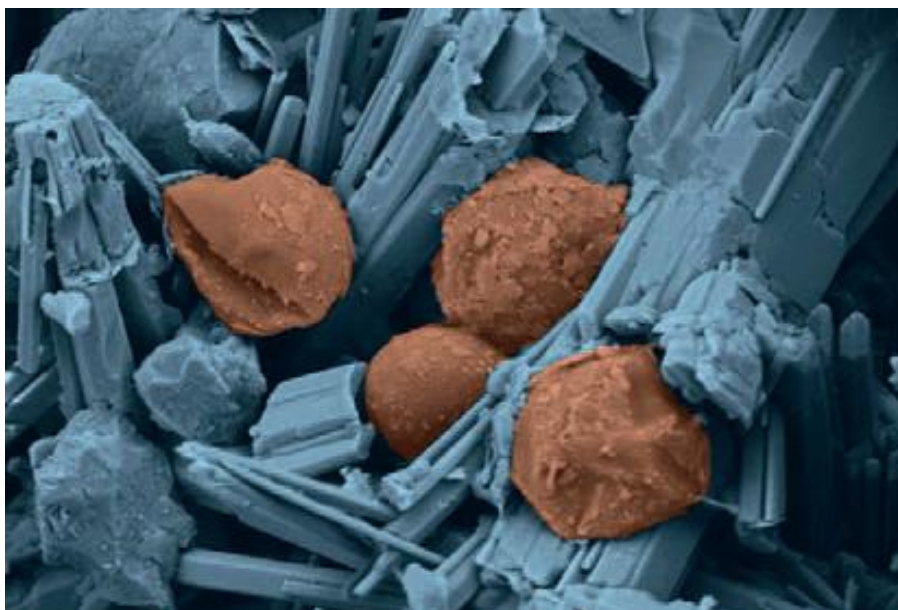




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil



Materiais de Mudança de Fase em Revestimentos

PAULO DE JESUS SANTOS PEDROSO DA SILVA
GRADE

Licenciado em Engenharia Civil

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de
Especialização em Edificações

Orientadores:

Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques (ISEL)

Júri:

Presidente: Doutor João Alfredo Santos ISEL

Vogais:

Doutor Pedro Miguel Raposeiro da Silva (ISEL)

Doutora Maria Dulce e Silva Franco Henriques (ISEL)

Dezembro de 2013



RESUMO

Os edifícios são dos principais consumidores de energia elétrica e o seu custo continua a aumentar, face ao aumento do custo dos combustíveis fósseis. Para tal, torna-se necessário pôr em prática estratégias de modo a reduzir os consumos energéticos dos edifícios novos e antigos. Uma das soluções que estão a emergir na construção internacional é a incorporação de materiais de mudança de fase em revestimentos. As microcápsulas contendo parafina são caracterizadas por possuir um elevado poder de armazenamento de energia e uma vez aplicadas nos revestimentos interiores, conseguem reduzir o consumo de utilização de sistemas de aquecimento ou de arrefecimento. No âmbito da presente dissertação foi feito o levantamento de vários casos de estudo de incorporação destes materiais em diferentes argamassas, analisando o seu comportamento em estado fresco e endurecido. Foram também estudadas várias formas de utilização, tal como rebocos mono-camada e como camada de acabamento, do ponto vista económico e de comportamento térmico. Foi feita uma análise a um caso real de uma casa reabilitada que conseguiu reduzir o seu consumo de aquecimento / arrefecimento para 30 kWh/m² por ano e por último foi exposta a ideia do modo como se podem aplicar os PCM ao Regulamento de Características do Comportamento Térmico de Edifícios.

Palavras-chave: Microcápsulas; revestimentos; PCM; armazenamento de energia; RCCTE;



ABSTRACT

Buildings are major consumers of electricity and the price that we pay for energy continues to increase due the price of fossil fuels. It's necessary to implement strategies to reduce the consumption of new and old buildings. One of the solutions that are emerging in internationally construction is the incorporation of phase change materials in interior linings, the use of microcapsules containing paraffin are characterized by having a high quantity of energy storage and if applied in the interior linings can reduce the heat and cool consumption on the buildings. On this work was analyzed several case studies of incorporation PCM materials in different mortars, realizing their behavior in fresh and hardened state, various forms of use as mono-layer and finished layer on economically and thermal behavior aspects, a case study of a rehabilitated house that could reduce consumption of heating \ cooling to 30 kWh/m² per year and was finally, how PCM can be applied in Portugal thermal characteristics regulation.

Keywords: Microcapsules; wall linings; PCM; energy storage; RCCTE;



AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo o apoio que me deram ao longo da minha formação, em que lhes dedico inteiramente este trabalho e este curso.

À Orientadora Eng^a Doutora Dulce Henriques, todo o apoio de dedicação, orientação e transmissão de conhecimentos durante este trabalho.

Ao André Jorge ao Jorge Silva ao Bruno Camacho à Susana Cruz e à Sandra Monteiro assim como todos os outros colegas do ISEL que ao longo do curso e no decorrer deste trabalho me ajudaram na compreensão e elaboração deste tema.

Aos meus colegas de trabalho durante o meu estágio curricular no Algarve, que foram fundamentais para me ajudarem a criar “*know-how*” na área de construção, principalmente na área de revestimentos.

Ao Tiago Martins ao Eduardo Renda e ao Arménio Correia, por me ajudarem a ultrapassar as “passas do Algarve” local onde desenvolvi parte deste trabalho.





Índice de Texto

1- Introdução	18
1.1 – Enquadramento	18
1.2 – Objetivos.....	20
1.3 – Metodologia e estrutura da dissertação	20
2– Materiais de mudança de fase	22
2.1- Caraterização	22
2.1.1 – <i>Características gerais</i>	22
2.1.2 – <i>Historia dos materiais de mudança de fase</i>	25
2.1.3 – <i>Processo de Fabrico de PCM</i>	28
2.1.4 – <i>Patologias do PCM</i>	31
2.1.4.1 - <i>Encapsulamento</i>	31
2.1.4.2 - <i>Inflamabilidade</i>	31
2.1.4.3 - <i>Sobrearrefecimento</i>	32
2.1.4.4 - <i>Separação de fase</i>	33
2.1.4.5 - <i>Custo</i>	33
2.2 – Princípio de funcionamento dos materiais de mudança de fase	33
2.2.1 – <i>Constituição química dos materiais de mudança de fase</i>	33
2.2.2 – <i>Comportamento Térmico</i>	35
2.2.2.1 - <i>Armazenamento de calor</i>	36
2.2.2.2 – <i>Condutibilidade e convecção térmica</i>	40
2.3 – Aplicação à construção	42
2.3.1- <i>Tipos de soluções disponíveis no mercado</i>	43
2.3.1.1- <i>Placas laminadas ou cartonadas com PCM</i>	43
2.3.1.2 - <i>Argamassas prontas com PCM</i>	47
2.3.1.3 - <i>PCM em pó ou em solução aquosa</i>	49
2.4 – Argamassas com materiais de mudança de fase incorporadas	52
2.4.1- <i>Traço ideal para reboco interior</i>	52
2.4.1.1- <i>Ligante</i>	53
2.4.1.2 – <i>Agregado</i>	55
2.4.1.3 – <i>Água</i>	56
2.4.1.4 – <i>Propriedades</i>	57
2.4.2 – <i>Compatibilidade com outros materiais</i>	59
2.4.3 – <i>Utilização em edifícios</i>	59
2.5 - RCCTE e materiais de mudança de fase	66
2.5.2 - <i>Cálculo da massa superficial útil</i>	69
2.5.3 - <i>Cálculo da inercia térmica</i>	69
2.5.4 - <i>Necessidades de aquecimento\ arrefecimento</i>	70
3 – Avaliação de casos de experimentais	74
3.1 - Aplicação de um PCW – Phase change wallboard (gesso) baseado no armazenamento de frio (estação de Verão)	74
3.2 - Aplicação de microcápsulas com PCM em placas de gesso e blocos de cimento	76
3.3 - Argamassas térmicas sustentáveis: Contributo dos Materiais de Mudança de Fase (cal aérea e gesso).....	84
3.4 - Aplicação de PCM – Estudo térmico comparativo e estudo económico	89



3.5 - Influência do isolamento térmico e os materiais de mudança de fase, no consumo de energia e emissões de CO ₂ nas várias cidades europeias utilizando modelos de simulação.....	94
3.6 - Papel dos nano-aditivos na funcionalização das argamassas	97
3.7 - Funcionalização de argamassas para controlo das condições ambiente	99
3.8 - Argamassas de desempenho térmico melhorado, utilização de PCM como argamassa de acabamento	106
3.9 - Análise de Resultados	109
4 – Simulação.....	114
4.1 - Objetivo	114
4.2 - Método de Calculo	114
4.3 - Caracterização do modelo	115
4.4 - Resultados	119
4.5 - Análise de Resultados	120
5 - Conclusão	121
5.1 – Conclusões.....	121
5.2 – Desenvolvimentos futuros.....	122
Bibliografia.....	124
ANEXO I – DURAÇÃO DO PERIODO DE AQUECIMENTO (RCCTE)	128
ANEXO II – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO A 1 DE AGOSTO	129
ANEXO III – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO A 1 DE JANEIRO.....	130
ANEXO IV - RENOVAÇÃO DO AR NO INTERIOR DOS EDIFÍCIOS (RCCTE)	131



Índice de Figuras

Figura 1- Esquema de Armazenamento de Calor.....	22
Figura 2 - Classificação dos Materiais de mudança de fase	24
Figura 3 - Aplicação de PCM para conservação de alimentos	25
Figura 4 - Knauf – PCM Smart Board®.....	26
Figura 5 - Blocos de cimento com PCM.....	26
Figura 6 - Sistema de AVAC com PCM	27
Figura 7 – Incorporação de PCM em Piso com aquecimento.	27
Figura 8 – Processos de microencapsulação	29
Figura 9 - Processo de fabrico das microcápsulas com PCM por processo químico.....	30
Figura 10 – Representação esquemática de capacidade de armazenamento igual para espessuras diferentes nos vários materiais.....	44
Figura 11 – Desencontro entre placas	46
Figura 12 – Esquema de montagem	46
Figura 13 – Aplicação do reboco.....	48
Figura 14 - MICRONAL DS, serie 5000	49
Figura 15 - Pormenor de aplicação de argamassas com PCM	51
Figura 16 - Camadas de reboco.....	56
Figura 17 - Ensaio na mesa de espalhamento	57
Figura 18 – Fissuração com 20% de PCM a) cimento com PCM b) cal com PCM c) gesso e cal	58
Figura 19 - Painéis NEOPOR da BASF, isolante da parede exterior.	61
Figura 20 - Aplicação de reboco com PCM	62



Figura 21 - Sistema AVAC com recuperador de calor.....	62
Figura 22 - Célula de produção energética a hidrogénio.....	63
Figura 23 - Esquema com as várias soluções propostas.....	63
Figura 24 - Esquema da parede.....	67
Figura 25 - Cubículos em betão.....	77
Figura 26 - Parede de Trombe com vidro exterior.....	82
Figura 27 – Fachada a) exposta a sul e b) exposta a norte.....	92
Figura 28 - Modelo de Escritório.....	95
Figura 29 - Argamassa de gesso e PCM para acabamentos.....	107
Figura 30 - Aplicação de multicamada de reboco.....	109
Figura 31 - Edifício Modelo.....	115
Figura 32 - Planta do modelo de estudo.....	116



