s}{(U.A)_{modificado} \cdot GD_{mensal}} \quad (\text{Eq. 4.39})$$

No numerador, encontra-se a área do coletor solar (A_c), em (m^2), a radiação solar transmitida através do vidro virado a sul (H), em ($J m^{-2}$), e o coeficiente de absorção do coletor (α_s), adimensional. No denominador, encontra-se o coeficiente de perda modificada do edifício ($(U.A)_{modificado}$), em ($W K^{-1}$), e o número de graus dias mensal (GD_{mensal}), em ($^{\circ}C dia$). A radiação solar diária mensal, numa superfície horizontal (H), em ($J m^{-2}$), é dada pela seguinte expressão (Duffie *et al.*, 2006).

$$H = H_0 \cdot \kappa_T \left(\frac{J}{m^2} \right) \quad (\text{Eq. 4.40})$$

Em que H_0 corresponde a radiação diária extraterrestre, numa superfície horizontal, em ($J m^{-2}$), dada pela seguinte expressão,

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 \cdot G_{sc}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right) \left(\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta \right) \left(\frac{J}{m^2} \right) \quad (\text{Eq. 4.41})$$

O parâmetro G_{sc} indica a constante solar, que é de aproximadamente $1367 W m^{-2}$, o parâmetro n indica o número do dia correspondente ao ano (ver Tabela 12 na secção 4.1.1). A determinação dos ângulos ϕ e δ pode ser efetuada seguindo as instruções na parte teórica em “Estimação da altura máxima”, na secção 4.1.1. O ângulo ω_s , em (graus), corresponde ao ângulo do pôr-do-sol. A caracterização deste ângulo é efetuada através da seguinte forma,

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (\text{Eq. 4.42})$$

O parâmetro κ_T , da Eq. 4.40, corresponde ao índice diário de claridade, adimensional. Este parâmetro só pode ser estimado pela relação contrária da Eq. 4.40, ou então recorrendo-se aos valores tabelados, se forem disponíveis. O parâmetro do coeficiente de absorção (α_s), adimensional, pode ser estimado pela seguinte relação,

$$\alpha_s = 0,2260 - 0,002512 (\phi - D) + 0,0003075 ((\phi - D)^2) \quad (\text{Eq. 4.43})$$

Em que o ângulo ϕ corresponde a latitude do local em estudo e o parâmetro D corresponde ao ângulo da inclinação solar dada pela equação,

$$D = 23,3^{\circ} \cos (30^{\circ}M - 187^{\circ}) \quad (\text{Eq. 4.44})$$

O parâmetro M corresponde ao número do mês (Ex: para o mês de junho, $M=6$). O parâmetro $(U.A)_{modificado}$, em ($W K^{-1}$), do denominador, corresponde ao coeficiente de perda modificada do edifício, no qual é estimado adicionando o coeficiente de perda

total do edifício $(U.A)_{total}$, em $(W K^{-1})$, com o coeficiente de perda da massa de armazenamento térmico, $(U.A)_{massa\ térmica}$, no estado estacionário. O cálculo de $(U.A)_{modificado}$ é mostrado na Eq. 4.45. O parâmetro U , em $(W m^{-2} K^{-1})$, da massa térmica corresponde ao coeficiente de transmissão térmica superficial através do envidraçado virado a sul para o sistema direto e a parede Trombe para o sistema indireto, com a sua respetiva área (A) , em (m^2) .

$$(U.A)_{modificado} = (U.A)_{total} + (U.A)_{massa\ térmica} \left(\frac{W}{K} \right) \quad (\text{Eq. 4.45})$$

O cálculo do número de graus dias mensal (GD_{mensal}) do denominador é efetuado através da Eq. 4.38. O cálculo da fração solar de aquecimento (SHF), que se correlaciona, neste caso, com o SLR, é dado pela seguinte expressão,

$$SHF = 1 - \frac{Q_{auxiliar}}{(U.A)_{modificado} \cdot GD} \quad (\text{Eq. 4.46})$$

Reciprocamente, a energia auxiliar $(Q_{auxiliar})$, em (J), pode ser calculada pela seguinte equação,

$$Q_{auxiliar} = (1 - SHF)(U.A)_{modificado} \cdot GD \quad (\text{Eq. 4.47})$$

Para estimar o valor da fração solar de aquecimento anual (SHF_{anual}) , isto é correspondente aos meses de estação de aquecimento, é necessário efetuar o somatório de todas as energias auxiliares, calculadas mensalmente,

$$SHF_{anual} = 1 - \frac{Q_{total}}{NLC \cdot GD_{total}} \quad (\text{Eq. 4.48})$$

O somatório dos calores auxiliares é dado por Q_{total} , em (J), o parâmetro NLC corresponde ao coeficiente de perda do edifício, em $(J (^{\circ}C \text{ dias})^{-1})$, e o parâmetro GD_{total} corresponde ao somatório dos graus dias mensal, em $(^{\circ}C \text{ dias})$.

4.4.2.1 Transferência de calor nos PCMs

A equação para o calor latente é dada pelas seguintes relações (Araújo, 2010):

$$Q_L = \int_{T_1}^{T_{fus}} m \cdot c_{p,s} \cdot dT + m \cdot \Delta H_{fus} + \int_{T_{fus}}^{T_2} m \cdot c_{p,l} \cdot dT \leftrightarrow \quad (\text{Eq. 4.49})$$

$$Q_L = m \cdot \overline{c_{p,s}} (T_{fus} - T_1) + m \cdot \Delta H_{fus} + m \cdot \overline{c_{p,l}} (T_2 - T_{fus}) \leftrightarrow \quad (\text{Eq. 4.50})$$

$$Q_L = m [\overline{c_{p,s}} (T_{fus} - T_1) + \Delta H_{fus} + \overline{c_{p,l}} (T_2 - T_{fus})] \leftrightarrow \quad (\text{Eq. 4.51})$$

Onde Q_L , em (J), constitui o calor latente de armazenamento; m , em (kg), a massa; H_{fus} , em ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), o calor latente de fusão; $c_{p,s}$ e $c_{p,l}$, em ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), o calor específico sensível e latente, respetivamente; T_1 e T_2 , em (K), a temperatura externa e interna, respetivamente, que se medem à fronteira do material de mudança de fase; e T_{fus} , em (K), a temperatura de fusão. A equação da condução de calor à uma dimensão, que inclui a fusão e a solidificação, é definida como:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho \cdot H \cdot \frac{\partial f}{\partial t} \quad (\text{Eq. 4.52})$$

Onde, ρ (kg m^{-3}) e k ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$) são a densidade e condutividade térmica, respetivamente, t (s) é o tempo e x é uma coordenada espacial.

4.5 “ENERGYPLUS”

A “EnergyPlus” tem origem nos programas “BLAST” (Análises de Cargas em Edifício e Termodinâmica de Sistema) e “DOE-2” desenvolvidos nos anos 70-80 como ferramentas de simulação de carga e de energia (EnergyPlus, 2011). Estes programas são sobretudo utilizados por engenheiros e arquitetos que desejam dimensionar apropriadamente equipamentos AVAC, otimizar o desempenho energético, etc. À semelhança das suas fontes de origem, a “EnergyPlus” é um programa que permite efetuar simulação de carga térmica e análise energética. A “EnergyPlus” efetua operações que permitem calcular as necessidades de carga de aquecimento e arrefecimento para manter as regulações térmicas do termostato, as condições de sistema secundária AVAC e o consumo de energia de equipamentos e outras simulações que são necessárias para prever o desempenho que um edifício atual deveria ter. Serão selecionados, unicamente, os resultados das necessidades de carga de aquecimento visto que o presente trabalho visa efetuar o estudo dos gastos e poupanças energéticos para a estação de aquecimento. As figuras, mostradas a seguir, baseiam-se no modo como foram efetuadas as medições. A Figura 66 mostra as diferentes zonas simuladas, para o caso de ganho indireto, sendo que as zonas ZNT1.1 e ZNT 2.1 constituem as zonas em que os valores do consumo energético foram analisados. De forma semelhante, em relação ao caso de ganho direto, avalia-se, neste caso concreto, os valores do consumo energético nas zonas ZNT1 e ZNT2, para o sistema de ganho direto, representadas na Figura 67. Encontram-se em anexo, extratos de alguns ficheiros do programa “EnergyPlus” com os dados inseridos.

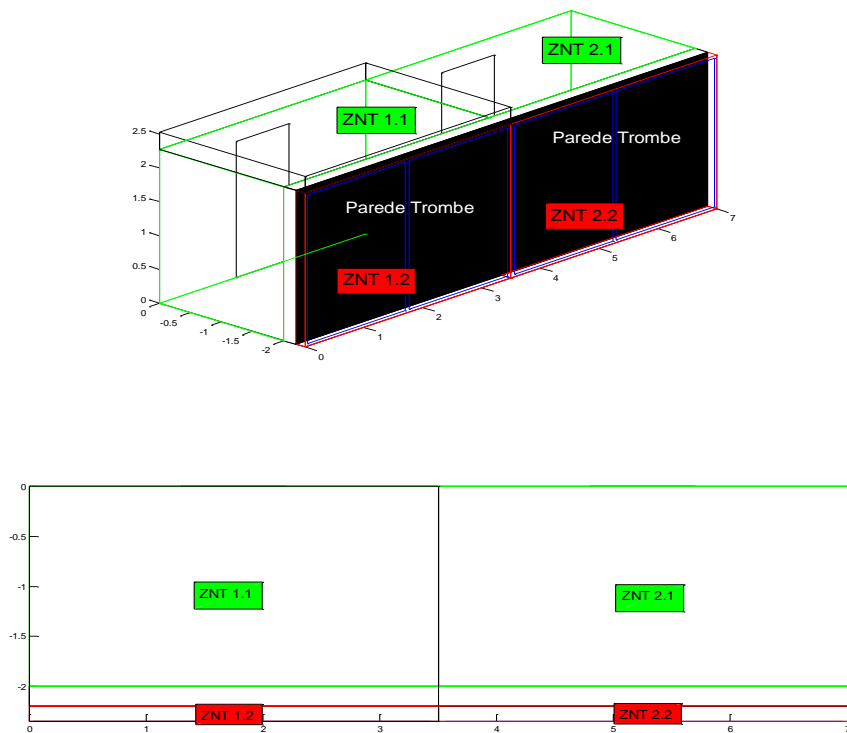


Figura 66: Exemplo esquemático do tipo de simulação efetuado na “célula-de-teste” para o caso de ganho indireto, através do “EnergyPlus”

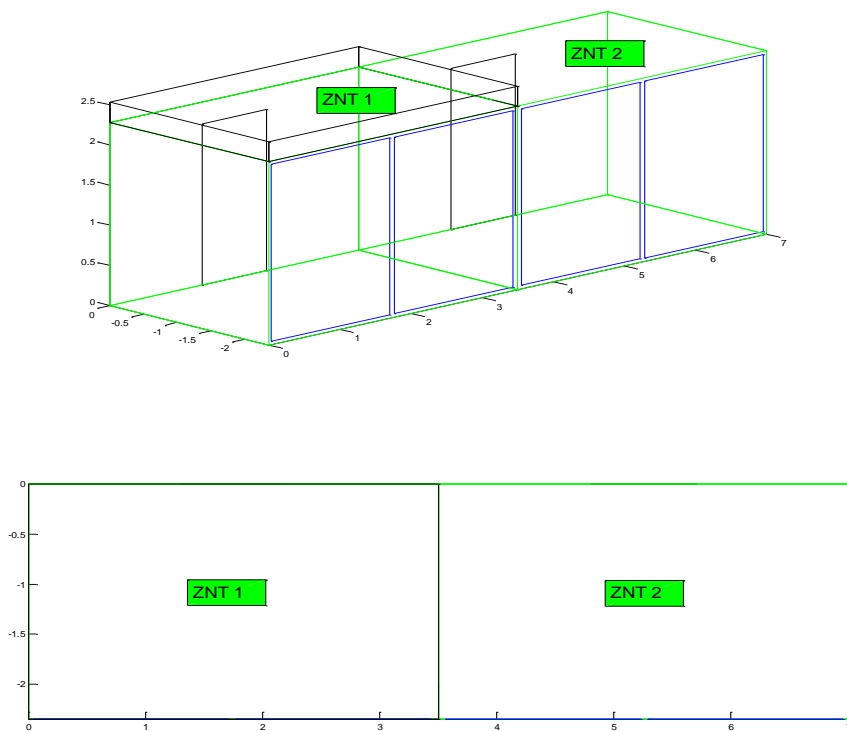


Figura 67: Exemplo esquemático do tipo de simulação efetuado na “célula-de-teste” para o ganho direto, através do “EnergyPlus”

4.5.1 Método de cálculo do “EnergyPlus”

O programa “EnergyPlus” efetua cálculos de transferência de calor entre o ambiente externo e interno, recorrendo a um balanço energético (Sansana, 2004). Esse balanço energético inclui os processos de transferência de calor por condução, convecção e radiação. O balanço energético é desenvolvido em três níveis; balanço nas superfícies externas e internas e no volume de ar da zona envolvida pelas superfícies. O balanço energético para as superfícies externas é dada pela equação,

$$q''_{asol} + q''_{LWT} + q''_{conv} - q''_{K_0} = 0 \quad (\text{Eq. 4.53})$$

Em que,

- q''_{asol} = Fluxo de radiação absorvida, direta e difusa (W m^{-2})
- q''_{LWT} = Fluxo de radiação de comprimento de onda longa (W m^{-2})
- q''_{conv} = Fluxo de calor por convecção (W m^{-2})
- q''_{K_0} = Fluxo de calor por condução através da superfície (W m^{-2})

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ALTURA MÁXIMA, E ALTURA E COMPRIMENTO DA PALA

5.1.1 Estação de aquecimento (inverno)

A Figura 68 mostra um exemplo de uma simulação realizada para a “célula-de-teste”, no dia 21 de dezembro, dia de solstício de inverno, para a zona climática de Portimão (I1 V1), através do “Matlab”.

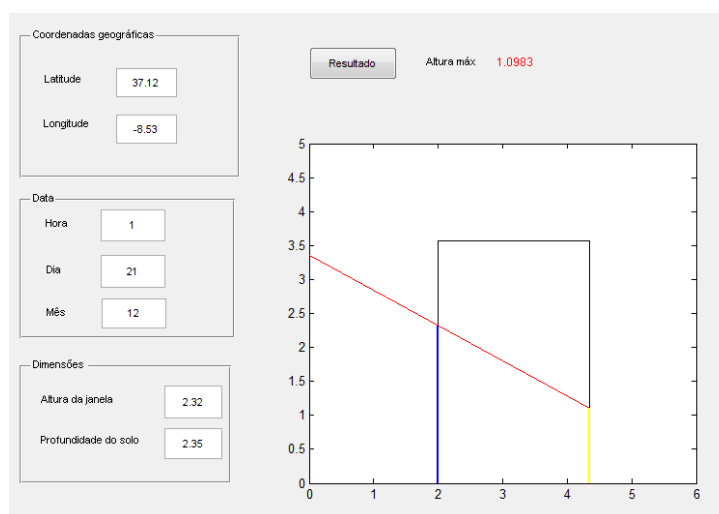


Figura 68: Simulação efetuada para o dia 21 de dezembro para a zona climática de Portimão

Assumindo que a difusividade da janela é máxima, pelo resultado pode-se observar que para às 13h, período em que a radiação solar permanece praticamente constante, a altura máxima em que se pretende implementar os PCMs, é de cerca de 1m. Comparativamente ao “Google SketchUp” verifica-se, através da Figura 69, que os resultados são mais ou menos concordantes.

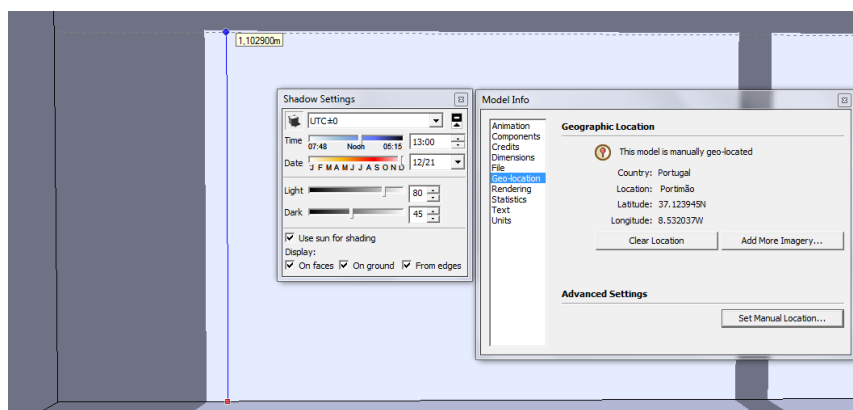


Figura 69: Simulação efetuada através do “Google SketchUp” para as mesmas condições

Considerou-se que a implementação dos PCMs na parede a norte da “célula-de-teste” não deveria ser realizada casualmente pelo que se resolveu encontrar uma altura média que seria mais conveniente tendo em conta que as temperaturas diminuem a partir do início do mês de dezembro até ao fim do mês de fevereiro. De facto, poder-se-ia fixar os PCMs numa altura máxima da parede a norte, no dia 21 de dezembro, período do ano em que o sol fica na posição mais baixa do céu. Mas isto constituiria um desperdício de PCMs dado que, neste período do ano, se pode notar uma transição gradual da posição do sol (*i.e.*, aumento progressivo da altura iluminada com sol na parede a norte, até ao dia 21 de dezembro e diminuição progressiva da altura iluminada com sol na parede a norte, a partir do dia 22 de dezembro). Esta investigação foi, sobretudo, baseada a partir das temperaturas médias mensal mais baixas, registadas para Portugal, e verificou-se que o mês de janeiro representa, em média, o mês mais frio em relação aos outros meses. Por isso, considerou-se o dia 1 de janeiro como referência da altura máxima em que se pretende implementar os PCMs, e isto para todas as regiões em estudo. Ao efetuar a simulação, através do programa “Matlab”, obteve-se uma altura máxima de cerca de 1m; resultado que pode ser observado através das Figuras 70 e 71.

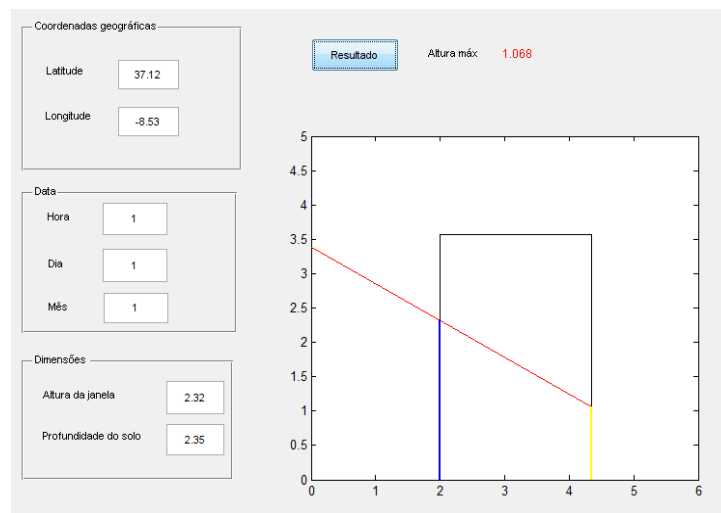


Figura 70: Simulação efetuada para o dia 1 de Janeiro para a zona climática de Portimão

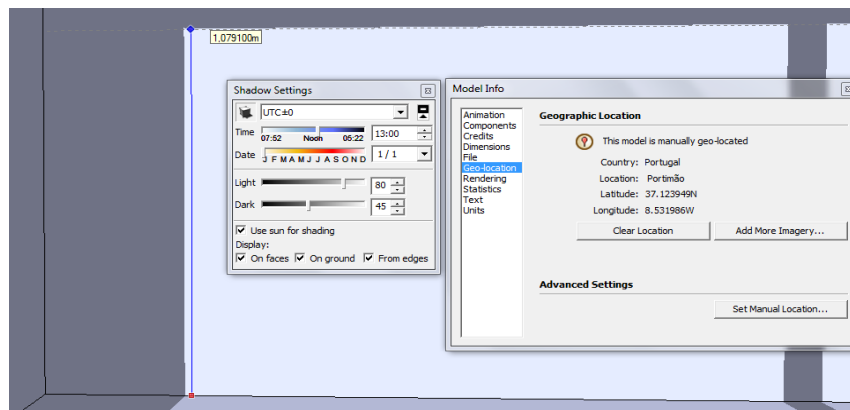


Figura 71: Simulação efetuada através do “Google SketchUp” para as mesmas condições

Ao efetuar, ainda, a comparação da zona climática de Portimão (II V1), com a zona climática de Mirandela (II V1), pode-se verificar que a altura máxima, em que se pretende implementar os PCMs, no dia 1 de Janeiro às 13h, é cerca de 1,3m tal como se mostram nas Figuras 72 e 73. Os valores da altura máxima na parede a norte, para cada zona climática, são mostrados na Tabela 25.

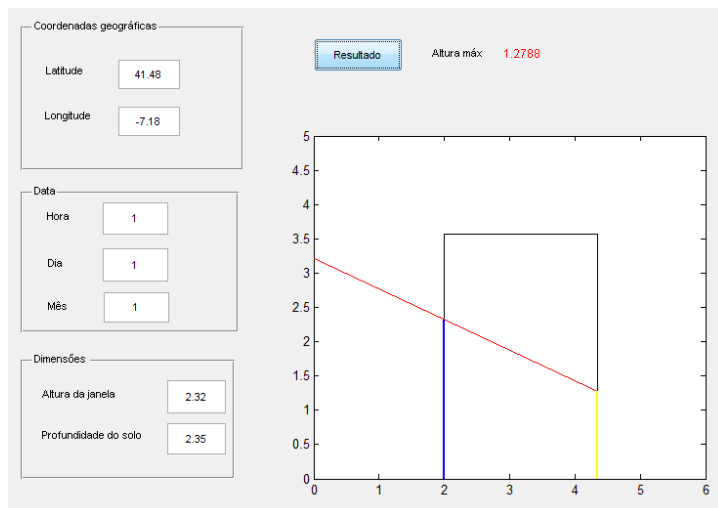


Figura 72: Simulação efetuada para o dia 1 de Janeiro para a zona climática de Mirandela

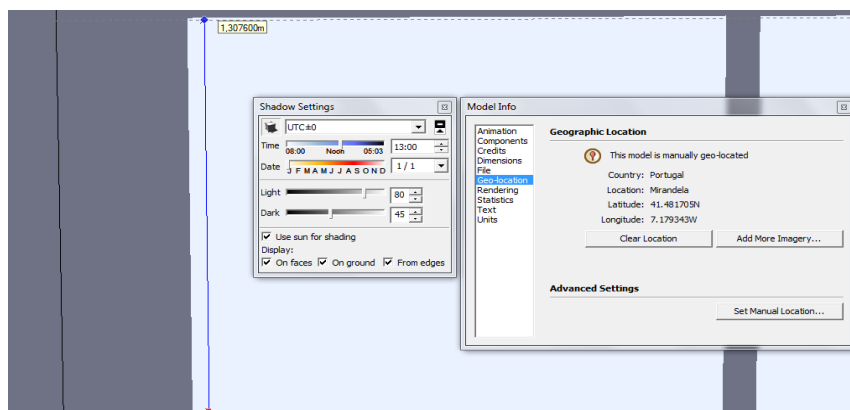


Figura 73: Simulação efetuada através do “Google SketchUp” para as mesmas condições

Tabela 25: Dados da altura máxima para as zonas climáticas

Zonas climáticas	Altura máxima na parede a norte (m)
Portimão (I1 V1)	1,00
Lisboa (I1 V2)	1,15
Beja (I1 V3)	1,10
Porto (I2 V1)	1,27
Braga (I2 V2)	1,29
Castelo Branco (I2 V3)	1,19
Guarda (I3 V1)	1,23
Vila Real (I3 V2)	1,27
Mirandela (I3 V3)	1,30

As Figura 74 e 75 mostram um exemplo em que se pode observar que se necessita de um menor número de painéis, neste caso de painéis CSM da Rubitherm, para a zona climática de Portimão em relação a zona climática de Mirandela.

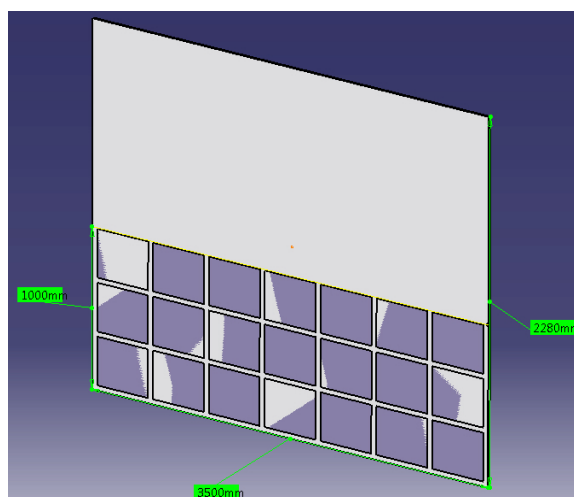


Figura 74: Altura máxima de implantação dos PCMs, neste caso dos painéis CSM, para a zona climática de Portimão

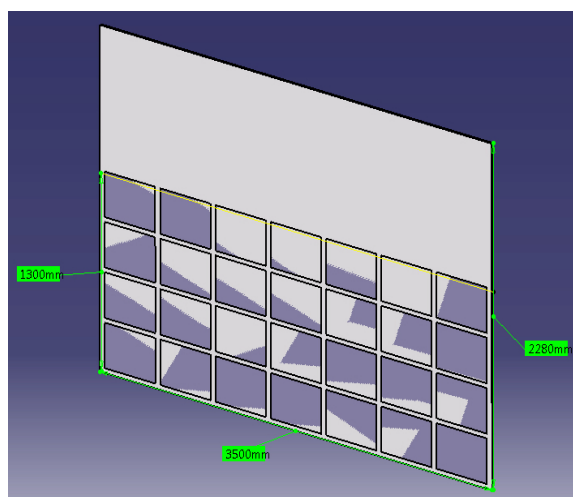


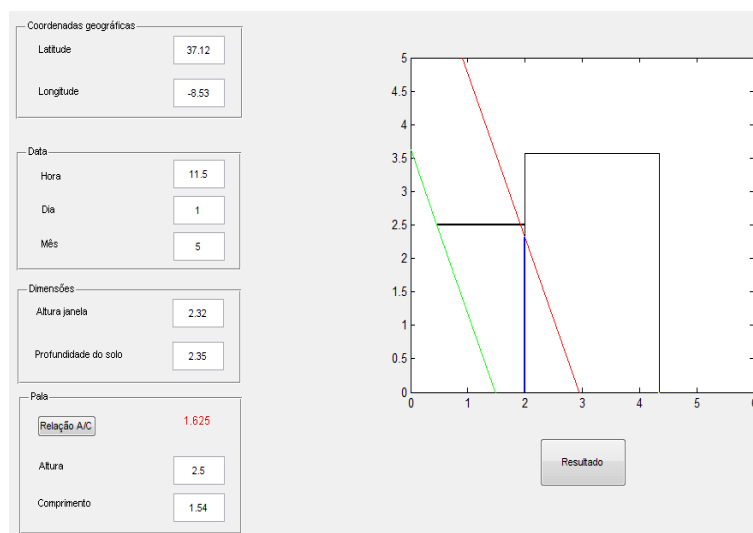
Figura 75: Altura máxima de implantação dos PCMs, neste caso dos painéis CSM, para a zona climática de Mirandela