Índice de Gráficos

Gráfico 1 - Comportamento típico dos PCMs	22
Gráfico 2 – Parafina	35
Gráfico 3- Capacidade de armazenamento de calor dos PCM	38
Gráfico 4 - Reabilitação antes e depois.	65
Gráfico 5 - Necessidades de arrefecimento	72
Gráfico 6 - Temperatura exterior	75
Gráfico 7 - Temperatura interior das divisões	75
Gráfico 8 - Diferença de temperatura entre ar interior e temperatura da parede	76
Gráfico 9- Temperatura exterior e temperatura da parede oeste com e sem PCM (janelas fechadas).....	78
Gráfico 10 - Níveis de radiação solar e temperatura nos dias (05/07/2006 e 28/07/2006)	78
Gráfico 11 - Temperatura da parede sul (com e sem PCM) nos dias 05/07/2006 e 28/07/2006 (caso 1 e caso 2, respetivamente)	79
Gráfico 12 - Temperatura da parede Este nos 2 cubículos (julho de 2006)	80
Gráfico 13 - Temperatura da parede sul com e sem PCM (caso3 : janelas fechadas, Agosto 2006)	80
Gráfico 14 – Temperatura dos 2 telhados (janelas fechadas, Agosto 2006).....	81
Gráfico 15 - Temperatura exterior e temperatura do painel sul com “parede de Trombe”, com e sem PCM (Novembro de 2006).....	82
Gráfico 16 - Temperatura exterior e temperatura do painel sul com “parede de Trombe”, com e sem PCM e janelas fechadas (Novembro de 2006)	82
Gráfico 17 - Comparação entre o caso 6 - janelas fechadas (9 –12/10/2006) e o caso 5 - janelas abertas (27–29/10/2006), ambos com “parede Trombe”	83



Gráfico 18 - Temperaturas ambientes interiores no caso 6 (9–12/10/2006) e caso 5 (27–29/10/2006) com “Parede de Trombe”	83
Gráfico 19 - Composição das argamassas (Água, PCM, Fibras e Superplastificante em % das partículas sólidas)	86
Gráfico 20 - Ensaios mecânicos das argamassas variado a % de gesso e PCM. (Cunha, <i>et al.</i> , 2012)	87
Gráfico 21 - Retração desde a moldagem até as 24h	88
Gráfico 22 - Retração desde a moldagem até aos 7 dias.....	88
Gráfico 23 - Temperatura e humidade relativa para o dia mais frio ($9.0^{\circ}\text{C} < \text{Temperatura exterior} < 25.8^{\circ}\text{C}$)	90
Gráfico 24 - Temperatura e humidade relativa para o dia mais quente ($14,9^{\circ}\text{C} < \text{Temperatura exterior} < 36,8^{\circ}\text{C}$)	90
Gráfico 25 - Temperaturas exteriores e interiores para as divisões viradas a sul.....	93
Gráfico 26 - Temperaturas exteriores e interiores para as divisões viradas a norte	94
Gráfico 27 - Consumos em Varsóvia	96
Gráfico 28 - Consumos em Sevilha.....	96
Gráfico 29 - Resistência mecânica da composição de cal com PCM.....	98
Gráfico 30 - Distribuição da microestrutura interna das argamassas	98
Gráfico 31 - Teor em ar das amostras	100
Gráfico 32 - Massa volúmica das amostras	101
Gráfico 33 - Evolução da tensão de escoamento a) e evolução da viscosidade plástica b)	102
Gráfico 34 - Evolução do volume das amostras endurecidas	103
Gráfico 35 - Retração das amostras	103
Gráfico 36 - Massa volúmica aparente	104



Gráfico 37 - Modulo de elasticidade das amostras	104
Gráfico 38 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade das amostras ao fim de 28 dias.	105
Gráfico 39 - Valores de degradação de NO _x	106
Gráfico 40 - Dados geográficos,.....	115
Gráfico 41 - Temperaturas a 1 de Janeiro	119
Gráfico 42 - Temperaturas a 1 de Agosto	120



Índice de Tabelas

Tabela 1 – Capacidade de deformação elástica e plástica das microcápsulas	31
Tabela 2 – Moléculas de Parafina.....	34
Tabela 3 – PCMs disponíveis comercialmente e suas características	36
Tabela 4 – Propriedades de alguns PCM	37
Tabela 5 – Condutividade térmica das parafinas.....	42
Tabela 6 – Aumento da condutividade, aumentando a concentração de PCM.....	42
Tabela 7 – Especificação técnica Micronal PCM Smartboard	43
Tabela 8 – Comparação entre uma placa contendo PCM e outra sem PCM.....	44
Tabela 9 - Especificações técnicas do Painel Dupont Energain.....	45
Tabela 10 – Vantagens e desvantagens PCM Smart Board\Painel dupont energaint	47
Tabela 11 - Dados técnicos Weber mur clima	48
Tabela 12 - Vantagens e desvantagens do maxit clima	49
Tabela 13 – Especificações técnicas dos aditivos	50
Tabela 14 - Vantagens e desvantagens do micronal DS.....	51
Tabela 15 - Modulo de finura da areia, adaptado de Vieira	56
Tabela 16 - Sistemas passivos.	61
Tabela 17 - Intervenção no edifício de 1950.....	64
Tabela 18 - Parcelas de intervenção adaptado de Schubert	64
Tabela 19 - Calculo da resistência térmica da parede.....	69
Tabela 20 - Composição das argamassas (agua, PCM, fibras e superplastificante em % do peso da areia)	85



Tabela 21 - Características do material utilizado	90
Tabela 22 - Máximo e mínimo registado durante o período de monitorização.....	91
Tabela 23 - Diferença de temperaturas máximas e mínimas e tempos de atraso para a divisão sem PCM –REF e a divisão com PCM.	91
Tabela 24 – Calculo das diferenças do fluxo de calor entre as duas divisões (com e sem PCM) .	91
Tabela 25 - Características do material utilizado	93
Tabela 26 - Ciclos de aquecimento utilizando o aquecedor	93
Tabela 27 - Poupanças de Energia nas Cidades Europeias	97
Tabela 28 - Dosagens da argamassa padrão.....	99
Tabela 29 - Composição da argamassa	100
Tabela 30 - Diferença de % de H ₂ O do amassado e do preparado para reologia.....	101
Tabela 31 - Condutividade térmica das argamassas aos 30°C	105
Tabela 32 - Custo da argamassa para acabamento (valores de 2004).....	109
Tabela 33 - Características em estado endurecido	111
Tabela 34 - Resistências nos vários tipos de ligantes com PCM	112
Tabela 35 - Ensaio de aderência.	113
Tabela 36 - Temperaturas das várias argamassas.....	113
Tabela 37 - Elementos de construção sem PCM.....	117
Tabela 38 - Condutividade térmica dos elementos sem PCM.....	117
Tabela 39 - Elementos de construção com PCM.....	118
Tabela 40 - Condutividade térmica dos elementos com PCM.....	118



LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

PCM – phase change material

J – Joules

Kg – Kilogramas

°C – Graus celsius

Q - Representa a quantidade de calor recebida ou transmitida pelo corpo. [J]

m - Representa a massa do corpo. [Kg]

L – Representa o calor latente. [J/Kg]

c – Representa o calor especifico da substancia. [J/Kg.°C]

ΔT - Representa a variação térmica que o corpo está sujeito.,[°C].

E_{arm} - Energia armazenada total. [J]

E_{arm sol} - Energia armazenada em estado solido. [J]

E_{arm liq} - Energia armazenada em estado liquido. [J]

E_{arm fus} - Energia armazenada no processo de fusão. [J]

T_{fus}, T_i, T_f – Temperatura de fusão, temperatura inicial e temperatura final.[°C]

m_{liq} – massa do PCM que passou ao estado líquido. [Kg]

Δh_{fus} – Energia de fusão [J/Kg]

c_{sol}, c_{liq} - Calor especifico na fase solida, fase liquida [KJ Kg⁻¹ °C⁻¹]

E_{sen}, E_{lat} – Energia sensivel e energia latente em [J].

q – Taxa de transferência de calor ou potencia calorifica [W]



h – Coeficiente de transferência de calor por convecção [$W \cdot m^{-2} \cdot C^{-1}$]

A – Área perpendicular á direção do fluxo de calor [m^2]

U - Condutividade térmica [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

R - Resistência térmica [$m^2 \cdot ^\circ C/W$]

e - Espessura do elemento. [m]

λ - Condutibilidade térmica do material. [$W/m \cdot ^\circ C$]

λ_{pond} – Condutibilidade térmica ponderada. [$W/m \cdot ^\circ C$]

Msi_{pond} - Massa superficial útil ponderada. [Kg/m^2]

Msi - Massa superficial útil. [Kg/m^2]

M_{s_i} - Massa superficial útil do elemento i [Kg/m^2]

S_i - Área da superfície interior do elemento i [m^2]

A_p - Área útil de pavimento [m^2]

N_{ic} - Necessidades anuais de aquecimento. [$kW \cdot h/m^2$].

Q_t - Perdas de calor por condução através da envolvente. [W/m^2]

Q_v - Perdas de calor por renovação de ar. [W/m^2]

Q_{gu} - Ganhos de calor úteis resultantes da iluminação, dos equipamentos, dos ocupantes e dos ganhos solares úteis através dos envidraçados, PCM. [W/m^2]

A_p - Área útil de pavimento. [m^2]

Q_{Lna} - Perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados e pavimentos em contacto com locais não aquecidos. [W/m^2]

Q_{pe} - Perdas de calor pelos pavimentos e paredes em contacto com o terreno. [W/m^2]

Q_{pt} - Perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício. [W/m^2]

Q_i – Ganhos internos por área útil do pavimento. [W/m^2]



Q_s – Ganhos internos solares por área útil do pavimento. [W/m^2]

q_i - Ganhos térmicos internos médios por unidade de área útil de pavimento. [W/m^2]

M – Duração média da estação convencional de aquecimento. [meses]

A_p – Área útil de pavimento [m^2].

N_{VC} - Necessidades de arrefecimento [$kW.h/m^2$].

Q_g - Ganhos totais brutos do edifício ou fração autónoma. [$kW.h$]

η – Fator de utilização dos ganhos.

R_c, R_s – Resistência á compressão e resistência à flexão [Mpa]

e - Espessura [m].

ρ – Densidade [$Kg m^{-3}$]





1- Introdução

1.1 – Enquadramento

A energia, atualmente e mais do que nunca tornou-se num bem decisivo para o desenvolvimento económico e social. A exigência tem vindo a ser aumentada a nível de eficiência e consumo de modo a contrariar uma tendência insuportável a que estamos a submeter o nosso planeta.

Segundo dados da Comissão Europeia de Energia e Transportes o sector dos edifícios de serviços e edifícios domésticos representam cerca de 40% do consumo de energia no conjunto dos 25 países que compõem a União Europeia. Salienta-se que o consumo energético para aquecimento apresenta um incremento de 0,7% ao ano enquanto para arrefecimento este valor chega a 14,6%, devido à procura de padrões superiores de conforto e qualidade de vida (Pires, *et al.*, 2005).

Sem grande margem para dúvidas, devido ao aumento do desenvolvimento económico que está a originar uma escassez de recursos e uma produção de CO₂ a níveis record, o caminho a seguir é o da sustentabilidade.

O consumo energético e a poluição ambiental estão intimamente ligados visto que grande parte da energia que utilizamos provém de fontes não renováveis.

Para vencer este problema mundial, foi assinado em 2005 o protocolo de Quioto que veio impor limites de produção de gases com efeito de estufa entre os países que produzissem juntos 55% das emissões mundiais. Este protocolo veio intervir nos sectores energéticos e dos transportes assim como promover o uso de fontes energéticas alternativas e a diminuição de produção dos gases com efeito de estufa em menos de 15% (para os estados membros da UE) em relação a 2008. Apesar do protocolo já ter vencido, a ONU, estará em negociações para a sua prorrogação. (Protocolo de Kyoto, 1998)

A nível nacional e na área dos edifícios, foi criado em 4 de Abril de 2006, o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) de modo a promover a sustentabilidade e eficiência energética dos edifícios. Este regulamento estabelece requisitos de qualidade para novos edifícios de habitação e de serviços com ou sem climatização, tendo em conta a envolvente do edifício nomeadamente a



exposição solar e as perdas térmicas, impondo limites aos consumos energéticos para climatização e produção de água quente, valorizando a utilização de fontes de energia renovável.

Outro regulamento nacional existente é o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização nos Edifícios, Decreto-Lei 118/98 de 7 de Maio, destinado a edifícios com um elevado consumo energético para climatização (aquecimento e/ou arrefecimento) em edifícios de serviços ou edifícios residenciais com potências para climatização superiores a 15 kW.

De modo a criar conforto interior nos edifícios e um melhor comportamento e eficiência energética começou-se a incorporar isolantes térmicos nas construções com o objetivo de aumentar a inércia térmica entre o interior e o exterior dos edifícios, dificultando a rápida transmissão de energia térmica que se podem denominar de perdas ou ganhos térmicos.

A indústria tem vindo cada vez mais a responder a esta procura de produtos com baixos valores de condutibilidade térmica, existem hoje inúmeras soluções de isolamento térmico, os processos construtivos também foram alterados assim como as soluções estruturais foram alvo de estudo para chegar á conclusão de quais poderiam trazer vantagens do ponto vista térmico, nomeadamente na diminuição de pontes térmicas.

Uns dos materiais que têm sido implementados ultimamente na construção são revestimentos cuja sua composição incorpora materiais termo-activos. Estes materiais, primeiramente utilizados na indústria aeronáutica (NASA) têm como principal característica o poder de armazenamento de energia e a libertação em fase oportuna ou seja, absorve energia térmica quando posto sobre temperaturas altas e liberta calor quando exposto a baixas temperaturas, são denominados de materiais de mudança de fase.

Existem já, algumas empresas a comercializar este material para a construção, como a BASF, Micronal ® PCM, assim como a implementação em alguns edifícios na Alemanha, em que o papel destes materiais foi determinante para baixar o consumo energético.

Em Portugal, a Micropolis lançou um produto á base de parafina com o nome Mikra Thermic e a Webber estaria a desenvolver o seu produto PCM-*Phase change material* em microcápsulas em forma de reboco para colocação no mercado. Coutinho, 2006.



A presente tese tem como objetivo vir aprofundar conhecimentos neste material, caracterizando-o e percebendo o seu princípio de funcionamento através de ensaios selecionados tendo em vista a melhor aplicação dos PCM nas construções.

1.2– Objetivos

O objetivo deste trabalho passa por aprofundar o conhecimento do comportamento de materiais termo-ativos prevendo as suas potencialidades na incorporação nas construções.

- a) Serão analisados vários casos onde já terão sido implementados estes materiais, analisando parâmetros como qualidade do ar, variação de temperatura e características das argamassas que incorporaram este tipo de materiais como agregado.
- b) Será estudado o procedimento de aplicação destes materiais nas construções, assim como o comportamento em junção com outros materiais correntes com vista a soluções de melhor comportamento térmico.
- c) Será feito um estudo de impacto económico nas despesas energéticas utilizando estes materiais face a soluções convencionais, vantagens e desvantagens da sua utilização, procurando uma otimização da sua utilização nos edifícios correntes ou para reabilitação.
- d) Será estudado a aplicação dos materiais de mudança de fase e a sua mais-valia na utilização do RCCTE.

1.3– Metodologia e estrutura da dissertação

A tese apresentada está dividida em cinco capítulos e os seus anexos. O primeiro capítulo, introdutório, retrata a situação energética dos edifícios, apresentando os PCMs com um material de resposta às necessidades de abaixamento dos consumos energéticos na atualidade.



No segundo e terceiro capítulo, será abordada a caracterização do PCM em que se começa por estudar os trabalhos e pesquisas que têm sido realizados dentro do tema dos materiais de mudança de fase, compreendendo os processos e equações envolvidos. Como suporte será feita uma intensa pesquisa pelos documentos científicos publicados, casos práticos assim como patentes registadas por fabricantes. Será pesquisado a nível internacional e nacional a aplicação dos materiais de mudança de fase na atualidade e as suas características, começando pelo início da sua aplicação a nível têxtil e de conservação térmica.

Serão abordados os processos de fabrico e suas patentes bem como as anomalias de fabricação. No âmbito da construção aborda-se as diversas aplicações, dos materiais de mudança de fase e inicia-se o estudo dos PCMs em revestimentos na forma de argamassas e de placas do tipo Wall-mate a nível do seu comportamento térmico e constituição química.

Ainda neste capítulo é abordado casos de estudo como o “3-liter house” em que será feita uma análise e comparação de parâmetros como a qualidade do ar, níveis de CO₂, variação de temperatura e consumo energéticos entre situações de utilização de PCMs *versus* soluções correntes. É abordado a compatibilização dos PCMs com os materiais correntes na construção, o traço ideal de modo a embutir os PCMs nas argamassas, explorando a sua compatibilização com cimento, cal e gesso. A nível das construções antigas é explorado a aplicabilidade dos materiais de mudança de fase com vista a melhorar o comportamento térmico destes edifícios, é analisado também a influencia destes materiais ao nível do Regulamento das Características do Comportamento Térmico.

No capítulo 4 é realizada uma simulação de um apartamento no *Designbuilder*, onde é comparado os valores de temperatura interior com e sem PCM.

No capítulo 5 será apresentado as conclusões gerais deste trabalho bem como sugestões de desenvolvimento para a utilização dos materiais de mudança de fase.



2- MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

2.1- Caracterização

2.1.1 – Características gerais

Os materiais de mudança de fase são materiais capazes de armazenar uma grande quantidade de energia calorífica devida ao seu elevado calor de fusão e conseguem libertar esta energia a uma temperatura constante durante a sua mudança de fase.

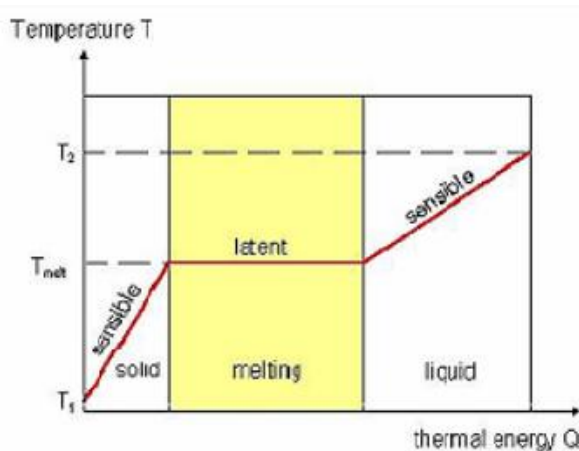


Gráfico 1 - Comportamento típico dos PCMs (Duran Heat, 2013)

Existem 3 formas possíveis para armazenar calor, armazenamento de calor sensível, armazenamento de calor latente e armazenamento de calor de reação.

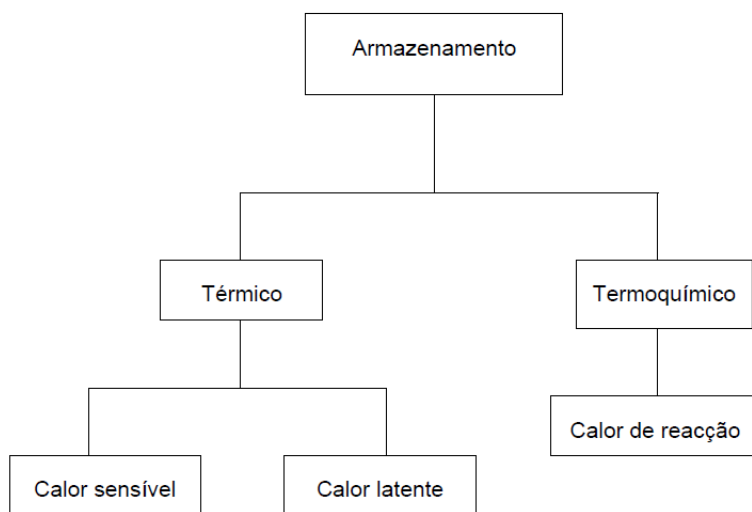


Figura 1- Esquema de Armazenamento de Calor (Mendes, *et al.*, 2010)

Calor latente – considera-se por calor latente a quantidade de calor necessária para uma unidade de massa de uma determinada substância deva receber ou ceder para mudar de



fase, isto é, mudar de estado sólido para líquido, ou de líquido para sólido, líquido para gasoso ou vice-versa. Durante a mudança de fase a temperatura da substância não varia, resultando apenas na mudança do seu estado físico. O calor latente pode assumir valores positivos ou negativos, consoante a substância esteja a absorver ou ceder calor. (Sharma, *et al.*, 2005)

A seguinte equação explica como pode ser calculado a quantidade de calor latente:

$$Q = m \cdot L \quad \text{(equação 2.1.1)}$$

Em que Q representa a quantidade de calor recebida ou transmitida pela corpo (J), m representa a massa do corpo (Kg), L é calor latente que representa a quantidade de energia necessária a fornecer a um kg da substância para que esta mude de estado (J/Kg).

Calor sensível – É o calor que provoca a variação de temperatura de um corpo, isto é a quantidade de calor necessária para aumentar ou diminuir a temperatura de um corpo, que pode ser dada pela seguinte equação:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad \text{(equação 2.1.2)}$$

Deste modo, Q representa a quantidade de calor sensível (J), m a massa do corpo (Kg), c é o calor específico da substância representa a quantidade de calor necessária para a variação de 1°C (J/Kg.°C) e a variação térmica que o corpo está sujeito ΔT (°C).

Calor de reação – representa a energia em forma de calor absorvido e armazenado no estabelecimento ou quebra de ligações moleculares.

Os PCMs podem ser orgânicos, inorgânicos ou eutéticos.



Figura 2 - Classificação dos Materiais de mudança de fase (Sharma, *et al.*, 2005)

Existem três modos de transmissão de calor por condução, convecção e radiação.

A transmissão de calor por condução térmica é originado pela transferência de energia térmica entre átomos e/ou moléculas que o compõem devido á existência de um gradiente térmico. A origem deste fenómeno deve-se a uma agitação interna das moléculas (que aumenta com o aumento de temperatura) que transferem parte da sua energia cinética aos átomos que interagem libertando-se neste processo calor.

A transmissão de calor por convecção é caracterizada pelo movimento de um fluido devido á alteração da sua densidade.

A transmissão de calor por radiação é a energia emitida por um material que se encontra a uma temperatura não nula sendo transmitida por radiação eletromagnética.

Na maioria dos casos, a transmissão de calor acontece em simultâneo pelos três processos. (Pérez *et al.*, 1993)



2.1.2 – História dos materiais de mudança de fase

O início da utilização de materiais de mudança de fase remonta ao século XIX. Este material começou a ser usado inicialmente para a conservação de mercadorias durante o seu transporte.

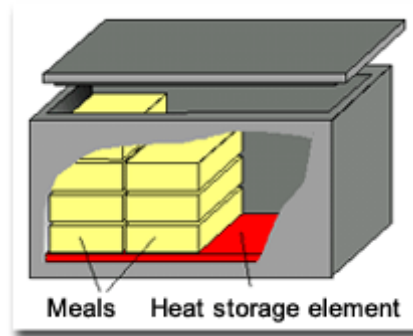


Figura 3 - Aplicação de PCM para conservação de alimentos

A NASA também incorporou nos seus fatos, aproveitando a capacidade destes materiais para manter a temperatura do corpo, face às temperaturas negativas existentes no espaço. Da mesma forma alguns fabricantes de botas de ski também já incorporam este tipo de material.

Na área de medicina, existe já alguns produtos terapêuticos como por exemplo cobertores que têm a capacidade de absorver as temperaturas excessivas de pacientes febris. (Buckley *et al.*, 2005)

Existem no mercado empresas como a Confortemp® que tem vindo a desenvolver patentes sobre as inúmeras soluções de aplicação destes materiais em fibras. Esta tecnologia é possível graças à incorporação de microcápsulas de alguns micrometros de diâmetro que envolvidas em fibras de tecido permitem fazer parte do nosso vestuário do dia-a-dia.