5.2 ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO (VERÃO)

Efetou-se, igualmente, uma pesquisa sobre a implantação de uma pala na “célula-de-teste” em relação a estação de arrefecimento. Segundo o Instituto de Meteorologia, o mês de abril de 2012 foi o mês mais frio deste século, em Portugal, em relação ao mês de abril dos anos anteriores, com uma temperatura média de 12°C, em que se verificou ocorrência de neve nas terras altas do interior Norte e Centro acima dos 600m, do dia 5 a 7 de abril (D.N., 2012). No entanto verifica-se que o mês de maio é o mês que tem vindo a bater recordes de temperaturas máximas superiores ao valor normal, nestes últimos anos, pelo que se tem verificado que as temperaturas começam a subir drasticamente a partir da quinzena do mês de maio (Expresso, 2011). Estas informações adicionais levam a que a instalação da pala seja efetuada, não a partir do dia 21 de junho, mas de preferência para períodos iniciais do mês de maio. Encontrou-se um simulador que permite estimar a altura e o comprimento da pala a ser instalada para qualquer tipo de casa (Idées Maison, 2010). O “Site” em questão admite algumas relações a variar entre um fator de 0,02 e um fator de 0,03, mas somente para latitudes acima dos 42°N. Dado que o referido “Site” não dispõe de base de dados para as latitudes inferiores a 42°N, nível abaixo do qual se encontra Portugal, ponderou-se efetuar uma média dos dois fatores, originando outro fator de 0,025. Portanto este fator constitui a diferença entre cada latitude em que se encontram as zonas climáticas. Por exemplo, a cidade de Mirandela está situada na Latitude 41°N (sem contar as casas decimais) e possui uma relação de 1,525, logo a cidade da Guarda, que está situada num nível mais abaixo (Lat.: 40°N), deverá possuir uma relação adicional de 0,025 ou seja fica com uma relação de 1,55. A Tabela 26 mostra a relação da altura/comprimento da pala avaliada para cada zona climática. As Figuras 76 e 77 mostram as simulações efetuadas, para a “célula-de-teste” no dia 1 de maio no caso das zonas climáticas de Portimão e Mirandela, respetivamente. O traço assinalado a vermelho, que pode ser observado nas figuras a seguir, representa os raios solares quando atingem o interior da “célula-de-teste” para o caso de não haver pala, e o traço assinalado a verde representa os raios solares a embaterem para fora da “célula-de-teste” devido a implantação de uma pala. A relação da altura/comprimento da pala estabelecida para cada zona climática é mostrada na Tabela 26.

Tabela 26: Dados da relação Altura/Comprimento da pala para as zonas climáticas

Zonas climáticas	Relação Altura/Comprimento pala
Portimão (I1 V1; Lat.: 37,12°)	1,625
Lisboa (I1 V2; Lat.: 38,72°)	1,600
Beja (I1 V3; Lat.: 38,02°)	1,600
Porto (I2 V1; Lat.: 41,17°)	1,525
Braga (I2 V2; Lat.: 41,56°)	1,525
Castelo Branco (I2 V3; Lat.: 39,82°)	1,575
Guarda (I3 V1; Lat.: 40,54°)	1,550
Vila Real (I3 V2; Lat.: 41,28°)	1,525
Mirandela (I3 V3; Lat.: 41,48°)	1,525

**Figura 76: Simulação efetuada para o dia 1 de maio na zona climática de Portimão**

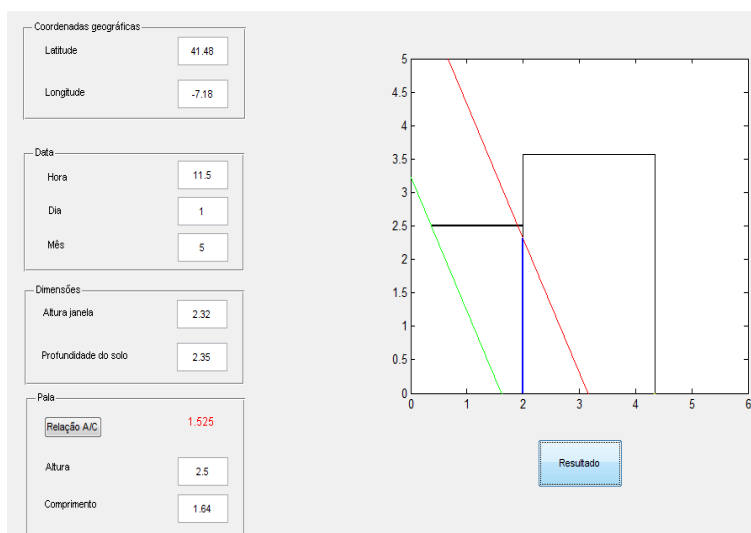


Figura 77: Simulação efetuada para o dia 1 de maio na zona climática de Mirandela

5.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM “ENERGYPLUS”

5.3.1 Modelo de Balcomb

A primeira abordagem, em que se efetuaram as simulações através do programa “EnergyPlus”, foi implementar um modelo semelhante usado por Balcomb *et al.* que usaram o simulador “PASSIM” (Balcomb *et al.*, 1978). O engenheiro norte-americano J.D. Balcomb efetuou, ao longo de várias décadas, alguns estudos de forma a avaliar e determinar o desempenho térmico de edifícios solares passivos em que envolviam todos os sistemas incluindo, nalguns casos, sistema de ganho direto e sistema de ganho indireto. Tem-se um exemplo de um estudo experimental, conduzido por J.D. Balcomb e R.D. McFarland, para um determinado edifício solar passivo de sistema de ganho indireto, em Dodge City estado de Kansas, nos Estados Unidos, em que a massa de armazenamento térmico é uma parede de água (Balcomb *et al.*, 1978). Este edifício possui um volume total de 328 m^3 com uma área de largura; $7,32\text{m}$, comprimento; 22m e altura; $2,17\text{m}$. O envidraçado e a parede de água estão virados a sul, ambos apresentando uma área igual à $28,7\text{m}^2$. A espessura da parede de água é de aproximadamente $0,213\text{m}$, valor que se situa dentro dos modelos estabelecidos por D.R. Kosar e J.D. Balcomb de modo a parede coletora poder armazenar cerca de 920 KJ K^{-1} por m^2 de envidraçado. Estipularam que o edifício é de estrutura leve com pouca massa adicional. A Tabela 27 mostra os valores da condutância total da estrutura do edifício, incluindo o valor para o coeficiente de perda da infiltração ($(U.A)_{\text{infiltração}}$) e para o coeficiente de perda modificado ($(U.A)_{\text{modificado}}$).

Tabela 27: Valores de cada parâmetro

Tipo de superfície	Área (m ²)	Coeficiente de transmissão térmica, U (Wm ⁻² K ⁻¹)	U.A (W K ⁻¹)
Parede de água	28,7	1,87	53,8
Elementos opacos de fachada	102,8	0,397	40,8
Vãos envidraçados (N,E,O)	11,15	3,123	34,8
Cobertura exterior	160,5	0,284	45,6
Pavimento sobre o exterior	160,5	0,284	45,6
(U.A) _{infiltração}			58
Condutância total da estrutura do edifício (Excluindo U.A da parede de água)			225
(U.A) _{modificado} (Incluindo U.A da parede de água)			278,6

O coeficiente de perda da massa de armazenamento térmico, que neste caso é o da parede de água, só é contabilizado para efetuar o cálculo do SLR e do SHF. De modo a estimar o coeficiente de perda total do edifício, é necessário introduzir igualmente o coeficiente de perda da infiltração do edifício ((U.A)_{infiltração}), tal como foi referido na secção 4.3. Balcomb *et al.* assumiram que a razão do fluxo do ar volumétrico (RAV), para este caso, seria de $1,21 \cdot 10^3 \text{ W K}^{-1}$, valor padrão correspondente ao nível do mar, e supuseram que a mudança de ar por hora (MAH) seria de 0,5. Multiplicando pelo volume do edifício obtiveram um coeficiente de perda de infiltração ((U.A)_{infiltração}) de 58 W K^{-1} . O coeficiente de perda da massa térmica ((U.A)_{massa térmica}) apresenta um valor $53,8 \text{ W K}^{-1}$. O valor obtido para o coeficiente de perda modificado do edifício ((U.A)_{modificado}) é de 279 W K^{-1} , que corresponde a $24,1 \text{ MJ GD}^{-1}$. As temperaturas de ajuste mínimas e máximas, que foram implementadas, para esta experiência, foram respetivamente $18,3^\circ\text{C}$ e $23,3^\circ\text{C}$. Utilizando os valores calculados para graus dias (GD), a radiação solar horizontal e o parâmetro (Φ -D), usando o programa de simulador “PASSIM” de forma a determinar a energia auxiliar mensal, Balcomb *et al.* chegaram aos valores de SLR e SHF, mostrados na Tabela 28. A partir desta mesma configuração, Balcomb *et al.* efetuaram outras simulações no caso para a parede Trombe, para outras cidades norte-americanas e mundiais pelo que conseguiram obter boas correlações entre o SHF e o SLR, como se mostra na Figura 78.

Tabela 28: Valores do SHF e SLR, para o caso da estação de aquecimento, calculados por Balcomb *et al.*

Mês	GD	Radiação Solar			SLR	SHF	Energia Auxiliar (GJ)
		Horizontal (GJ m ²)	Φ-D	α _s			
Out.	251	0,468	47,1	0,790	3,15	0,972	0,10
Nov.	666	0,324	56,6	1,070	1,11	0,631	3,29
Dez.	939	0,284	61,1	1,220	0,79	0,474	7,14
Jan.	1051	0,317	59,4	1,162	0,75	0,450	7,74
Fev.	840	0,378	57	1,082	0,89	0,529	5,31
Mar.	719	0,540	40,8	0,635	1,02	0,592	3,94
Abr.	354	0,661	28,9	0,410	1,64	0,797	0,96
Mai.	124	0,742	19,4	0,293	3,76	0,992	0,01

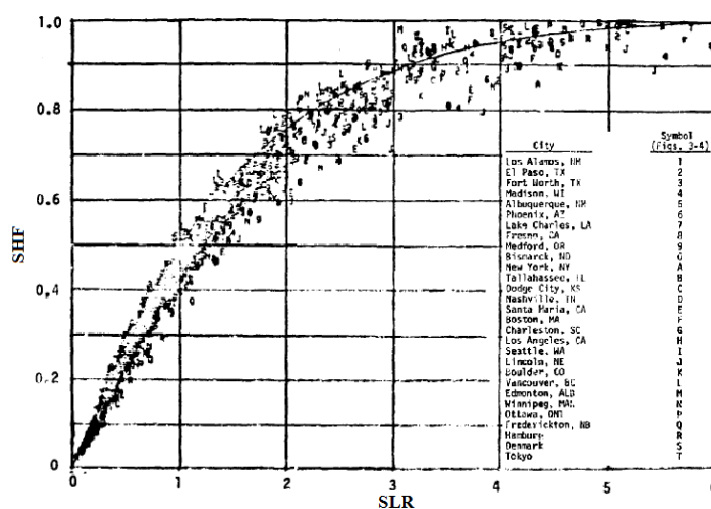


Figura 78: tirado do modelo de Balcomb *et al.* para algumas cidades norte-americanas e mundiais, através do programa, “PASSIM”.

A curva, representada na Figura 78, foi arranjada de forma a obter um erro para a fração solar anual. Essa curva é definida pelas relações entre SLR e SHF. Do mesmo modo, e de forma a poder obter correlações semelhantes, relativamente às simulações efetuadas através do programa “EnergyPlus”, usou-se o mesmo valor para a condutância total da estrutura do edifício e o mesmo valor do coeficiente de perda da infiltração (($U.A$)_{infiltração}) pelo que se adicionou um novo coeficiente de perda da massa de armazenamento térmico (($U.A$)_{massa térmica}) de 35,9 W K⁻¹. Este novo coeficiente corresponde à parede Trombe, com uma espessura de 0,45m e um coeficiente de condução ((U)_{massa térmica}) de 1,25 W m² K⁻¹, para a mesma área coletora, obtendo-se um novo coeficiente de perda modificado (($U.A$)_{modificado}) de 260,7 W K⁻¹. De salientar que foram implementadas as mesmas temperaturas de ajuste, mínima e máxima estabelecidas por Balcomb *et al.* As simulações foram efetuadas para algumas cidades norte-americanas e canadianas pelo que se obteve as correlações entre SHF e SLR e que se mostram na Figura 79.

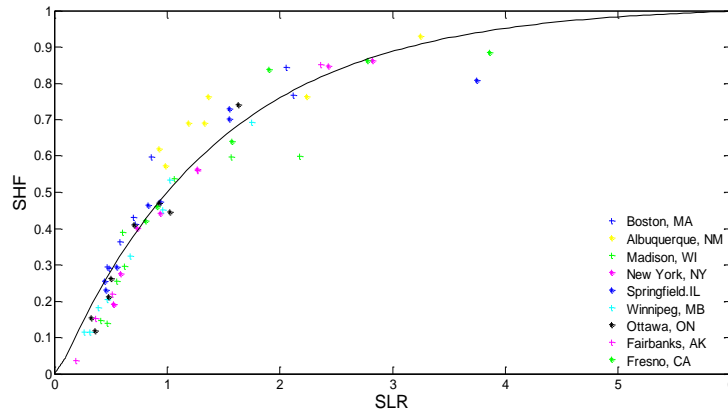


Figura 79: Simulação efetuada através do modelo de Balcomb *et al.* (Ganho indireto) para algumas cidades norte-americanas e canadianas, usando programa “EnergyPlus”. As temperaturas de ajuste, mínima e máxima, correspondem à 18.3°C e 23.3°C, respetivamente.

Sentiu-se alguma dificuldade em obter as mesmas correlações iguais às correlações obtidas por Balcomb *et al.*. A “EnergyPlus” fornece ficheiros climáticos para quase todas as cidades do globo, em que nalguns casos podem existir até mais que um ficheiro, isto devido aos dados meteorológicos terem sido recolhidos em mais do que um local da própria cidade. Verificou-se esta situação sobretudo para as cidades norte-americanas. A “EnergyPlus” sendo um programa de origem norte-americana é óbvio que dispõe de mais dados meteorológicos para cada cidade dos EUA. De modo a poder comparar os valores do calor auxiliar mensal, usaram-se todos os ficheiros disponíveis para as cidades norte-americanas e canadianas assinaladas na Figura 79. Verificou-se que os valores obtidos do calor auxiliar mensal, depois de ser ter efetuadas as simulações no “EnergyPlus” para cada ficheiro, divergem por vezes significativamente. Mostra-se um exemplo para a cidade de Boston, estado do Massachusetts, através da Tabela 29. Todos os ficheiros climáticos das cidades norte-americanas são apresentados com a designação de TMY (“Typical Meteorological Year”). Pode-se observar pela Tabela 29 que os valores do calor auxiliar mensal, para cada ficheiro climático, não diferem muito significativamente entre eles, para certos meses, mas no entanto acontece que os valores do calor auxiliar dos ficheiro climáticos (TMY 2) e (TMY 3) começam a divergir, sobretudo para os meses de Maio e Outubro, dos valores do calor auxiliar do ficheiro climático (TMY 1).

Tabela 29: Valores dos calores auxiliares para Boston

Mês	Q_{aux} (GJ) - TMY 1	Q_{aux} (GJ) - TMY 2	Q_{aux} (GJ) - TMY 3
Janeiro	10,14	9,61	11,03
Fevereiro	7,62	7,45	7,45
Março	7,13	6,18	5,59
Abril	3,08	2,88	2,59
Maio	1,59	0,67	0,55
Outubro	1,33	0,63	0,84
Novembro	4,83	4,88	4,18
Dezembro	10,23	8,31	7,65

Efetuar-se-iam mais simulações, do mesmo edifício solar passivo, para as 9 zonas climáticas onde se obtiveram as correlações, mostradas através da Figura 80. Dado que os ficheiros climáticos fornecidos pela “EnergyPlus” serem muito escassos para Portugal, recorreu-se ao Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação (INETI) de forma a obter alguns dados climáticos para as 9 zonas climáticas. Pode-se observar que as correlações não são tão satisfatórias comparativamente às correlações mostradas nas Figuras 78 e 79. Provavelmente, os dados dos ficheiros climáticos, fornecidos pela INETI, não são tanto melhores comparativamente aos ficheiros climáticos americanos da “EnergyPlus”.

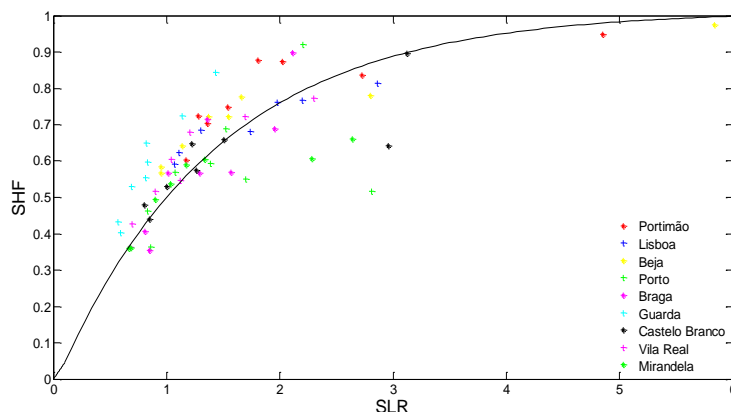


Figura 80: Simulação efetuada através do modelo de Balcomb *et al.* (Ganho indireto) para as 9 zonas climáticas, usando “EnergyPlus”. As temperaturas de ajuste, mínima e máxima, correspondem à 20°C e 25°C, respetivamente.

5.3.2 Modelo usando a “célula-de-teste”

Efetuar-se-iam outras simulações, relativamente à “célula-de-teste”, para as mesmas cidades, apresentadas através dos gráficos anteriores, em relação aos casos de ganho indireto (parede Trombe) e ganho direto. Usou-se uma condutância total da estrutura da “célula-de-teste” ($U.A$) de 225 W K^{-1} , semelhante ao usada por Balcomb *et al.* e um valor do coeficiente de perda da parede Trombe de 20 W K^{-1} que corresponde ao produto do coeficiente de condução ($(U.A)_{\text{massa térmica}}$) de $1,25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ com a área coletora (A_c) de 16 m^2 . Consequentemente obtém-se um valor do coeficiente de perda modificada ($(U.A)_{\text{modificado}}$) de 245 W K^{-1} . Os gráficos das Figura 81 até 84 mostram os resultados obtidos depois se ter efetuado as simulações e os cálculos necessários de maneira a poder estimar os valores do SLR e do SHF. A curva representa as relações entre o SHF e o SLR, ajustada para o sistema de ganho direto e indireto. Pode-se observar que os valores da fração solar (SHF), para a “célula-de-teste”, são um pouco mais elevados em relação aos valores da fração solar obtidos, para o modelo de Balcomb *et al.* Isto se deve ao facto da razão do vão envidraçado com o elemento de fachada virado a sul da “célula-de-teste” ser maior do que a razão do vão envidraçado com o elemento de fachada virado a sul do edifício solar passivo de Balcomb *et al.* Esta razão, mais conhecida pelas siglas anglo-saxónicas; WWR (“Window to Wall Ratio”), é dada pela seguinte expressão,

$$WWR = \frac{A_2}{A_1} \quad (\text{Eq. 4.54})$$

Dado que o parâmetro A_2 , em (m²), corresponde a área do vão envidraçado e o parâmetro A_1 , em (m²), corresponde a área do elemento da fachada, obtém-se uma razão de 92% para a célula de teste e uma razão de 60% para o edifício de Balcomb *et al.* Pode-se observar através das Figuras 81 até 84, melhores correlações entre o SLR e SHF para as cidades norte-americanas devido aos ficheiros climáticos americanos serem de melhor qualidade do que os ficheiros climáticos portugueses, tal como referido anteriormente. Pode-se averiguar, igualmente, que a fração solar para o caso do ganho indireto apresenta valores mais altos em relação a fração solar para o caso do ganho direto.

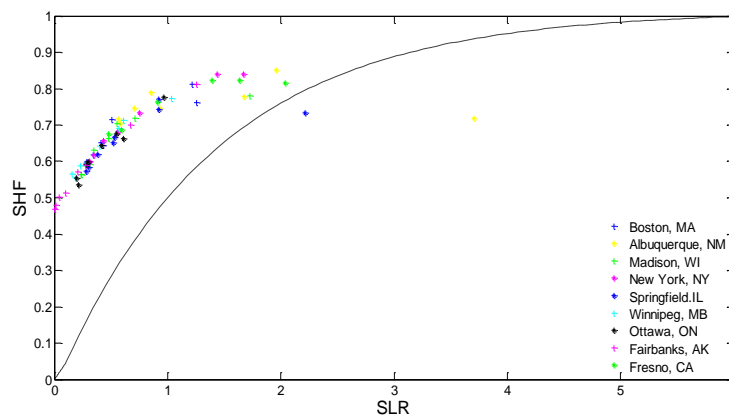


Figura 81: Simulação efetuada para a célula de teste (Ganho indireto) com dados de $(U.A)_{\text{modificado}}$ do modelo de Balcomb *et al.* para algumas cidades americanas, usando “EnergyPlus”. As temperaturas de ajuste, mínima e máxima, correspondem à 18.3°C e 23.3°C, respetivamente.

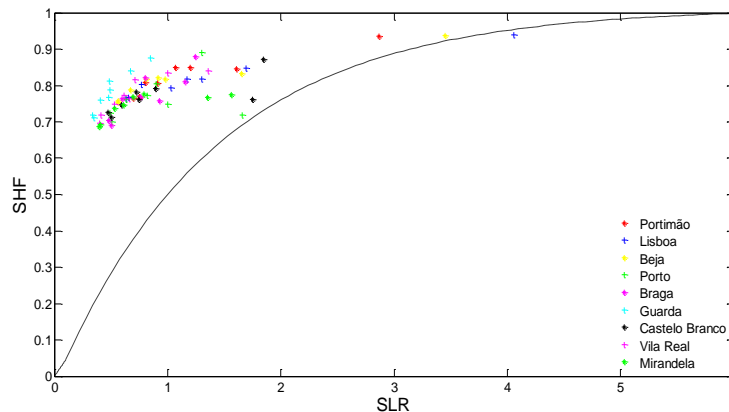


Figura 82: Simulação efetuada para a célula de teste (Ganho indireto) com os dados de $(U.A)_{\text{modificado}}$ de Balcomb *et al.* para as 9 zonas climáticas, usando o programa “EnergyPlus”. As temperaturas de ajuste, mínima e máxima, correspondem à 20°C e 25°C, respetivamente.

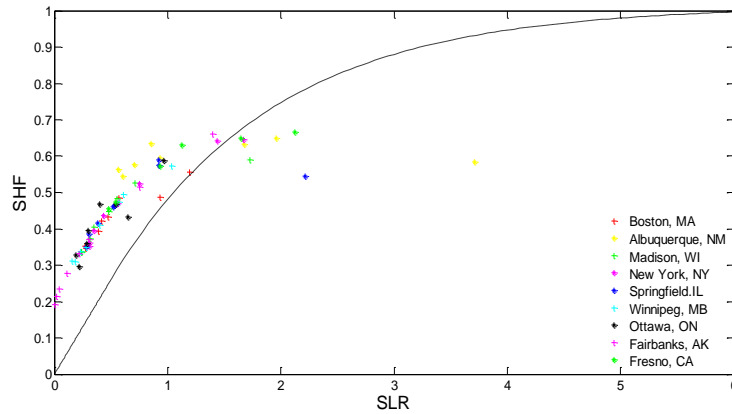


Figura 83: Simulação efetuada através do modelo da “célula-de-teste” (Ganho direto) com dados de $(U.A)_{\text{modificado}}$ do modelo de Balcomb *et al.* para algumas cidades americanas usando “EnergyPlus”. As temperaturas de ajuste, mínima e máxima, correspondem à 18.3°C e 23.3°C, respetivamente.

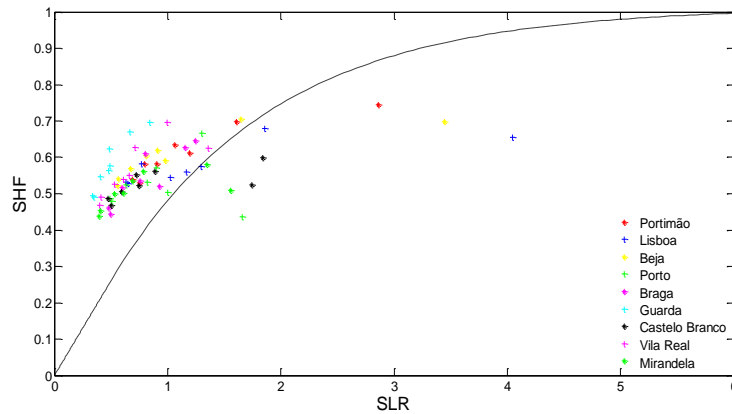


Figura 84: Simulação efetuada através da “célula-de-teste” (Ganho direto) com os dados de $(U.A)_{\text{modificado}}$ de Balcomb *et al.* para as 9 zonas climáticas, usando o programa “EnergyPlus”. As temperaturas de ajuste, mínima e máxima, correspondem à 20°C e 25°C, respetivamente.

5.3.3 Desempenho térmico

Após ter-se efetuado as simulações através do método de Taguchi, apresentam-se os resultados obtidos do desempenho térmico, para o período da estação de aquecimento, nos casos de ganho direto com PCMs e sem PCMs e nos casos de ganho indireto com PCMs e sem PCMs.