O princípio proactivo deste material com a pele do ser humano, tem com base a temperatura do ponto de fusão ideal, que permite em excesso de temperatura do corpo ou do ambiente arrefecer-nos e a temperaturas baixas aquecermo-nos.

Testes de simulação feitos por exemplo em uniformes militares, com a tecnologia das microfibras versus o tecido convencional, permitiu chegar a conclusão que esta tecnologia podia reduzir a transpiração até 70% menos. (Outlast®, 2012)



Outro grande exemplo foi a chegada deste material à construção, graças à sua grande compatibilidade com os restantes materiais. Desta forma, foi possível começar a juntar este material com as soluções convencionais dos revestimentos.

A empresa alemã BASF desenvolveu o seu produto Micronal[®], com base em microcápsulas que contêm uma cera de parafina no seu interior. Estas microcápsulas, tal como no vestuário, podem ser misturadas com outros materiais criando por exemplo argamassas para rebocos ou painéis, explorando a capacidade destes materiais armazenarem calor latente.

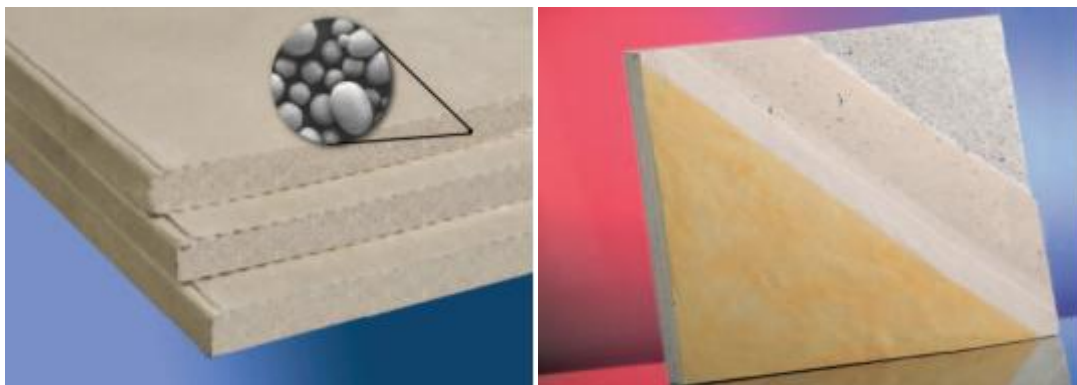


Figura 4 - Knauf – PCM Smart Board[®] (Micronal, 2013)

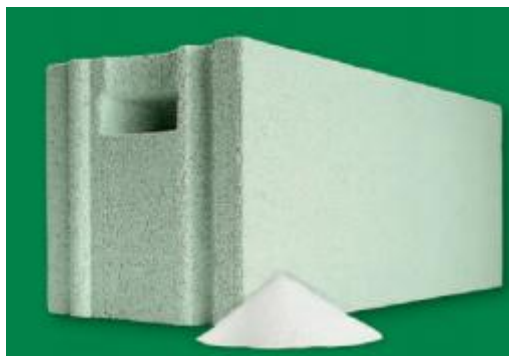


Figura 5 - Blocos de cimento com PCM (Micronal, 2013)

Existem também soluções de PCM, para sistemas de ventilação. A empresa Monodraught comercializa uma solução para condutas de AVAC, este produto com o nome de COOL-PHASE tem o papel de ajudar a arrefecer ou aquecer o ar que circula no interior das condutas através do armazenamento de energia dos PCM.



Figura 6 - Sistema de AVAC com PCM (Monodraught, 2013)

Alguns casos de estudo como o recente projeto de casa titulado “3-liter house” que consistiu em modernizar um edifício antigo de modo a torna-lo económico e eficiente energeticamente. Foi aplicado nas suas paredes interiores painéis da BASF que continham os PCM. Em junção com outras soluções técnicas aplicadas, pode-se chegar a uma redução de 85% nos consumos.

Outra solução de aplicação, o Rubitherm®GR, um granulado a base de SiO_2 contendo cerca de 35% de parafinas com vários pontos de fusão á disposição é utilizado em argamassas cimentícias para pisos radiantes com o objetivo de tornar mais eficiente a acumulação de energia de modo a permitir poupanças de energia.

Para além das parafinas, outros materiais de mudança de fase como sais hidratados são comercializados pela TEAP em Portugal.



Figura 7 – Incorporação de PCM em Piso com aquecimento. (Micronal, 2013)



No âmbito nacional as microcápsulas com materiais de PCM começaram a ser investigadas na Universidade do Minho, sob a direção do Professor Jaime Rocha Gomes desde 1996. A partir desta investigação foi criada uma patente mundial para a industrialização e comercialização para a aplicação de microcápsulas de PCM em substratos têxteis.

Em 2001, foi criada a Micropolis pelo professor Jaime Rocha Gomes e pelo Investigador Carlos Lima, com o objetivo de investigar e desenvolver microcápsulas. No mesmo ano esta empresa candidatou-se ao programa Smart Tulip (programa que visa projetar ideias criadas na universidade para a sociedade civil) tendo-lhe sido atribuído o primeiro prémio com a sua microcápsula de PCM. (Iapmei, 2004)

Conforme referido por Coutinho (2006), também em Portugal a Weber e Broutin Portugal SA estarão a desenvolver rebocos com parafinas microencapsuladas para a comercialização.

Na universidade de Aveiro, estão-se a desenvolver compósitos de celulose e cortiça com materiais de mudança de fase com o objetivo de unir materiais com grande capacidade de isolamento térmico a materiais de armazenamento térmico e em colaboração com o Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial a produzir betões poliméricos com PCM. (Coutinho, 2006)

2.1.3 – Processo de Fabrico de PCM

Para perceber o processo de fabrico, há que saber quais são as suas matérias-primas. A principal e a que confere maior capacidade térmica é a parafina. A parafina é da família dos Alcanos com a sua fórmula química geral C_nH_{2n+2} . A parafina é um dos elementos constituintes do petróleo bruto que foi descoberto por Carl Reichenbach. Trata-se de um sal solúvel presente no petróleo que tem a capacidade de precipitar a temperaturas baixas (próximas dos $4^\circ C$) formando cristais, mantendo a sua solubilidade no petróleo a temperaturas altas (superiores a $40^\circ C$).

A parafina possui propriedades termoplásticas, repelência à água assim como a combustíveis, o seu uso mais comum é como matéria-prima para o fabrico de velas e a sua constituição química é a da base dos hidrocarbonetos. É caracterizado pela sua densidade de 0.9 g/cm^3 .



Em segundo lugar, é preciso compreender o processo de microencapsulamento que pode abranger 3 tipos de processo.

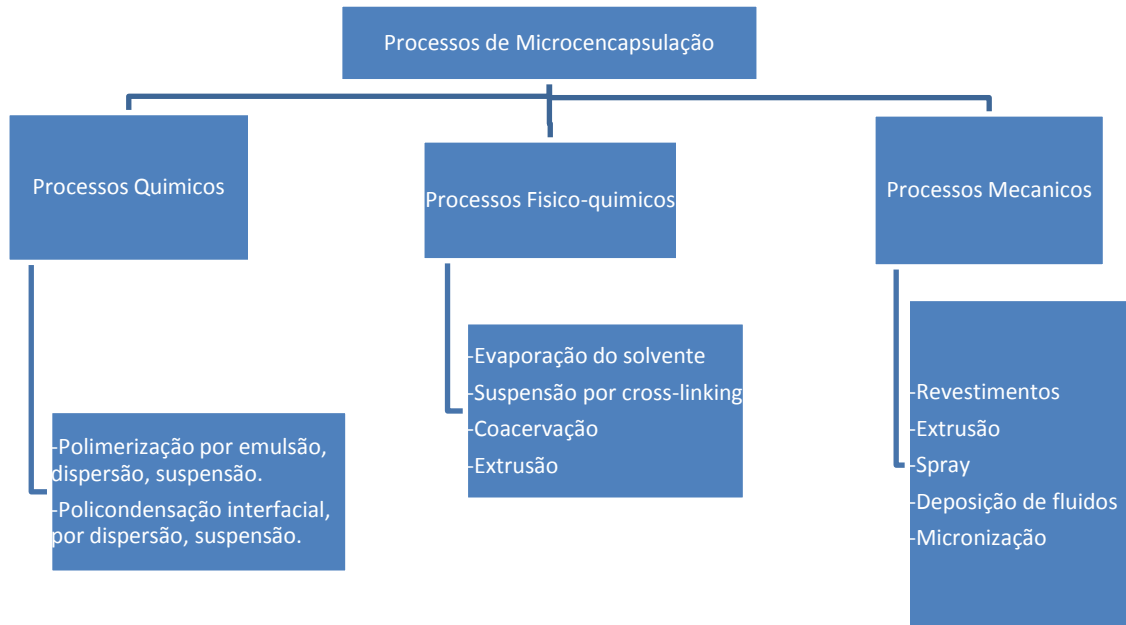


Figura 8 – Processos de microencapsulação adaptado de Cardoso, 2006

A escolha do processo de fabrico e o material vão determinar as características finais, é essencial que os materiais sejam elásticos e que consigam suportar as variações de temperatura e volume durante vários ciclos ao longo de anos.

Os processos químicos, tem como vantagens a obtenção de paredes mais rígidas. A microencapsulação por policondensação interfacial utiliza resinas de melamina-formaldeído como pré-polímero para as paredes das microcápsulas. Este processo consiste na emulsão de um óleo em água usando polímeros solúveis e agitadores de alta rotação que originam emulsões estáveis envolvendo as gotículas de óleo no tamanho pretendido. Em seguida é iniciado o processo de polimerização, uma resina de melamina é adicionada á emulsão fazendo aumentar o PH da solução, originando a reticulação da resina que polimeriza na interface. (Cardoso, 2006)

No caso do Micronal da BASF, uma das soluções alvo de estudo utiliza microcápsulas com uma espessura de 2 a 20 micrómetros para envolver a cera á base de parafina. Quando encapsulado, este material pode ser adicionado ao gesso para fazer placas de gesso com PCM ou misturado com outras argamassas.



Existem varias formas de criação das microcápsulas com PCM uma das mais comuns é dispersar gotas do PCM fundida numa solução aquosa de modo a formar paredes em torno das gotículas de PCM. (Cardoso, 2006)

Uma das patentes registadas nos Estados Unidos para o fabrico de microcápsulas de PCM (Microtek) está apresentada na figura seguinte.

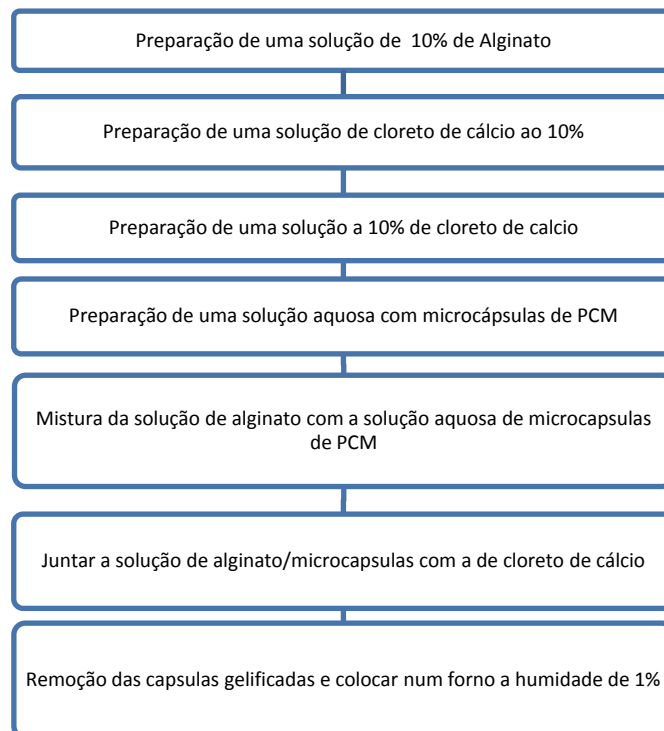


Figura 9 - Processo de fabrico das microcápsulas com PCM por processo químico (Microtek, 2012)

Um estudo feito à resistência e à compressão das faces paralelas das microcápsulas com diâmetros compreendidos entre 1 e 12 μm entre diferentes materiais demonstrou pelos seus resultados uma deformação elástica na ordem dos 19% e o seu rebentamento a ocorrer a deformações a 70%. (SU, 2006), (Zhang, 2001)



Material da microcápsula	Deformação elástica	Deformação Plástica
Melamina-formaldeído	19%	70%
Ureia-formaldeído	17%	35%
Goma arábica-gelatina	50%	-

Tabela 1 – Capacidade de deformação elástica e plástica das microcápsulas (SU, 2006), (Zhang, 2001)

2.1.4 – *Patologias do PCM*

2.1.4.1 - *Encapsulamento*

A utilização de formaldeído na produção das microcápsulas traz vantagens como a durabilidade mas traz desvantagens como a tendência de libertação do formaldeído (resina).