Tabela 30: Melhores resultados obtidos em cada um dos casos

Caso	$U.A (A_c)$ $W K^{-1}$ (m^2)	U_c $(W m^2 K^{-1})$	τ_n	α_s	T° de ajuste (°C)	Tipo de PCM	Zona Climática
Ganho indireto com PCM	161(16)	1	0,7	0,8	20	SP26	Portimão
Ganho indireto sem PCM	161(16)	1	0,7	0,8	20	-	Portimão
Ganho direto com PCM	161(16)	1	0,7	0,8	20	SP22	Portimão
Ganho direto sem PCM	161(16)	1	0,5	0,9	20	-	Portimão

Os resultados obtidos, que se mostram na Tabela 30, indicam que o coeficiente de perda do edifício ($U.A$), com a respetiva área do coletor (A_c), assim como a transmissão térmica (U_c) e a temperatura de ajuste (T° de ajuste), convém serem mínimos para todos os casos. A transmissividade (τ_n) do vão envidraçado deveria ter o valor máximo de 0,7 para todos os casos, a exceção do caso para o ganho direto sem PCMs que deveria apresentar uma transmissividade térmica de 0,5. Por sua vez, o coeficiente de absorção solar (α_s), da massa de armazenamento térmico deveria apresentar o valor mínimo de 0,8 para todos os casos a exceção do caso para o ganho direto sem PCMs que deveria possuir um coeficiente de absorção solar de 0,9. Isto indica que o coeficiente de absorção solar das massas de armazenamento térmico não tem que apresentar forçosamente um tom de cor muito escuro para absorver mais energia solar. Em relação aos casos que contêm PCMs, o método de Taguchi indica que o melhor PCM a utilizar para o caso de ganho indireto é o SP26 e o melhor PCM a utilizar para o caso de ganho direto é o SP22. A zona climática que apresenta maior vantagem, em termos de eficiência energética, é a zona climática de Portimão. Apesar do método de Taguchi indicar que a zona climática de Portimão é a que mostra, de facto, melhor desempenho térmico, os resultados, apresentados na Tabela 30, também podem ser adaptados para qualquer zona climática em estudo. As figuras, a seguir, mostram o consumo energético estimado para as 9 zonas climáticas para as configurações descritas nas secções 2.4.2 e 2.4.3. Pode-se observar nitidamente através destas figuras que o caso de ganho direto sem PCMs apresenta maior consumo energético em relação ao caso de ganho indireto sem PCMs, sendo que a zona climática da Guarda, do gráfico da Figura 88, apresenta maior gasto energético avaliado em 113 KWh m^2 . Pelo contrário, ao adicionar PCMs verifica-se que o caso de ganho direto apresenta melhores resultados, mas pouco significativos, em relação ao caso de ganho indireto, em que a zona climática que mostra menor consumo, relativamente ao caso de ganho direto, é a zona climática de Portimão que apresenta um consumo energético anual estimado em 30 KWh m^2 . Em termos percentuais, comparativamente aos casos com PCMs e sem PCMs, para todas as zonas climáticas, verifica-se que a adição de PCMs para o caso de ganho indireto resulta numa melhoria de poupança energética situado entre 4% e 12%, sendo o mínimo para a zona climática da Guarda, mostrada no gráfico da Figura 88, e o máximo para a zona climática de Portimão, mostrada no gráfico da Figura 85. Dado o custo dos PCMs ser relativamente elevado e que os desempenhos térmicos serem poucos significativos, em relação ao ganho indireto, e isto para todas as zonas climáticas, os resultados obtidos

pressupõem que não seria viável utilizar os PCMs para essas condições. Relativamente ao caso de ganho direto, verifica-se um consumo energético menos significativo quando são implementados PCMs. Os resultados mostram melhorias que se situam entre 24% e 46%, sendo o mínimo para a zona climática de Guarda e máxima para a zona climática de Portimão. Ao contrário do caso de ganho indireto, o uso de PCMs seria mais viável financeiramente em relação ao caso de ganho direto, sobretudo para as regiões situadas mais a sul de Portugal como nas zonas climáticas de Portimão, Beja e Lisboa.

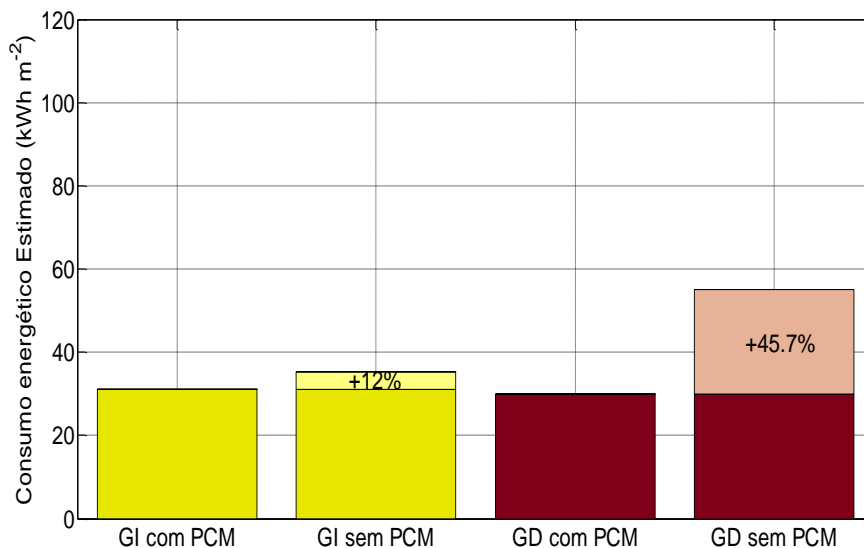


Figura 85. Gráfico do consumo energético estimado, para todos os casos, na zona climática de Portimão

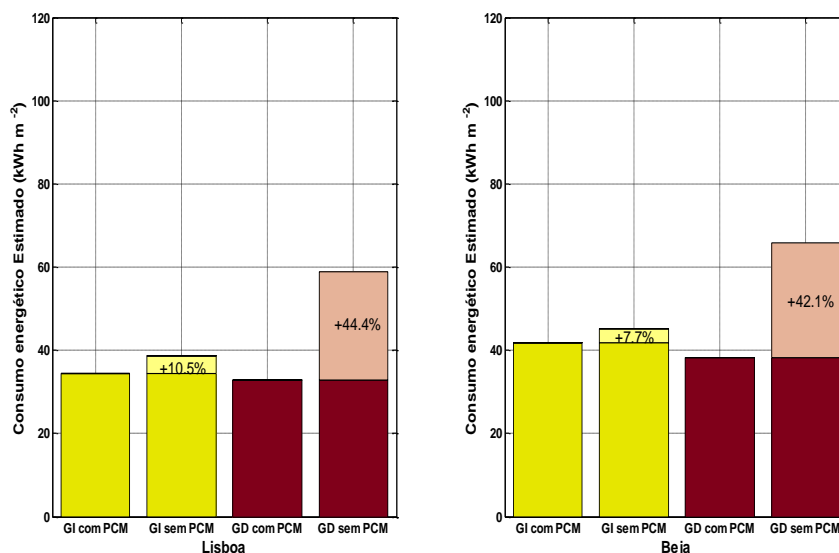


Figura 86: Gráfico do consumo energético estimado, para todos os casos, nas zonas climática de Lisboa e Beja

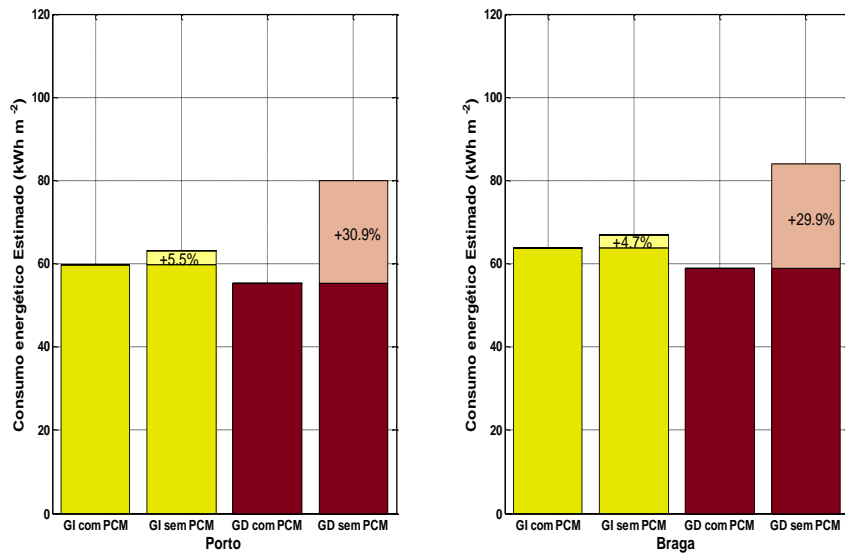


Figura 87: Gráfico do consumo energético estimado, para todos os casos, nas zonas climáticas de Porto e Braga

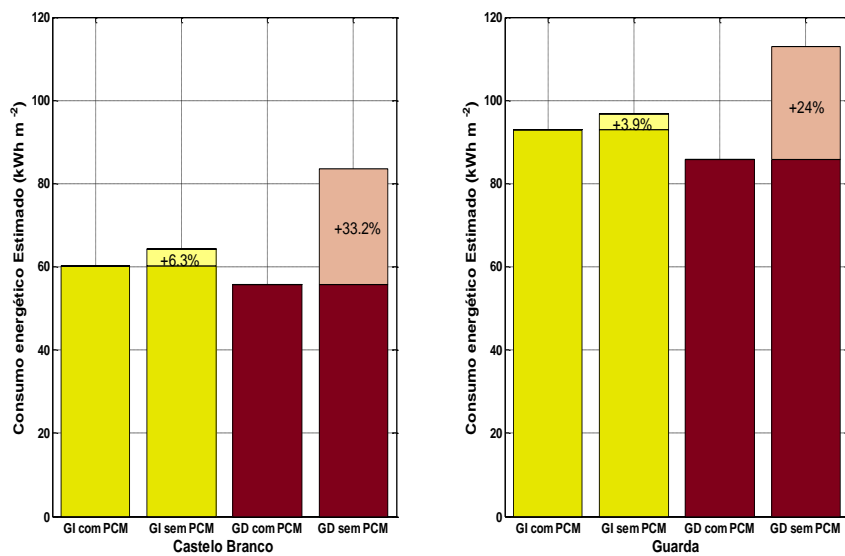


Figura 88: Gráfico do consumo energético estimado, para todos os casos, nas zonas climáticas de Castelo Branco e Guarda

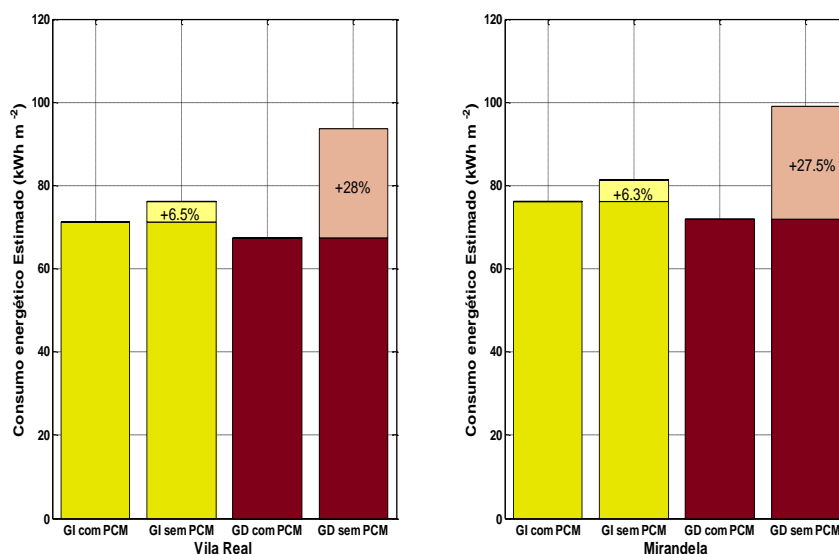


Figura 89: Gráfico do consumo energético estimado, para todos os casos, nas zonas climáticas de Vila Real e Mirandela

5.3.4 Fração solar anual (SHF_{anual})

De forma a poder calcular o SHF_{anual}, para cada zona climática, no que se refere à estação de aquecimento, foi necessário estimar a condutância total da estrutura do edifício, que segundo o método de Taguchi, é aquele que apresenta menor valor do coeficiente de perda (U.A), ou seja, 161 W.K⁻¹. Dada as dimensões deste edifício serem de 7x12,55x2,28m, obtiveram-se os valores para o coeficiente de perda para cada elemento construtivo. Estes valores são mostrados na Tabela 31. Para calcular o coeficiente de perda da infiltração ((U.A)_{infiltração}), introduziu-se um valor de mudança de ar por hora (MAH) de 0,95, valor idêntico ao da “célula-de-teste”. A condutância total da estrutura do edifício é de 214 W K⁻¹.

Tabela 31: Valor da condutância total da estrutura do edifício

Tipo de superfície	Área (m ²)	Coeficiente de transmissão térmica, U (W m ² K ⁻¹)	U.A (W K ⁻¹)
Elementos opacos de fachada	73,2	0,812	59,4
Cobertura exterior	87,9	0,426	37,5
Pavimento sobre o exterior	87,9	0,606	53,3
(U.A) _{infiltração}			63,8
Condutância total da estrutura do edifício			214

Os valores estimados do consumo energético, mostrados nos gráficos precedentes, foram utilizados para calcular o SHF_{anual} , pelas razões que se expuseram anteriormente. As figuras a seguir mostram o SHF_{anual} estimado para as 9 zonas climáticas, pelas mesmas condições descritas nas secções 2.4.2 e 2.4.3. Como era de esperar, obteve-se um SHF_{anual} mais elevado para o caso de ganho direto com PCMs, para as 9 zonas climáticas, sendo a zona de Portimão, a que apresenta o maior SHF_{anual} com 0,64, mostrado no gráfico da Figura 90. Em relação ao ganho indireto, a zona climática em que se verifica um maior SHF_{anual} atinge, segundo as estimativas; 0,63, e que representa portanto um valor um pouco mais baixo em relação ao valor de 0,64 para o caso do ganho direto. A zona climática que apresenta menor fração solar anual, e isto para todos os casos, é a zona climática de Mirandela, que se pode observar através do gráfico da Figura 94. Em termos percentuais, comparando o caso de ganho indireto com PCMs com o caso de ganho indireto sem PCMs, verifica-se uma maior descida do SHF_{anual} para a zona climática de Portimão, quando não são usados PCMs, apresentando uma queda da fração solar anual de 9,5%. A menor descida do SHF_{anual} verifica-se para a zona climática da Guarda com uma queda da fração solar anual de 4%, mostrado no gráfico da Figura 93. Comparando o caso de ganho direto com PCMs com o caso de ganho direto sem PCMs, verifica-se a maior descida do SHF_{anual} para a zona climática de Lisboa, mostrada no gráfico da Figura 91, quando não são usados PCMs, em que a fração solar anual diminui drasticamente para 51%. Examina-se que a zona climática da Guarda é a que regista menor queda em termos percentuais do SHF_{anual} , quando não são usados PCMs, com cerca de 28% a menos de fração solar anual.

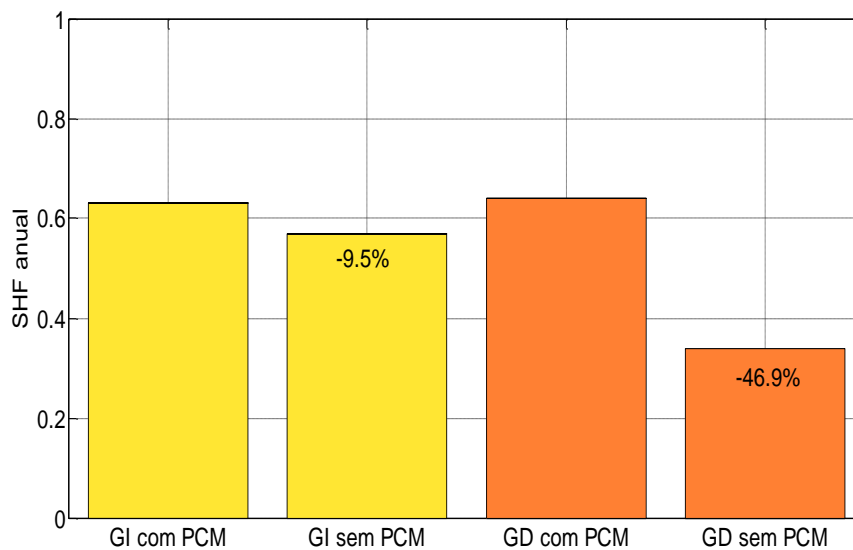


Figura 90: Gráfico da fração solar para todos os casos, na zona climática de Portimão

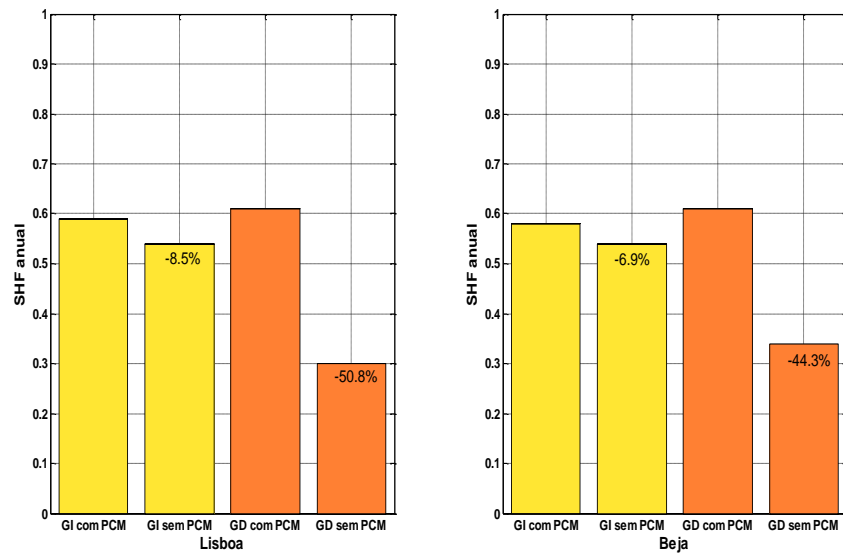


Figura 91: Gráfico da fração solar para todos os casos, nas zonas climáticas de Lisboa e Beja

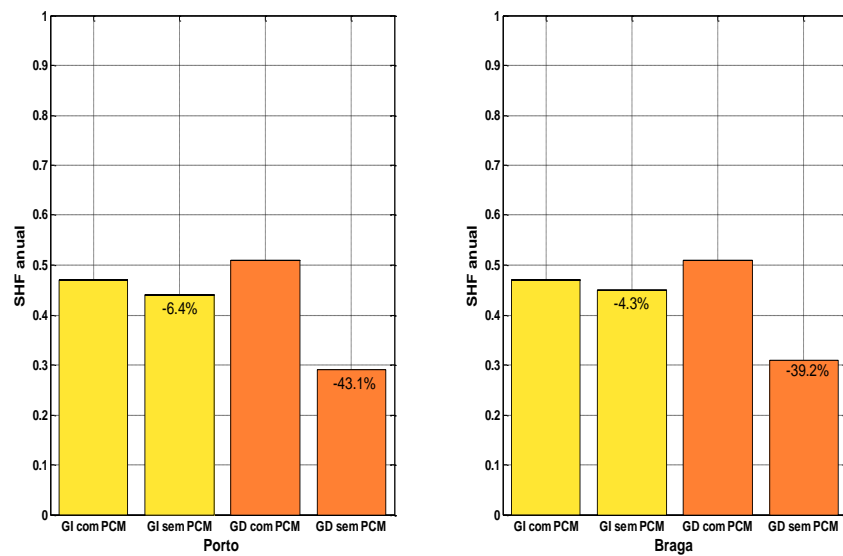


Figura 92: Gráfico da fração solar para todos os casos, nas zonas climáticas de Porto e Braga

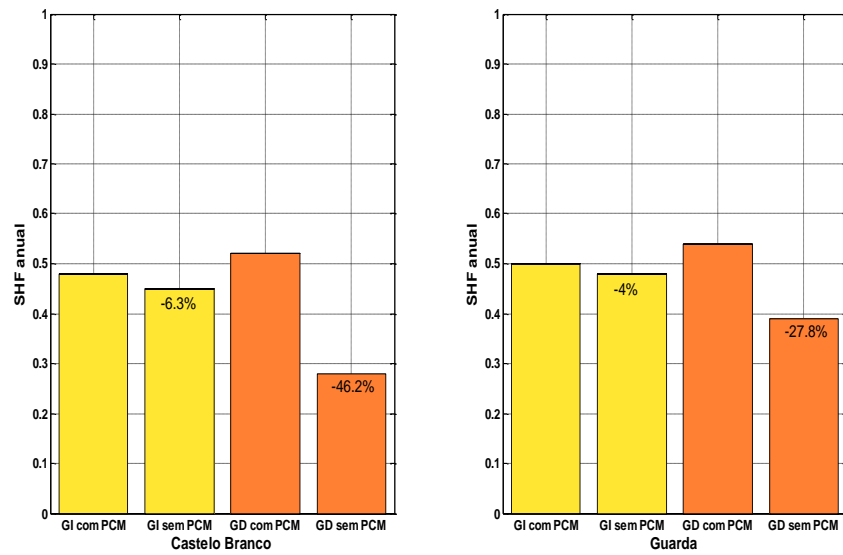


Figura 93: Gráfico da fração solar para todos os casos, nas zonas climáticas de Castelo Branco e Guarda

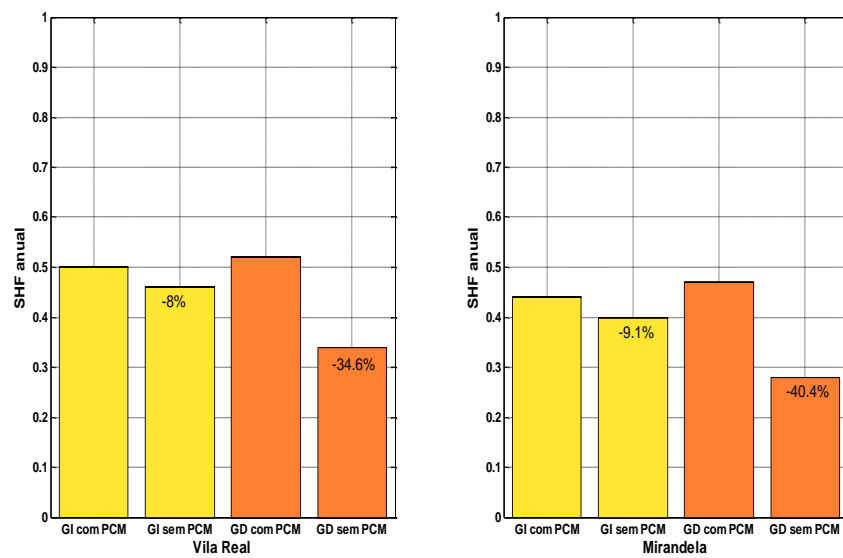


Figura 94: Gráfico da fração solar para todos os casos, na zona climática de Vila Real e Mirandela

6 CONCLUSÕES

Efetuararam-se várias pesquisas bibliográficas de modo a avaliar as diferentes zonas do país onde se pretende realizar os testes de acordo com as classificações climáticas, os tipos de PCMs, os vários métodos e os parâmetros fundamentais de forma a permitirem a realização dos ensaios.

Recorreu-se em alguns estudos que investigaram vários modelos de forma a poder estimar o desempenho térmico para sistemas de ganho direto e indireto.

Tem-se um exemplo de estudo realizado por D.R. Kosar que expõe alguns métodos de análise e de cálculos na previsão do desempenho térmico onde se incluem um plano de testes que visa efetuar simulações de forma rápida, recorrendo ao programa “PASSIM”. O presente trabalho persegue a mesma metodologia efetuado por D.R. Kosar em que se recorreu igualmente a um plano de testes, designado por método de Taguchi, com auxílio de um programa de simulação, “EnergyPlus”. O método de Taguchi tem como finalidade em efetuar testes, igualmente, de forma rápida alcançando, no final, bons resultados.

Outra pesquisa foi direcionada no propósito de avaliar o desempenho térmico em edifícios solares passivos. Balcomb *et al.* geraram alguns métodos, que permitem calcular o desempenho térmico de uma forma muito mais simples, entre os quais; a razão do coletor solar (LCR) que permite estimar a fração solar anual (SHF_{anual}) e a razão de carga solar (SLR) que permite estimar a fração solar mensal (SHF). Os resultados do método LCR apresentam uma menor margem de erro de 3% em relação ao método SLR.

De maneira a poder utilizar corretamente o programa de simulação “EnergyPlus” recorreu-se a um estudo, realizado por Balcomb *et al.*, que pretendeu dar um exemplo na avaliação dos métodos expostos anteriormente, usando o programa “PASSIM”. Os resultados das simulações, efetuados no “EnergyPlus”, mostraram boas correlações semelhantes aos obtidos por Balcomb *et al.*, para as cidades norte-americanas e canadianas. Contudo, as simulações efetuadas, recorrendo aos ficheiros climáticos com base em dados meteorológicos nacionais, não foram tão notáveis. Deduziu-se que a qualidade destes ficheiros não é tão excelente comparada a qualidade dos ficheiros americanos da “EnergyPlus”.

Relativamente, aos resultados obtidos das simulações, em que se usou o método de Taguchi, conclui-se que a zona climática de Portimão é a zona mais apropriada no intuito de reduzir ainda mais os gastos energéticos. Verifica-se, ainda, que os resultados obtidos podem ser dirigidos para as outras zonas climáticas. Os testes efetuados indicam que o coeficiente de perda do edifício ($U.A$) com a respetiva área do coletor (A_c) assim como a transmissão térmica (U_c) e a temperatura de ajuste (T^o de ajuste) convém serem mínimos para todos os casos. A transmissividade (τ_n) do vão envidraçado deveria ter o valor máximo para todos os casos, a exceção do caso para o ganho direto sem PCMs. O coeficiente de absorção solar (α_s) da massa de armazenamento térmico, não tem que ser forçosamente elevado para a maioria dos casos, à exceção do ganho direto sem PCMs. Os PCMs SP22 e SP26, da empresa Rubitherm, contribuíram para reduzir ainda mais os gastos energéticos.

Os gráficos dos consumos energéticos estimados, indicam que o caso de ganho indireto sem PCMs, para todas as zonas climáticas, permite efetuar mais poupança energética em relação ao caso do ganho direto sem PCMs. A zona climática de Portimão é a zona onde se consome menos energia com cerca de 30 KWh m² enquanto a zona climática da Guarda é a zona onde se consome mais energia com cerca de 113 KWh m². Antes pelo contrário, observa-se maior poupança energética para o caso de ganho direto com PCMs, de acordo com as condições das secções 2.4.2 e 2.4.3. Verifica-se que a adição de PCMs em edifícios de ganho direto nas zonas climáticas de Portimão, Lisboa e Beja, pode constituir uma mais-valia, com os resultados a variar entre os 40% e 50% de economia de energia.