Para diminuir este problema foi criado um processo de sintetização, por polimerização *in-situ*. O processo consiste na adição faseada da melamina permitindo assim haver um baixo teor de formaldeído livre (60mg/Kg). No final obteve-se microcápsulas com diâmetros de 2.2 μm e 60% da massa com PCM. (LI, *et al.*, 2007)

2.1.4.2 - *Inflamabilidade*

A inflamabilidade dos materiais que contem parafina é um dos aspetos importantes a considerar pois trata-se de uma desvantagem na situação de estudo. Entende-se por inflamabilidade de um material como a sua facilidade com que ele se queima ou entra em ignição. O ponto de ignição, a temperatura mínima na qual um material consegue libertar uma mistura inflamável com o ar, em quantidade suficiente para se iniciar a combustão.

No caso dos PCMs, os fatores mais determinantes para a sua ignição, são o seu ponto de ebulição, peso molecular e a temperatura de autoignição.

Durante a combustão da parafina para além de ser uma reação muito exotérmica, libertam-se dióxidos de carbono e água. Existe por ventura uma ligação entre o número de carbonos constituintes e a libertação de monóxido de carbono, com o aumento do



tamanho da molécula poderá haver uma dificuldade maior na inflamação, mas por outro lado uma libertação de monóxido de carbono. (Silva, 2009)

As microcápsulas feitas num material de polímero, poderão de alguma maneira diminuir o processo de inflamabilidade das parafinas pois conseguem conter o material no seu interior e previnem a segregação para o exterior. Contudo em alguns locais propícios a incêndio será de bom senso evitar a utilização destes materiais. (Vieira, 2012)

A utilização de revestimentos de retardamento de chamas poderá ser uma das soluções para colmatar este inconveniente dos PCMs com parafina.

Os materiais refratários são caracterizados por terem um elevado ponto de fusão, elevada densidade, baixa condutibilidade térmica e praticamente serem incombustíveis

A vermiculite e a perlite são minerais refratários (com altas capacidades de resistência ao fogo). Estes dois materiais são regularmente utilizados para proteger elementos estruturais, elementos de corta-fogos e lareiras, encontra-se disponível no mercado em pó ou em placas, pode ser facilmente misturado com cimento para criação de rebocos (The Schundler Company, 2013).

A vermiculite é composta por silicatos hidratados de alumínio e magnésio, o seu ponto de fusão situa-se nos 1350°C, apresenta uma cor preta e uma estrutura laminada (Vieira, 2012).

A perlite é um mineral de origem vulcânica com o seu ponto de fusão aos 1260°C com um aspeto vítreo, assim como a vermiculite é composta por uma grande percentagem de água e quando exposto a temperaturas da ordem dos 900°C expande-se até 16 vezes o seu volume. (Vieira, 2012)

2.1.4.3 - Sobrearrefecimento

O sobrearrefecimento nos materiais de mudança de fase ocorre devido a não haver uma solidificação ou liquidificação homogénea durante a temperatura de fusão, o que acontece devido a alguns constituintes como por exemplo impurezas e composição multi-componente terem gamas diferentes de fusão/solidificação. Deste modo, a capacidade de armazenamento das microcápsulas pode estar de alguma forma comprometida e não armazenar ou libertar toda a energia potencial. Este tipo de acontecimentos ocorre no



entanto mais vulgarmente em PCM inorgânicos devido à sua maior diversificação na constituição (Vieira, 2012).

2.1.4.4 - Separação de fase

A separação de fases, tal como o sobrearrefecimento, é originada por haver diferentes componentes nos materiais de mudança de fase (água e sal ou dois tipos de sais), cada um com a sua temperatura de solidificação/fusão. Outra razão é a viscosidade que dificulta a separação das fases, podendo em consequência tornar o processo solidificação/fusão parcialmente irreversível, diminuindo a eficiência de armazenamento e retribuição de energia. (Vieira, 2012)

2.1.4.5 - Custo

O custo dos PCM pode ser uma desvantagem inicial. As microcápsulas de parafina têm um custo de 6€/kg (Micronal BASF) no entanto este investimento inicial, pode ser amortizado entre 5 a 10 anos, dependendo da localização do edifício e preços praticados de energia. A massificação na construção dos PCM também irá contribuir para que o preço das microcápsulas venha a diminuir futuramente (Vieira, 2012).

2.2 – Princípio de funcionamento dos materiais de mudança de fase

2.2.1 – Constituição química dos materiais de mudança de fase

Como inicialmente mencionado os PCMs podem ser divididos em materiais orgânicos, inorgânicos e eutéticos. Os materiais orgânicos podem ser parafínicos ou não parafínicos por exemplo os ácidos gordos e ésteres metílicos, estes materiais não são corrosivos e possuem pontos de fusão definidos mas tem como inconveniente poderem ser inflamáveis e produzirem fumos perigosos durante a sua combustão. No entanto uma seleção criteriosa e a sua modificação tenderão a eliminar os seus pontos negativos, como por exemplo o processo de encapsulamento por um material de polímero que previne o refluimento em estado líquido do material de mudança de fase.



A constituição destes materiais utilizados na construção deve ser essencialmente do tipo orgânico como a parafina mais aditivos. As parafinas puras contem geralmente 14 a 40 átomos de carbono enquanto as ceras parafínicas contem geralmente entre 8 e 15 átomos de carbono. Os elementos presentes na parafina são como já foi referido o carbono e hidrogénio na seguinte proporção C_nH_{2n+2} , o ponto fusão varia, consoante a quantidade de carbonos (n) presente sendo que menos carbonos, menor é a temperatura do ponto de fusão como se pode observar na tabela 2 e no caso da parafina, gráfico 2. (Davis, *et al.*, 2004)

	Número de átomos de carbono	Ponto de fusão (°C)
Octasanos	28	61.4
Heptasano	27	59
Hexacosano	26	56.4
Pentacosano	25	53.7
Tetracosano	24	50.9
Tricosano	23	47.6
Docosano	22	44.4
Heneicosano	21	40.5
Eicosano	20	36.8
Nomadecano	19	32.1
Octadecano	18	28.2
Heptadecano	17	22
Hexadecano	16	18.2
Pentadecano	15	10
Tetradecano	14	5.9
Tridecano	13	-5.5

Tabela 2 – Moléculas de Parafina (Davis, *et al.*, 2004)

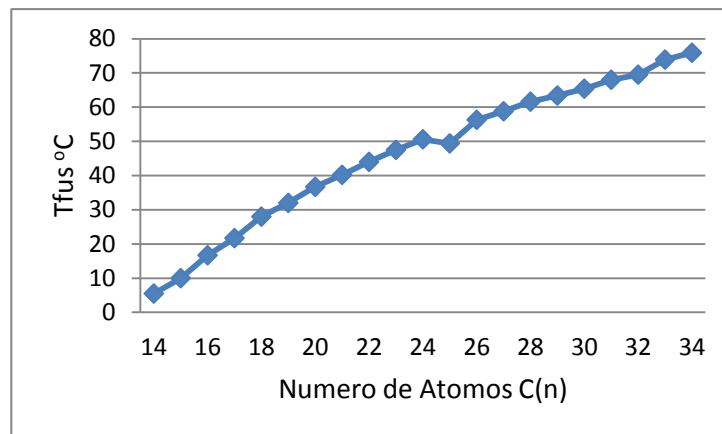
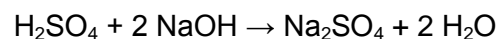


Gráfico 2 – Parafina (Araujo, 2013)

Os materiais inorgânicos são os sais hidratados bem com os metais, estes são caracterizados por terem um elevado calor latente por unidade de massa (kJ/Kg), não serem inflamáveis, mas decomporem-se ao sofrerem sobreaquecimento. Estes materiais são também mais baratos.

Como exemplo o sal de Glauber (sulfato de sódio decahidratado), foi um dos materiais pioneiros nas investigações sobre os PCMs. Este sal obtém-se pela junção de ácido sulfúrico com a soda caustica. A sua equação química é a seguinte:



Os materiais eutéticos são devidos a uma mistura entre os anteriores compostos ou mistura do mesmo tipo. Este tipo de materiais possuem também um elevado calor latente por unidade de massa, não são corrosivos nem tóxicos ou perigosos para a saúde, tem boa estabilidade química.

2.2.2 – Comportamento Térmico

No desenvolvimento deste trabalho optou-se por se centrar na parafina por ser o material mais utilizado para a indústria da construção. Pretende-se neste subcapítulo caracterizar os mecanismos mais importantes que contribuem para o funcionamento térmico dos PCM. Na escolha do material, teremos que escolher o fornecedor consoante a temperatura de fusão e valor da entalpia. Alguns fornecedores de microcápsulas estão representados na tabela 3.



Fabricante	Designação Comercial	PCM	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
Rubitherm GmBH	RT 20	Parafina	22	172
	RT 35		26	232
	RT 26		25	131
	RT 27		28	179
	RT 30		28	206
	RT 32		31	130
Climator	Climsel C23	Sal hidratado	23	148
	Climsel C24		24	216
	Climsel C32		32	212
TEAP	TH 29	Sal hidratado	29	188
Mitsubhi Chemical	STL 27	Sal hidratado	27	213
Cristopia	S27		27	207
BASF	Micronal DS 5008	Parafina	23	110
	Micronal DS 5001		26	

Tabela 3 – PCMs disponíveis comercialmente e suas características (Mendes, et al., 2010)

2.2.2.1 - Armazenamento de calor

As fontes de energia mais importantes que contribuem para o armazenamento térmico dos elementos construtivos são a radiação solar incidente e a amplitude térmica ambiente dos espaços adjacentes. A quantidade de calor que um dado material pode armazenar está dependente das suas propriedades termofísicas e da sua homogeneidade. Um material exposto a uma determinada temperatura ambiente vai aumentar ou diminuir a sua temperatura gradualmente até igualar à temperatura ambiente. O armazenamento de calor é uma grandeza proporcional à sua massa e ao seu calor específico (fase sólida e fase líquida) assim como à variação de temperatura. Quando é atingida a temperatura de fusão é também armazenada energia de forma parcial ou total, dependendo da quantidade de massa que se tenha fundido. É aqui que os PCMs ganham relevância, devido ao seu alto valor de entalpia/calor latente.