Os gráficos das frações solares anuais (SHF_{anual}) mostram aquilo que já se expectava; maiores frações solares para as zonas climáticas que obtiveram melhores economias de energia e maiores frações solares para o caso do ganho direto com PCMs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGEDEN - Réhabilitation Thermique de l'Habitat Existant. [em linha]. [Consult. out. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.info-energie-paysdelaloire.fr/docs/Renovation/Rehabilitation-thermique.pdf>>.
- AGENCIA PARA A ENERGIA (ADENE) - Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE). [em linha]. [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.adene.pt/pt-pt/pnaee/paginas/pnaee.aspx>>.
- ARAÚJO, A. (2010). “Armazenamento de calor latente”. Aula teórica de Transporte e Armazenamento de Energia, Departamento de Mecânica, Universidade de Aveiro.
- ATHIENITIS, A.K., CHEN, Y. (2000). “The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems”. *Solar Energy*, 69, pp. 229-237.
- AUTODESK - Trombe Wall and Attached Sunspace. [em linha]. [Consult. mai. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/fundamentals/trombe-wall-and-attached-sunspace>>.
- BAJARE, D., KAZJONOV, J., KORJAKINS, A. (2011). “The thermal characteristics of gypsum boards with phase change materials (PCM)” –ISSN 1691-5402.
- BALCOMB, J.D. (1992). “Passive Solar Buildings”. Massachusetts Institute of Technology (MIT).
- BALCOMB, J.D., McFARLAND, R.D. (1978). “A simple empirical method for estimating the performance of a passive solar heated building of the thermal storage”. In: *Proceedings of second national passive solar conference*, Philadelphia, PA.
- BASF – Micronal PCM. [em linha]. Alemanha: BASF SE. [Consult. mar. 2012]. Disponível na Internet em: <http://www.micronal.de/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_290798>.
- BIO-MAG - Architecture bioclimatique: L’habitat solaire passif. [em linha]. [Consult. set. 2012]. França: Redjuice.fr Disponível na Internet em: <<http://www.bio-mag.fr/dossiers-150.html>>.
- BUILDING MODERN AND GREEN - Solar Design – Passive Solar Heating. [em linha]. [Consult. abr. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.greeninmedusa.com/blog/2007/09/solar-design---.html>>.
- CABEZA, L.F., *et al.* (2011). “Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 1675-1695.
- CAMELO, Susana *et al.* (2006). “Manual de apoio à aplicação do RCCTE”. INETI, Lisboa.
- CENTER BLOG - Le parc de Samara – Somme. [em linha]. [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://lusile17.centerblog.net/rub-le-parc-de-samara-somme--9.html?ii=1#>>.

- CERÓN, Isabel, NEILA, Javier, KHAYET, Mohamed (2011). “Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use”. *Energy and Buildings*, 43, pp. 1869-1874.
- CHAUVEAU, Jean-Claude, CHASSAING, Jean-Paul (2012 ?). “Introduction à la méthode des plans d’expériences par la méthode Taguchi”. C.N.E.D. Génie Electrotechnique, Compléments au cours d’asservissement.
- CLIMATOR - ClimSel C32. [em linha]. [Consult. abr 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.climator.com/files/products/climsel-c32.pdf>>.
- COELHO, M. (2010). “Impactos Ambientais da Energia”. Aula teórica de Energia, Mobilidade e Transporte, Departamento de Mecânica, Universidade de Aveiro.
- CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA - Conclusões da presidência. [em linha]., [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://register.consilium.europa.eu/pdf/pt/08/st17/st17271-re01.pt08.pdf>>.
- CREATIVE HOME IDEA - Karawitz Architecture Re-Creates a Unique Home Design Passive House [em linha]. E.U.A.: DMCA. [Consult. abr. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://creativehomeidea.com/karawitz-architecture-re-creates-a-unique-home-design-passive-house/>>.
- DELGADO, M. *et al.* (2012). “Review on phase change materials emulsions and microencapsulated phase change material slurries: Materials, heat transfer studies and applications”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 253-273.
- DIÁRIO DE NOTÍCIAS (D.N.) - Mês de abril foi “o mais frio do século” em Portugal continental. [em linha]. Portugal: Controlinveste. [Consult. set. 2012]. Disponível na Internet em: <http://www.dn.pt/inicio/portugal/interior.aspx?content_id=2508444>.
- DIREÇÃO-GERAL DE ENERGIA E GEOLOGIA e INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA - Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010. Estatísticas oficiais [em linha]. Ed. 2011[Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <http://www.ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=127228533&att_display=n&att_download=y>. ISSN 2183-0139
- DIECKMANN, H. (2006?). “Latent heat storage in concrete”. University of Kaiserslautern, Germany.
- DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A. (2006). “Solar Engineering of Thermal Process”. 3rd Edition, JOHN WILEY & SONS, INC.
- ENERGUIA (2010). “Guia de Eficiência Energética nos Edifícios”. 4^a Edição, Construção Magazine.
- ENERGYPLUS (2011). “Getting Started with EnergyPlus; Basic Concepts Manual – Essential Information You Need about Running EnergyPlus”. The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regents of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

EUROPEAN COMMISSION - The EU Climate and Energy Package. [em linha]. [Consult. set. 2012]. Disponível na Internet em: <http://ec.europa.eu/clima/policies/package/index_en.htm>.

EUROPEAN INVESTMENT BANK - Maximising investment in sustainable energy. [em linha]. [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <http://www.eib.org/attachments/documents/vn_gaia_project_factsheet_en.pdf>.

EPSEA.ORG - Passive Solar Design. [em linha]. [Consult. abr. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.epsea.org/mass.html>>.

EUR-LEX L'accès au droit de l'Union Européenne. [em linha]. [Consult. mai. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32010L0031:FR:NOT>>.

EVERS, A.C. (1989). "Development of a quantitative measure of the functionality of frame walls enhanced with phase change materials using a dynamic wall Simulator". B.S. M.E, Wichita State University, Wichita, Kansas.

EXPRESSO - Mês de maio foi o mais quente desde 1931. [em linha]. Portugal: Imprensa Publishing S.A. [Consult. set. 2012] Disponível na Internet em: <<http://expresso.sapo.pt/mes-de-maio-foi-o-mais-quente-desde-1931=f654276>>.

EXTENSION - Passive Solar Heating for Homes. [em linha]. [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.extension.org/pages/30863/passive-solar-heating-for-homes>>.

FOSTER, Will, GOSKAR, Tom. Reconstruction of the Neolithic house at Horton. [em linha]. Reino Unido: Wessex Archaeology. [Consult. Jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.wessexarch.co.uk/images/news-blog/reconstruction-neolithic-house-horton-will-foster-and-tom-goskar>>.

GONÇALVES, H., GRAÇA, J.M. (2004). "Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal". INETI, Lisboa.

HADORN, J.C. (2004). "Storage solutions for solar thermal energy". Swiss Federal Office of Energy.

HOFF, T.R. (2010). "Roma – Cidade, Arquitetura, Arte e Cultura". Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC). São Miguel do Oeste, Brasil.

HUANG, M.J., EAMES, P.C., HEWITT, N.J. (2006). "The application of a validated numerical model to predict the energy conservation potential of using phase change materials in the fabric of a building". Solar Energy Materials & Solar Cells, 90, pp. 1951-1960.

IDEES MAISON – Auvent. [em linha]. [Consult. set. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.ideesmaison.com/Maison-ecolo/Materiaux-et-equipements/Calculer-l-angle-de-son-auvent/Comment-ca-marche.html>>.

IMMOBILIER MODE D'EMPLOI - Bbc et Bepos : L'Habitat Nouvelle Génération. [em linha]. Toulouse (França) : Les Editions Immobilières du Sud [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://immobiliermodedemploi.fr/dossiers/bbc-et-bepos-l-habitat-nouvelle-generation/>>.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA - População residente (Nº) por local de residência e Sexo”. [em linha]. [Consult. 20 nov. 2012]. Decenal. Disponível na Internet em: <http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0005889&selTab=tab0>.

IZQUIERDO-BARRIENTOS, M.A. *et al.* (2012). “A numerical study of external buildings walls containing phase change materials (PCM)”. *Applied Thermal Engineering*, 47, pp. 73-85.

JORNAL OFICIAL DA U.E. (2010). “Diretiva 2010/31/EU DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 19 de maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)”, L 153, pp. 1-23.

JR'S BLOG - Solar Site Analysis. [em linha]. E.U.A.: WordPress [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://different.sun.net/>>.

KARA, Yusuf Ali, KURNUÇ, Aslihan (2012). “Performance of coupled novel triple glass and phase change material wall in the heating season: An experimental study”. *Solar Energy*.

KOSAR, D.R. (1981). “Performance Prediction of Passive Solar Heating Systems”. M.S. thesis, Dept. of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign.

LENZING - Products: Sulfate Sodium. [em linha]. [Consult. dez. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.lenzing.com/en/co-products/products/sodium-sulfate.html>>.

MALDONADO, Pablo Arce (2011). “Application of passive thermal energy storage in buildings using PCM and awnings”. University of Lleida, Spain.

MANAGENERGY - European Local Energy Assistance (ELENA). [em linha]. [Consult. set. 2012]. Disponível na Internet em: <http://www.managenergy.net/meta_informations/581>.

MARTINERGE - 1 Bilião de Euros para projetos de eficiência energética e renováveis. [em linha]. [Consult. set. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.martinerge.com/news>>.

MORE INSPIRATION (M.I.) - Phase change material Micronal PCM. [em linha]. Bélgica: CREAX [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.moreinspiration.com/article/3240-phase-change-material-micronal-pcm>>.

NATIONAL GALLERY OF ART - Pompeii and the Roman Villa [em linha]. Washington D.C. (E.U.A.): National Gallery of Art [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <http://www.nga.gov/exhibitions/2008/pompeii/villa_houses.shtm>.

- OBITAYO, O.A. (2011). "Simulation and analysis of phase change materials for building temperature control". University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom.
- PASUPATHY, A., VELRAJ, R. (2008). "Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management". *Energy and Buildings*, 40, pp. 193-203.
- PHASE CHANGE MATERIALS (P.C.M.) - Team enCORE installs savEnrgtm PCM Plenum to store heat generated from the solar thermal hot air collectors. [em linha]. E.U.A.: RGEES, LLC. [consult. set. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://phasechangematerials.blogspot.pt/2011/08/team-encore-installs-savenrg-pcm-plenum.html>>.
- PASSIVE HOUSE INSTITUTE US (PHIUS) - What is a passive house? [em linha]. [consult. dez. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.passivehouse.us/passiveHouse/PassiveHouseInfo.html>>.
- REGULAMENTO DAS CARACTERÍSTICAS DE COMPORTAMENTO TÉRMICO DOS EDIFÍCIOS (2006). "Diário da República. I Série-A", nº67, pp. 2468-2513.
- REINHART, N. - Fashioning a greenhouse. [em linha]. E.U.A.: Blogger. [Consult. set. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://greenhousefashions.blogspot.pt/>>.
- RENOUVEAU THERMIQUE - Habitat Marseillais du Néolithique. [em linha] França: Intrasite Développement. [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.renouveau-thermique.fr/histoires-des-hommes-et-du-climat-5-19-64?PHPSESSID=0b3ea0b4a99783c6ce9872941b48bf05>>.
- RGEES - Technical Data Sheet, PCM 29P. [em linha]. [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <http://rgees.com/documents/savENRG_PCM_29P.pdf>.
- RIMSTAR - Solar site survey-shading issues [em linha]. E.U.A.: Steven Dufresne. [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <http://rimstar.org/renewnrg/solar_site_survey_shading_location.htm>.
- RUBITHERM - Inovative PCM's and thermal technologie. [em linha]. [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.rubitherm.de/english/index.htm>>.
- SAADATIAN, Omidreza *et al.* (2012). "Trombe walls: A review of opportunities and challenges in research and development". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 6340-6351.
- SAINT-GOBAIN (2012). "Glass", Calumen II 1.2.3, Saint-Gobain.
- SALUNKHE, P.B., SHEMBEKAR, P.S. (2012). "A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp. 5603-5616.
- SAMAGAIO, A. (2011). "Protocolo de Quioto; Perguntas e Respostas". Aula teórica de Energia e Ambiente, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.
- SANSANA, J. (2004). "Avaliação do Comportamento Térmico de um Edifício". Projeto final de curso, Universidade de Aveiro.