Para o cálculo da quantidade de calor que pode ser armazenada poderemos considerar as seguintes equações:

$$E_{arm} = E_{arm\ sol} + E_{arm\ liq} + E_{arm\ fus} \quad (J) \quad (\text{equação 2.2.1})$$

$$E_{arm\ sol} = m \cdot c_{sol} \cdot (T_{fus} - T_i) \quad (J) \quad (\text{equação 2.2.2})$$



$$E_{arm\ liq} = m \cdot c_{liq} \cdot (T_f - T_{fus}) \quad (J) \quad \text{(equação 2.2.3)}$$

$$E_{arm\ fus} = x \cdot m \cdot \Delta h_{fus} \quad (J) \quad \text{(equação 2.2.4)}$$

m = massa do PCM

T_{fus}, T_i, T_f = temperatura de fusão, temperatura inicial, temperatura final (°C)

$$x = \frac{m_{liq}}{m}$$

m_{liq} = massa do PCM que passou ao estado líquido (Kg)

Δh_{fus} = energia necessária para fundir 1 Kg (J/Kg)

c_{sol}, c_{liq} = Calor específico na fase solida, fase liquida (KJ Kg⁻¹ °C⁻¹) (Araújo,2013)

PCM	T _{fus} °C	Δh _{fus} , kJ kg ⁻¹	c _{sol} kJ kg ⁻¹ c ⁻¹	c _{liq} , kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹	ρ _{liq} , kg m ⁻³	ρ _{sol} , kg m ⁻³
Água	0	333.6	2.05	4.186	917	1000
LiClO ₃ . 3H ₂ O	8.1	253			1720	1530
Na ₂ SO ₄ -10H ₂ O	32.4	251	1.76	3.32	1460	1330
Na ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O	48	200	1.47	2.39	1730	1665
NaCH ₃ COO.3H ₂ O	58	180	1.9	2.5	1450	1280
Ba(OH)2.8H ₂ O	78	301	0.67	1.26	2070	1937
Mg(NO ₃).6H ₂ O	90	135	1.56	3.68	1636	1550
LiNO ₃	252	530	2.02	2.041	2310	1776
C ₁₂ H ₃₀	5.9	228			825	771
PCM	T _{fus} °C	Δh _{fus} , kJ kg ⁻¹	c _{sol} kJ kg ⁻¹ c ⁻¹	c _{liq} , kJ kg ⁻¹ °C ⁻¹	ρ _{liq} , kg m ⁻³	ρ _{sol} , kg m ⁻³
C ₁₈ H ₃₈	28.2	244	2.16		814	774
Acido Laurico	49	178	1.76	2.27	1007	862
Acido esteárico	69.4	199		2.35	941	847

Tabela 4 – Propriedades de alguns PCM (Araújo, 2013)



A título de exemplo, para um volume de água 300l à pressão atmosférica, submetida a uma variação de temperatura de -10 para 10 °C, a energia armazenada será calculada da seguinte forma:

$$m = 300 \text{ Kg}$$

$$c_{liq} = 4.186 \text{ KJ Kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$c_{sol} = 2.05 \text{ KJ Kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$\Delta h_{fus} = 333.6 \text{ (J/Kg)}$$

$$T_{fus} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$E_{arm \text{ sol}} = 300 * 2.05 * (0 - (-10)) = 6150 \text{ kJ}$$

$$E_{arm \text{ liq}} = 300 * 4.189 * (10 - 0) = 12567 \text{ kJ}$$

$$E_{arm \text{ fus}} = 1 * 300 * 333.6 = 100080 \text{ kJ}$$

$$E_{total.arm} = 6150 + 12567 + 100080 = 118.8 \text{ MJ}$$

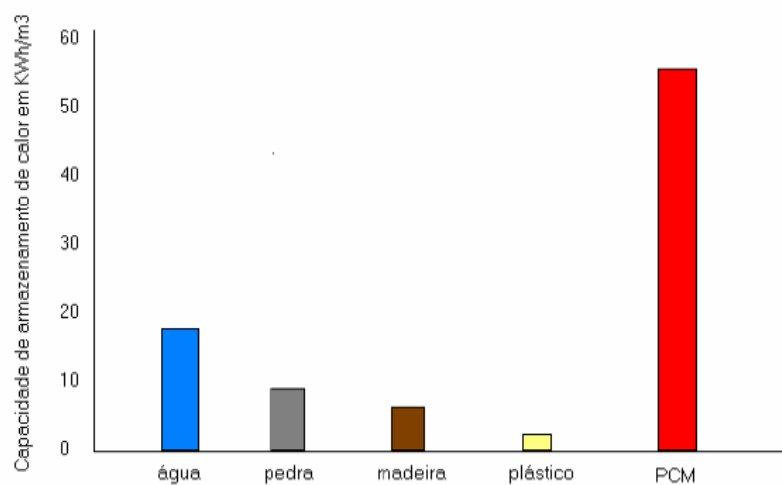


Gráfico 3- Capacidade de armazenamento de calor dos PCM (Monteiro, *et al.*, 2005)

No caso de uma argamassa a que seja adicionado a cada m³, 0,15m³ de PCM encapsulado, com a temperatura deste material a variar de 10 a 35°C, poderemos chegar



ao valor da energia armazenada, ao calor específico da mistura e ao calor latente específico da mistura.

Propriedades da argamassa:

$$\rho_{\text{arg}} = 2000 \text{ kg m}^{-3}$$

$$c_{\text{arg}} = 900 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Propriedades do PCM:

$$T_{\text{fus}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta h_{\text{fus}} = 250 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$\rho_{\text{PCM}} = 800 \text{ kg m}^{-3}$$

$$c_{\text{pcm}} = 2500 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$V_{\text{arg}} = 1 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{PCM}} = 0.15 \text{ m}^3$$

$$m_{\text{arg}} = \rho_{\text{arg}} V_{\text{arg}} = 2000 \text{ kg m}^{-3} * 1 \text{ m}^3 = 2000 \text{ kg}$$

$$m_{\text{PCM}} = \rho_{\text{PCM}} V_{\text{PCM}} = 800 \text{ kg m}^{-3} * 0,15 = 120 \text{ kg}$$

$$m = m_{\text{arg}} + m_{\text{pcm}} = \rho_{\text{arg}} V_{\text{arg}} + \rho_{\text{arg}} V_{\text{arg}} = 2000 \text{ kg} + 120 \text{ kg} = 2120 \text{ kg}$$

Fração mássica de argamassa:

$$X_{\text{arg}} = \frac{m_{\text{arg}}}{m} = \frac{2000 \text{ kg}}{2120 \text{ kg}} = 0.943$$

Fracção mássica de PCM:

$$X_{\text{pcm}} = \frac{m_{\text{PCM}}}{m} = \frac{120 \text{ kg}}{2120 \text{ kg}} = 0.056$$

✓ Energia armazenada por kg da mistura:



$$E_{arm} = \frac{E_{sen} + E_{lat}}{m} = \frac{m_{arg} c_{arg} (T_f - T_i) + m_{PCM} c_{PCM} (T_f - T_i) + m_{PCM} \Delta h_{fus}}{m} \quad (\text{equação 2.2.5})$$

$$= x_{arg} c_{arg} (T_f - T_i) + x_{PCM} c_{PCM} (T_f - T_i) + x_{PCM} \Delta h_{fus}$$

$$= 0.943 \times 900 \times 10^{-3} \text{ kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times (35 - 10)^\circ\text{C}$$

$$+ 0.056 \times 2500 \times 10^{-3} \text{ kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} * (35 - 10)^\circ\text{C}$$

$$+ 0.056 * 250 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$= 21.217 \text{ kJ kg}^{-1} + 3.5 \text{ kJ kg}^{-1} + 14 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$= 21.217 \text{ kJ kg}^{-1} + 3.500 \text{ kJ kg}^{-1} + 14 \text{ kJ kg}^{-1}$$

$$= 38.717 \text{ kJ kg}^{-1}$$

✓ Calor específico da mistura:

$$C = \frac{E_{sen}}{m \Delta T} = \frac{m_{arg} c_{arg} (T_f - T_i) + m_{PCM} c_{PCM} (T_f - T_i)}{m (T_f - T_i)} = x_{arg} c_{arg} + x_{PCM} c_{PCM}$$

(equação 2.2.6)

$$= 0.943 * 900 \text{ j kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} + 0.056 \times 2500 \text{ j kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$= 988.700 \text{ j kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

✓ Calor latente de fusão específico da mistura:

$$\Delta h_{fus} = \frac{E_{lat}}{m} = \frac{m_{PCM} \Delta h_{fus}}{m} = x_{PCM} \Delta h_{fus} = \quad (\text{equação 2.2.7})$$

$$0,056 * 250 \text{ kJ Kg}^{-1} = 14 \text{ j kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

(Araújo, 2013)

2.2.2.2 – Condutibilidade e convecção térmica

Condutividade é a capacidade de um material conduzir a energia térmica por segundo (J/s = 1 watt) e proporcionar calor que pode ser traduzida por uma constante λ e é medida em watt por metro Celcius [W/(m·°C)]. O inverso da condutividade térmica é a resistência térmica (1/ λ). Existem fatores que influenciam a condutividade de cada material, a sua densidade e o seu estado. A uma temperatura constante de 0°C, a água em estado



sólido possui uma condutividade térmica de $2.18 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, após derreter e passar a estado líquido a água passa a ter uma condutividade térmica de $0.58 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, esta diferença de valores deve-se essencialmente à densidade do material que diminui do estado sólido para o líquido pois a distância entre os átomos aumenta o que faz com que diminua o choque entre átomos no interior da molécula.

Nas construções, a condutividade térmica vem associada à resistência térmica do edifício, o objetivo número um é isolar o interior do exterior, de modo a que se mantenha uma temperatura constante de conforto no interior do edifício e não sofra as oscilações da temperatura exterior prevenindo ganhos ou perdas térmicas indesejadas, aqui a condutibilidade entra em ação, quanto menor for o valor da condutibilidade de um material, mais isolador ele se torna e quanto maior for o valor da sua condutibilidade, maior será a sua capacidade de transferência térmica.

A função dos PCM nas construções é de compensar as oscilações bruscas da temperatura ambiente interior derivado ao ambiente exterior, a sua função não é isolar mas sim de conduzir calor, absorvendo ou restabelecendo. Na tabela 5 pode-se observar os valores de condutividades das parafinas.

Outro dos mecanismos de transferência de calor para além da condução é a convecção. A transferência de calor por convecção envolve a troca de energia entre fluidos líquidos ou gasosos que estão em movimento e objetos sólidos desde que haja um gradiente térmico.

O gradiente térmico entre o qual o calor é transferido por sua vez depende da velocidade do fluido. (Gonçalves, *et al.*, 2011)

A expressão da convecção é dada pela seguinte expressão.

$$q = hA(\Delta T) \quad \text{(equação 2.2.8)}$$

Em que:

q – Taxa de transferência de calor ou potencia calorífica [W]

h – Coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W.m}^{-2}.\text{°C}^{-1}$]

A – Área perpendicular à direção do fluxo de calor [m^2]



ΔT – Variação de temperatura entre a superfície e a temperatura do fluido [$^{\circ}\text{C}$]

Composto	Intervalo de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	Condutividade térmica (W/m.K)	Densidade (Kg/L)
Parafinas C13-C24	22-24	0.21(sólido)	0.760 (líquido, 25°C), 0.900(sólido, 20°C)
Parafinas C20-C33	48-50	0.21(sólido)	0.769 (líquido, 70°C), 0.912(sólido, 20°C)
Parafinas C22-C45	58-60	0.21(sólido)	0.795 (líquido, 70°C), 0.920(sólido, 20°C)
Parafinas C21-C50	66-68	0.21(sólido)	0.830 (líquido, 70°C), 0.930(sólido, 20°C)
Poliglicol E600	22	0.189(líquido, 28.6°C) 0.187(líquido, 67°C)	1.126 (líquido, 25°C), 1.232(sólido, 4°C)
Poliglicol E6000	66	n.d.	1.085 (líquido, 70°C), 1.212(sólido, 25°C)

Tabela 5 – Condutividade térmica das parafinas, adaptado de L. Cabeza, *et al.*, (2005)

Um estudo feito à condutividade térmica dos microPCMs veio demonstrar que a condutividade térmica das microcápsulas aumenta à medida que a percentagem de PCMs no seu interior aumenta, como demonstrado na tabela 6.