- SCHMIDT, D. (2007). “Low Exergy Trends”. In: IEA Future Buildings Forum Think Tank, Helsinki, Finland.
- SCHOSSIG, Peter, HAUSSMANN, Thomas, GSCHWANDER, Stefan (2006). “Microencapsulated Phase Change Materials as a Cold Storage”. In: Ecostock, Richard Stockton College, USA.
- SHARMA, N.K., CUDNEY, E.A. (2011). “Signal-to-Noise ratio and design complexity based on Unified Loss Function – LTB case with Finite Target”. International Journal of Engineering, Science and Technology, 3, pp. 15-24.
- SIMPLE ENERGY WORKS - Will my roof work for a PV solar system? [em linha]. E.U.A.: ABC Business Consulting. [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.simpleenergyworks.com/will-my-roof-work-for-a-pv-solar-system-4.html>>.
- SOLAR PATHFINDER - How the Pathfinder Works? [em linha]. E.U.A.: Perusion. [Consult jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.solarpathfinder.com/PF>>.
- SOLAR RADIATION MONITORING LABORATORY - Sun path chart program. [em linha]. [Consult. set. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html>>.
- STUDYBLUE - Art History 105 Identification. [em linha]. New York (E.U.A.): STUDYBLUE INC. [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.studyblue.com/notes/n/art-history-105-identification/deck/185770>>.
- TECHNOMC - De l’architecture bioclimatique de la Grèce antique au vitrage romain [em linha]. [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://www.technomc.info/Architecture%20bio%20climatique/archi%20bio%20grec.htm>>.
- TEKES - PCM (Phase Change Materials) (Super Sustainable City). [em linha]. [Consult. set. 2012]. Disponível na Internet em: <https://tekes.dicole.net/blogs/show/482/0/14727/PCM_%2528Phase_Changing_Materials%2529_%2528Super_Sustainable_City%2529>.
- TROMBE, F. (1989). “Energies thermiques solaires et terrestres”. Encyclopaedia Universalis France S.A., Corpus 8, pp. 312-314.
- UNIVERSITY OF UTAH, GRADUATE SCHOOL OF ARCHITECTURE - Project 2006 – Sweet Caroline. [em linha]. [Consult. dez. 2012]. Disponível na Internet em: <http://www.arch.utah.edu/?school_of_architecture%3Edesignbuildbluff%3Eproject_2006_sweet_caroline>.
- WHAT-WHEN-HOW - First farmers of Europe (transition to agriculture (7000-4000 B.C.) [em linha]. [Consult. jun. 2012]. Disponível na Internet em: <<http://what-when-how.com/ancient-europe/first-farmers-of-europe-transition-to-agriculture-70004000-b-c/>>.

ANEXOS – FICHEIROS DO “ENERGYPLUS”

Foram inseridos, no programa “EnergyPlus”, os dados necessários para poder efetuar as simulações. Apresentam-se alguns exemplos, através das Figuras 1.1 até 1.15.

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIAL =====
!
! *****
! *****
! *****
! ***** BLOCO PARA ALTERAÇÃO DE MATERIAIS E SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS *****
! *****
! *****
! ***** INÍCIO *****
! *****
! *****
! *****
! *****
! ***** ISOLAMENTOS *****
!
!
Material,
0017 - PUR 40mm,           !- Name
VeryRough,                !- Roughness
0.040,                    !- Thickness {m}
0.037,                    !- Conductivity {w/m-K}
42.5,                     !- Density {kg/m3}
1590,                     !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,                      !- Thermal Absorptance
0.6,                      !- Solar Absorptance
0.6;                      !- visible Absorptance
    
```

Figura 1. 1: Exemplo para os dados inseridos relativamente as propriedades do isolante, PUR

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIAL =====
!
! *****
! *****
! *****
! ***** BLOCO PARA ALTERAÇÃO DE MATERIAIS E SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS *****
! *****
! *****
! ***** INÍCIO *****
! *****
! *****
! *****
! *****
! ***** ISOLAMENTOS *****
!
!
Material,
0014a - XPS 40mm,         !- Name
Rough,                   !- Roughness
0.040,                   !- Thickness {m}
0.037,                   !- Conductivity {w/m-K}
32.5,                    !- Density {kg/m3}
1400,                    !- Specific Heat {J/kg-K}
0.9,                     !- Thermal Absorptance
0.6,                     !- Solar Absorptance
0.6;                     !- visible Absorptance
    
```

Figura 1. 2: Exemplo para os dados inseridos relativamente as propriedades para o isolante, XPS

```

! ***** METAIS *****
Material,
1201 - Aço 1mm,           !- Name
VerySmooth,             !- Roughness
0.001,                  !- Thickness {m}
50,                     !- Conductivity {w/m-K}
7800,                   !- Density {kg/m3}
450,                    !- Specific Heat {J/kg-K}
0.3,                    !- Thermal Absorptance
0.2,                    !- Solar Absorptance
0.2;                     !- Visible Absorptance

```

Figura 1. 3: Exemplo para os dados inseridos relativamente as propriedades para o aço

```

! ***** BETÕES *****
Material,
0305a - Betão armado 150mm Escuro, !- Name
Rough,                    !- Roughness
0.150,                    !- Thickness {m}
1.73,                     !- Conductivity {w/m-K}
2010,                     !- Density {kg/m3}
1000,                     !- Specific Heat {J/kg-K}
0.98,                     !- Thermal Absorptance
0.98,                     !- Solar Absorptance
0.98;                     !- Visible Absorptance

```

Figura 1. 4: Propriedade do betão no caso para ganho direto com PCMs e sem PCMs

```

! ***** BETÕES *****
Material,
0305a - Betão armado 450mm Escuro, !- Name
Rough,                    !- Roughness
0.450,                    !- Thickness {m}
1.73,                     !- Conductivity {w/m-K}
2010,                     !- Density {kg/m3}
1000,                     !- Specific Heat {J/kg-K}
0.98,                     !- Thermal Absorptance
0.98,                     !- Solar Absorptance
0.98;                     !- Visible Absorptance

```

Figura 1. 5: Propriedade do betão no caso para ganho indireto com PCMs e sem PCMs


```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: CONSTRUCTION =====
! Name
Construction,
  VOP1,                !- Name
  1201 - Aço 1mm,      !- Outside Layer
  0017 - PUR 40mm,     !- Layer 2
  1201 - Aço 1mm;     !- Layer 3

! Name
Construction,
  ENV1,                !- Name
  Vidro Duplo 5+12+5; !- Outside Layer

! Name
Construction,
  PDE1,                !- Name
  1201 - Aço 1mm,      !- Outside Layer
  0017 - PUR 40mm,     !- Layer 2
  1201 - Aço 1mm;     !- Layer 3

! Name
Construction,
  PVE1,                !- Name
  0714 - Contraplacado 5mm, !- Outside Layer
  0014a - XPS 40mm,       !- Layer 2
  0714 - Contraplacado 5mm, !- Layer 3
  1715a - CxArNVentVDes 40mm, !- Layer 4
  1201 - Aço 1mm,         !- Layer 5
  0813 - Fenólico 18mm,   !- Layer 6
  0804 - PVC 2.6mm;       !- Layer 7

! Name
Construction,
  CEB1,                !- Name
  1201 - Aço 0.6mm,     !- Outside Layer
  1709 - CxArNVentVAsc 15-300mm, !- Layer 2
  1201 - Aço 1mm,       !- Layer 3
  0005c - Mw 80mm,      !- Layer 4
  1201 - Aço 1mm;       !- Layer 5

! Name
Construction,
  CBE2,                !- Name
  Cobertura Vegetal,   !- Outside Layer
  1201 - Aço 0.6mm,     !- Layer 2
  1709 - CxArNVentVAsc 15-300mm, !- Layer 3
  1201 - Aço 1mm,       !- Layer 4
  0005c - Mw 80mm,      !- Layer 5
  1201 - Aço 1mm;       !- Layer 6

! Name
Construction,
  PDI1,                !- Name
  1201 - Aço 1mm,      !- Outside Layer
  0017 - PUR 40mm,     !- Layer 2
  1201 - Aço 1mm;     !- Layer 3

Construction,
  PDI2,                !- Name
  0305a - Betão armado 450mm Escuro; !- Outside Layer

```

Figura 1. 6: Exemplo para o sistema de ganho indireto sem PCMs

```

Material,
  Rubitherm SP22,           !- Name
  Rough,                   !- Roughness
  0.020,                   !- Thickness {m}
  0.6,                     !- Conductivity {w/m-K}
  1460,                    !- Density {kg/m3}
  1500,                    !- Specific Heat {J/kg-K}
  0.9,                     !- Thermal Absorptance
  0.6,                     !- Solar Absorptance
  0.6;                     !- Visible Absorptance

```

Figura 1. 7: Propriedades do PCM, SP22

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIALPROPERTY:PHASECHANGE =====

MaterialProperty:Phasechange,
  Rubitherm SP22,         !- Name
                          !- Temperature Coefficient for Thermal Conductivity {w/m-K2}
  17,                    !- Temperature 1 {C}
  7000,                  !- Enthalpy 1 {J/kg}
  18,                    !- Temperature 2 {C}
  6000,                  !- Enthalpy 2 {J/kg}
  19,                    !- Temperature 3 {C}
  6000,                  !- Enthalpy 3 {J/kg}
  20,                    !- Temperature 4 {C}
  7000,                  !- Enthalpy 4 {J/kg}
  20.5,                  !- Temperature 5 {C}
  8500,                  !- Enthalpy 5 {J/kg}
  21,                    !- Temperature 6 {C}
  10000,                 !- Enthalpy 6 {J/kg}
  21.5,                  !- Temperature 7 {C}
  12500,                 !- Enthalpy 7 {J/kg}
  22,                    !- Temperature 8 {C}
  15000,                 !- Enthalpy 8 {J/kg}
  22.5,                  !- Temperature 9 {C}
  35000,                 !- Enthalpy 9 {J/kg}
  23,                    !- Temperature 10 {C}
  55000,                 !- Enthalpy 10 {J/kg}
  23.5,                  !- Temperature 11 {C}
  40000,                 !- Enthalpy 11 {J/kg}
  24,                    !- Temperature 12 {C}
  25000,                 !- Enthalpy 12 {J/kg}
  24.5,                  !- Temperature 13 {C}
  15500,                 !- Enthalpy 13 {J/kg}
  25,                    !- Temperature 14 {C}
  6000,                  !- Enthalpy 14 {J/kg}
  26,                    !- Temperature 15 {C}
  7000,                  !- Enthalpy 15 {J/kg}
  27,                    !- Temperature 16 {C}
  7000;                  !- Enthalpy 16 {J/kg}

```

Figura 1. 8: Propriedades do PCM, SP22: Dados da entalpia e da temperatura

```

Construction,
  PDI2,                  !- Name
  0305a - Betão armado 215mm Escuro, !- Outside Layer
  Rubitherm SP22,       !- Layer 2
  0305a - Betão armado 215mm Escuro; !- Layer 3

```

Figura 1. 9: Exemplo para o sistema de ganho indireto com PCM, SP22


```

BuildingSurface:Detailed,
  PVE1_ZN2.1,      !- Name
  Floor,          !- Surface Type
  PVE1,           !- Construction Name
  ZN2.1,         !- Zone Name
  Outdoors,      !- Outside Boundary Condition
  ,              !- Outside Boundary Condition object
  NoSun,         !- Sun Exposure
  Nowind,        !- Wind Exposure
  ,              !- View Factor to Ground
  ,              !- Number of Vertices
  0,             !- Vertex 1 X-coordinate {m}
  0,             !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
  0,             !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
  3.5,          !- Vertex 2 X-coordinate {m}
  0,             !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
  0,             !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
  3.5,          !- Vertex 3 X-coordinate {m}
  -2.35,        !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
  0,             !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
  0,             !- Vertex 4 X-coordinate {m}
  -2.35,        !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
  0;            !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

```

Figura 1. 12: Exemplo de coordenadas inseridas para o pavimento sobre o exterior, no caso do sistema de ganho direto

```

BuildingSurface:Detailed,
  PD11_ZN2.2,    !- Name
  wall,          !- Surface Type
  PD11,          !- Construction Name
  ZN2.2,         !- Zone Name
  Surface,       !- Outside Boundary Condition
  PD11_ZN1.2,   !- Outside Boundary Condition object
  NoSun,         !- Sun Exposure
  Nowind,        !- Wind Exposure
  ,              !- View Factor to Ground
  ,              !- Number of Vertices
  3.5,           !- Vertex 1 X-coordinate {m}
  -2.2,          !- Vertex 1 Y-coordinate {m}
  2.28,          !- Vertex 1 Z-coordinate {m}
  3.5,           !- Vertex 2 X-coordinate {m}
  -2.2,          !- Vertex 2 Y-coordinate {m}
  0,             !- Vertex 2 Z-coordinate {m}
  3.5,           !- Vertex 3 X-coordinate {m}
  -2.35,        !- Vertex 3 Y-coordinate {m}
  0,             !- Vertex 3 Z-coordinate {m}
  3.5,           !- Vertex 4 X-coordinate {m}
  -2.35,        !- Vertex 4 Y-coordinate {m}
  2.28;         !- Vertex 4 Z-coordinate {m}

```

Figura 1. 13: Exemplo de coordenadas inseridas para o pavimento sobre o exterior, no caso do sistema de ganho indireto

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ZONEINFILTRATION:DESIGNFLOWRATE =====
ZoneInfiltration:DesignFlowRate,
  Infiltracao,           !- Name
  Zonas,                !- Zone or ZoneList Name
  Sempre Ligado,        !- Schedule Name
  AirChanges/Hour,      !- Design Flow Rate Calculation Method
  ,                    !- Design Flow Rate {m3/s}
  ,                    !- Flow per Zone Floor Area {m3/s-m2}
  ,                    !- Flow per Exterior Surface Area {m3/s-m2}
  0.95,                !- Air Changes per Hour
  ,                    !- Constant Term Coefficient
  ,                    !- Temperature Term Coefficient
  ,                    !- Velocity Term Coefficient
  ;                    !- Velocity Squared Term Coefficient

```

Figura 1. 14: Valor inserido para a mudança de ar por hora (MAH), no caso da infiltração, relativamente ao estudo da “célula-de-teste”, ao nível nacional

```

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: HVACTEMPLATE:THERMOSTAT =====
HVACTemplate:Thermostat,
  Thermostat,          !- Name
  ,                    !- Heating setpoint schedule Name
  20,                  !- Constant Heating Setpoint {C}
  ,                    !- Cooling setpoint schedule Name
  25;                  !- Constant Cooling Setpoint {C}

```

Figura 1. 15: Valores da temperatura mínima e máxima, no caso do termostato, relativamente ao estudo da “célula-de-teste”, ao nível nacional