MicroPCM com capsula de epoxy	Concentração de PCM em volume	Condutividade efetiva (W/m K)
E-0	0%	0.405
EM-1	10%	0.409
EM-4	20%	0.52
EM-7	30%	0.545

Tabela 6 – Aumento da condutividade, aumentando a concentração de PCM, adaptado de Su, *et al.*, (2011)

2.3– Aplicação à construção

As soluções disponíveis no mercado internacional para a construção civil, como foi mencionado, baseiam-se em argamassas prontas que incorporam percentagens de componentes de PCM, placas pré-fabricadas com PCM contendo gesso ou argila e microcápsulas com PCM de modo a ser possível uma mistura manual com o ligante desejado. Existe também sistemas de rolo que também poderão ser implementados em tetos falsos já existentes.

As razões de escolha de material poderão ser de origem técnica e arquitetónica, dependendo do caso, por exemplo para a correção\melhoria térmica de um edifício já existente ou construção de um edifício novo com um excelente desempenho energético.

Na escolha do material, a escolha acertada do ponto de fusão do PCM garante um melhor funcionamento e partido deste. Tal como referido em 2.2.2, a energia de armazenamento depende de três parcelas que correspondem a dois estados do material



(sólido e líquido) e ao ponto de fusão (onde o armazenamento de energia é bastante considerável).

O local climático de um edifício, a temperatura de conforto e a quantidade de energia que se pretenderá armazenar são variáveis que poderão fazer determinar a escolha do tipo de produto que vai ser utilizado.

2.3.1- Tipos de soluções disponíveis no mercado

2.3.1.1- Placas laminadas ou cartonadas com PCM

Um das soluções apresentadas pela BASF – alemã são placas de gesso, contendo fibras de vidro e microcápsulas com PCM, a sua aplicação é bastante variada, pode ser utilizada como a tradicional placa de gesso cartonado para paredes, tetos e divisórias.

A nível de funcionamento térmico, a BASF disponibiliza placas incorporadas com PCM com pontos de fusão de 23 e 26°C, as especificações seguem-se na tabela 7.

Especificação técnica	
Medidas:	
Espessura	15 mm
Largura	1250 mm
Altura	2000 mm
Peso	12.5 kg/m ²
Capacidade de carga (transversal e paralela)	0,4 kN, 0,3kN
Térmica:	
Temperatura de operação	23°C ou 26°C
Calor latente Δh	330 kJ/m ²
Capacidade de armazenamento	1.20 kJ/kg. °C

Tabela 7 – Especificação técnica Micronal PCM Smartboard adaptado de Micronal, (2013)

Como se pode observar na tabela 8, a capacidade de armazenamento de energia e a capacidade de calor latente do Pladur com PCM é bastante superior face ao pladur convencional ou outros materiais.



Parâmetro	Micronal PCM SmartBoard 23\26	Pladur convencional
Temperatura de operação	23°C ou 26°C	-
Calor latente Δh	330 kJ/m ²	0 kJ/m ²
Capacidade de armazenamento	1.20 kJ/kg. °C	0.85 kJ/kg. °C
Condução térmica l ³	0.18 W/m. °C	0.19 W/m. °C

Tabela 8 – Comparação entre uma placa contendo PCM e outra sem PCM (EN 12664) adaptado de Micronal, (2013)

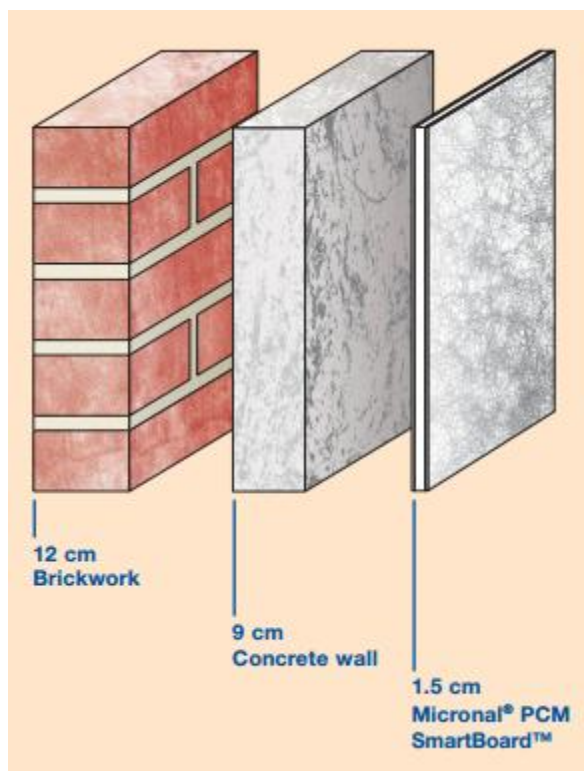


Figura 10 – Representação esquemática de capacidade de armazenamento igual para espessuras diferentes nos vários materiais (Micronal, 2013)

O painel Painel Dupont Energain é um painel laminado a folha de alumínio contendo parafina, tem características refletoras e de armazenamento de energia. Este painel serve essencialmente para ser colocado em zonas de grande exposição solar. O meio de aplicação é no interior do edifício tal como a placa smartboard.

Os painéis têm uma dimensão de 1.9m por 1.2m e uma espessura de 5mm e as suas especificações podem ser observadas na tabela 9.



Thermal Mass Panels	Unit	Value
Thickness	mm	5.26
Width	mm	1000
Length	mm	1198
Area weight	kg/m ²	4.5
Aluminium thickness (sheet)	μm	130
Aluminium thickness (edges)	μm	75
Thermal properties		
Paraffin loading	%	60
Melt point (paraffin)	°C	21.7
Latent heat storage capacity	kJ/kg	>70
Total heat storage capacity (between 14oC to 30oC)	kJ/kg	>170
Physical properties		
Aluminium sheet delamination force	N/cm	>20
Conductivity solid	W/(m.K)	0.18
Conductivity liquid	W/(m.K)	0.14
Flash Point (paraffin)	°C	148
Aluminium tape	Unit	Value
Descriptive Properties		
Thickness	μm	75
Width	mm	50



Tabela 9 - Especificações técnicas do Painel Dupont Energain (Dupont, 2013)

Construção e montagem:

O processo de execução inicia-se pela fixação e montagem da subestrutura metálica que irá suportar os painéis.

O primeiro passo inicia-se pela marcação no piso e no teto das guias metálicas, utilizando cordão de marcação e nível magnético para coloca-las a prumo. O espaçamento de aparafusamento deve ser a cada 60cm com parafuso e bucha. (Construlink, 2013)

Em seguida são fixados os painéis à estrutura metálica por meio de parafusos auto perfurantes a cada 30cm após isto, vai-se proceder ao tratamento das juntas entre as placas, com massa e fita aconselhadas pelo fabricante, em cada 15m lineares de painel, é deixado uma junta de expansão térmica.



Os painéis devem ser fixados de forma desencontrada, isto é, iniciando com uma placa completa numa extremidade e na outra extremidade com uma placa incompleta de modo a originar amarração entre placas como demonstrado na seguinte figura.



Figura 11 – Desencontro entre placas (Construlink, 2013)

Para o corte de placas deve ser utilizado um estilete. Não é aconselhada uma serra elétrica devido à quantidade de poeira que é libertada.

No interior, entre os painéis e a parede de alvenaria pode ser colocada lã de vidro ou outro tipo de isolamento, para melhorar a nível acústico e térmico a parede.

Para acabamento final, pode ser utilizado tinta ou papel de parede.

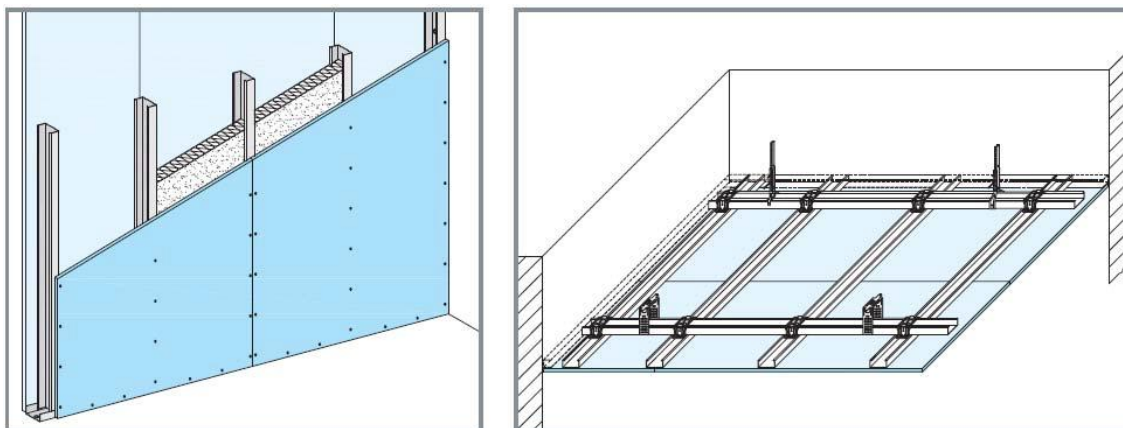


Figura 12 – Esquema de montagem (Dupont, 2013)



Vantagens	Desvantagens
Necessidade de menos mão-de-obra	Mão-de-obra especializada
Baixo peso	Resistência mecânica a cargas pontuais limitada
Adaptável a qualquer suporte (betão, madeira, aço e tijolo)	Barreira cultural entre o construtor e consumidor
Aumento da capacidade de armazenamento de energia do edifício, valor acrescentado.	Limitação à percentagem de PCM nas placas
Redução dos consumos energéticos	Custo inicial
Polivalência na utilização dos espaços, utilização temporária	Limitação de temperaturas de funcionamento
Retardamento da condensação superficial	
Ótimo acabamento	

Tabela 10 – Vantagens e desvantagens PCM Smart Board\Painel dupont energaint

2.3.1.2 - Argamassas prontas com PCM

O weber mur maxit clima é um produto exclusivo no mercado Alemão e tem como objetivo ser utilizado para reboco. Tal como o anterior Knauf – PCM Smartboard é composto por microcápsulas com PCM na ordem dos 5µm com um ligante à base de gesso.

Trata-se de uma argamassa seca aditivada para melhor trabalhabilidade, que é fornecida em sacas de 20kg que basta ser misturada com água a uma percentagem indicada pelo fornecedor e fica pronta para a sua aplicação.

O método de aplicação pode ser tradicional ou através de reboco projetado, ou seja pode ser misturado com água manualmente ou utilizando uma máquina para mistura e projeção.

A nível de amplitude de temperaturas de fusão existem também duas opções, 23 e 26°C e a sua utilização é meramente para interiores, apresentado uma baixa condutividade e uma resistência significativa como se observar na tabela 11.



Resistência à compressão	$\geq 1.5 \text{ N / mm}^2$
Condutividade térmica I	$> 0.3 \text{ W / m.K}$
Resistência à difusão de vapor de água μ	10

Tabela 11 - Dados técnicos Weber mur clima adaptado de Weber Saint-Gobain (2013)

Construção e montagem:

O processo inicia-se pela marcação e aprumo das tábuas de solho nos vãos, de modo a deixar para o exterior apenas a espessura pretendida de reboco. O acerto entre vãos é feito com fio-de-prumo colocados nas extremidades das paredes de uma ponta à outra, conferindo uma distância ao suporte sempre constante.

De seguida, procede-se à mistura da argamassa seca com água, segundo a especificação do fornecedor, 19l por cada 30kg, procede-se à aplicação ao suporte com uma espátula ou em projeção seguindo-se o alisamento com uma régua.

Após o endurecimento e antes da secagem pode ser aplicada argamassa de acabamento, aconselhado pelo fabricante weber.mur 659 (argamassa à base de gesso sem componentes de PCM) até ao máximo de uma espessura de 3mm.



Figura 13 – Aplicação do reboco (Weber Saint-Gobain, 2013)

Considerações gerais sobre aplicação e armazenamento:

A temperatura ambiente mínima para aplicação da argamassa é de 5°C.

Não podem ser utilizadas tintas à base silicato sobre o suporte.

(Weber Saint-Gobain,2013)



Vantagens	Desvantagens
Não necessita de mão-de-obra especializada	Custo
Pode ser utilizado em máquinas para projeção (indicativo do fornecedor)	Limitação dos pontos de fusão do PCM em 23 e 26°C
Argamassa previamente testada pelo fornecedor segundo as normas técnicas	Resistência menor
Bom acabamento	Acesso ao produto em território nacional limitado
Características térmicas melhoradas	
Retardamento da condensação superficial	

Tabela 12 - Vantagens e desvantagens do maxit clima

2.3.1.3- PCM em pó ou em solução aquosa

Este produto fornecido pela BASF alemã, trata-se de um aditivo que pode ser adicionado a uma argamassa e conferir-lhe um melhor comportamento térmico. Este aditivo é composto por microcápsulas de polímero com parafina no seu interior, as gamas de temperatura disponíveis são de 21, 23 e 26°C. A serie 5000 fornece aditivos que podem ser adicionados na forma dissolvida à argamassa ou na forma de pó. Como se pode observar na tabela 13.

O fato de este produto ser vendido como aditivo, permite ser utilizado em qualquer argamassa, seja para reboco ou alvenarias, juntamente com cal, cimento, gesso, areia e água.



Figura 14 - MICRONAL DS, serie 5000 (Micronal, 2013)



Designação do produto	Tipo de Produto	Temp. de fusão	Aplicação	Temp. de operação	Cap. de Armazenamento
DS 5000	Dispersão 42%	26°C	Verão com calor excessivo	10-30°C	59kJ/Kg
DS 5007	Dispersão 42%	23°C	Estabilização da temp. Interior na zona de conforto	10-30°C	55kJ/Kg
DS 5030	Dispersão 42%	21°C	Arrefecimento da superfície	10-30°C	51kJ/Kg
DS 5001	pó	26°C	Verão com calor excessivo	10-30°C	145kJ/Kg
DS 5008	pó	23°C	Estabilização da temp. Interior na zona de conforto	10-30°C	135kJ/kg
DS 5029	pó	21°C	Arrefecimento da superfície	10-30°C	125kJ/kg

Tabela 13 – Especificações técnicas dos aditivos (Micronal, 2013)

Outra das características principais deste aditivo, para além da gama de temperaturas ser maior, permite também variar a percentagem de aditivo que se pode utilizar, podendo-se chegar a um bom compromisso entre a energia armazenada e as restantes características da argamassa, permitindo um leque de aplicações muito superior. Contudo é necessário ensaiar a argamassa antes de ser aplicada ou já ter uma boa experiência de utilização.

Preparação e aplicação:

Alguns estudos indicam, que a melhor maneira de se tirar partido deste tipo de argamassas é na sua utilização como argamassa de acabamento para reboco, aplicado diretamente sobre o reboco de modo que as trocas energéticas entre o ambiente interior e o PCM sejam mais notórias, com espessuras em torno de 1mm. (Monteiro, *et al.*, 2005)

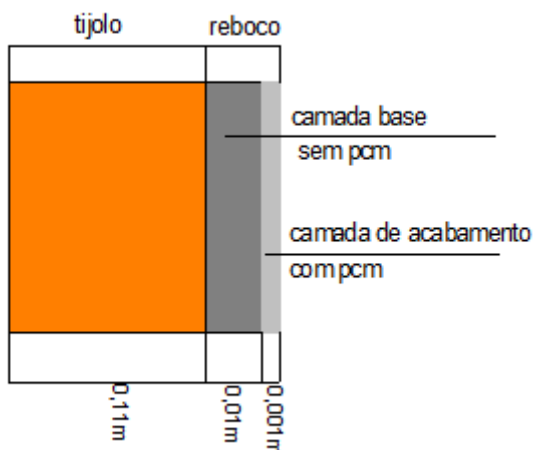


Figura 15 - Pormenor de aplicação de argamassas com PCM (Monteiro, *et al.*, 2005)

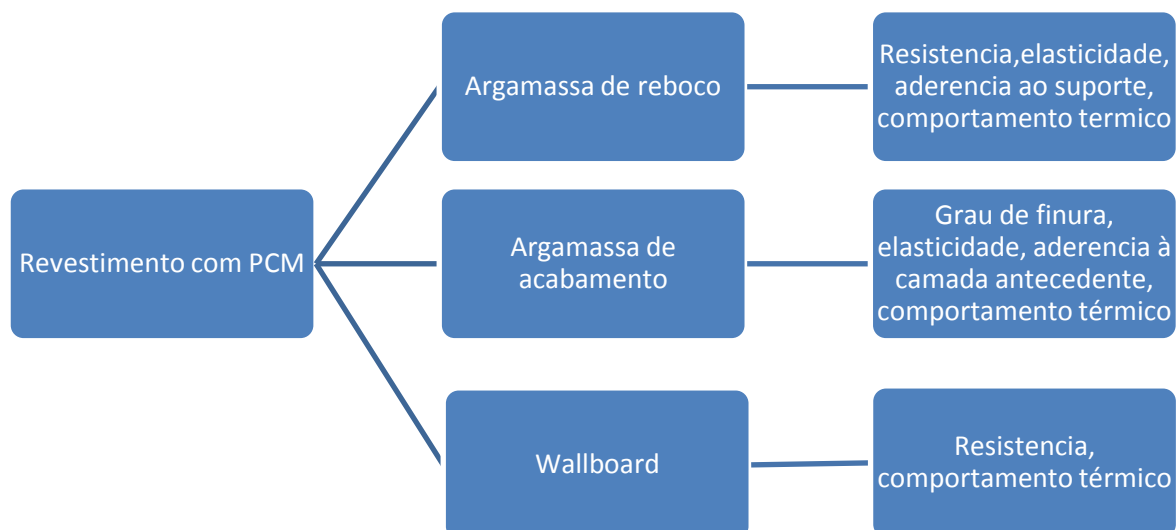
Vantagens	Desvantagens
Não necessita de mão-de-obra especializada	Custo associado do material
Maior gama de temperaturas de fusão	Pouco conhecimento na utilização de outros ligantes para além do gesso
Possibilidade de adição a varias argamassas	Aumento da concentração de PCM reduz a capacidade resistente
Possibilidade de variar a concentração	Acesso limitado ao produto em território nacional
Possibilidade de escolher a espessura de acabamento	
Retardamento da condensação superficial	

Tabela 14 - Vantagens e desvantagens do micronal DS



2.4 – Argamassas com materiais de mudança de fase incorporadas

2.4.1- Traço ideal para reboco interior



Esquema 1 - Tipos de aplicação de argamassa com PCM

Tal como é referido no capítulo ensaios experimentais, o PCM, pode ser adicionado a qualquer tipo de argamassa com ligante de cal, cimento ou gesso. Aquando da escolha do traço teremos que ter em conta as proporções volumétricas ou em massa do ligante e do agregado além da razão de água e o ligante. O PCM, por sua vez pode ser adicionado na forma seca ou diluída em água segundo uma determinada concentração (dependendo do fornecedor).

A quantidade de água e a razão a/c é muito importante, em resultado de estudos efetuados traduzidos neste documento, sabe-se que a adição de PCM na forma seca, implica um adição extra de água, devido ao fato do grau de finura do PCM vir a absorver a água da amassadura diminuindo a hidratação do ligante. Em termos gerais, a adição de 10% de PCM, implica uma adição extra de 50% de água, como se pode observar no gráfico 19.

Em análise de resultados deparou-se também que a percentagem entre 20 e 30% de PCM, parece ser o valor mais indicado para adicionar a uma argamassa, atingem-se



bons ganhos a nível de comportamento térmico e a resistência e trabalhabilidade não é posta em causa, face a uma argamassa sem PCM. Existe no entanto uma tendência para a utilização de gesso com PCM, sendo que este é o ligante disponível em argamassas prontas da Webber e Basf. As razões poderão ser diversas, das quais poderá ser devido ao seu período de cura reduzido e permitir iniciar a pintura mais cedo, ou por uma questão de tendência construtiva, visto que hoje em dia também se utiliza bastante o pladur, outra será como utilização de argamassa de acabamento tanto para reboco como para wallboard.

2.4.1.1- Ligante

✓ *Cal aérea*

As argamassas à base de cal tal como o gesso estão presentes em todas as épocas construtivas, desde os tempos modernos aos tempos de Vitruvius. Embora existam inúmeros estudos sobre este ligante, hoje em dia, ainda existe alguma insegurança em relação ao seu uso, as argamassas à base de cal, são caracterizadas por terem uma boa trabalhabilidade devido ao seu processo de cura lenta apresentando uma microfissuração ao longo do tempo, já por outro lado a adição de gesso permite melhorar as suas características térmicas, baixando o valor de condução térmica.

Sendo uma argamassa por excelência para reabilitação, pois trata-se de uma argamassa bastante utilizada nos edifícios antigos, a introdução do PCM, vem contribuir para que se possa criar melhorias térmicas na intervenção aos edifícios antigos.

A cal aérea, quando entra no período de endurecimento tem tendência a retrair e a iniciar fissuração. Para que estas fissuras tenham pequenas dimensões, de modo a não serem visíveis é essencial juntar a esta, areia, por exemplo siltosa.

Segundo os ensaios de argamassas à base de cal (Lucas, *et al.*, 2012), a adição de 30% de PCM, veio melhorar as características mecânicas e térmicas, chegando a um melhor compromisso de funcionalidade.

Segundo um estudo feito a argamassas com cal aérea (Lucas, *et al.*, 2010) a argamassa de traço 1:2 (volumétrica) cal aérea com areia siltosa de distribuição granulométrica entre os 240 e 675 μm e tamanho médio de 440 μm , adicionando microcápsulas de PCM (Micronal DS 5008) de tamanho médio 6.2 μm com uma concentração de 30% obteve o



melhor desempenho, nos testes de trabalhabilidade, resistência e comportamento térmico.

✓ *Cimento*

O aparecimento do cimento Portland na construção foi devido essencialmente à necessidade de construção de obras marítimas e fluviais que levou a comunidade de investigação a procurar aglomerantes com características hidráulicas.

A utilização de cimentos para argamassas de reboco, pode ser útil quando estamos presentes em casos de forte abrasividade, nomeadamente em rebocos exteriores, contudo as argamassas à base de cimento, têm tendência a criar fissuras devido a retração nas fases iniciais de cura e endurecimento.

Na elaboração de elementos pré-fabricados, a incrementação de 5% de PCM em cimento, teve bons resultados a nível térmico (Castellón, *et al.*, 2007). Já em relação à resistência mecânica, a inclusão de PCM, provoca uma diminuição drástica (Felix, *et al.*, 2009) aumentando a fissuração devido à cura rápida do cimento e absorção de água por parte do PCM, assim para o cimento a dosagem de utilização de PCM deve ser inferior a 10%.

✓ *Gesso*

O gesso é um dos revestimentos mais usados na construção com utilização em praticamente todos os edifícios históricos de Portugal, ornamentando e decorando. A sua fácil trabalhabilidade e cura rápida, permitiu criar profissões como estucadores pombalinos que apenas se dedicavam a realizar a execução e decoração dos tetos dos edifícios. Hoje em dia, apesar de esta profissão estar praticamente extinta, o gesso ainda continua a ser um material bastante utilizado nos edifícios correntes com a adição de retardadores de presa. Devido às suas características térmicas, acústicas, alta porosidade e baixo peso, é um material que se conseguiu “adaptar” a todas as eras construtivas. O gesso associado ao PCM, demonstrou ser um material que permitiu admitir um variado leque de percentagens de PCM, entre os 10 e os 30% sem comprometer excessivamente as características de resistência, demonstrando reduções de pico máximo e mínimo de temperatura entre os 1.5 e 5°C, e um retardamento dos picos significativos. Existem mais soluções no mercado com PCM e gesso, como argamassas prontas que devido ainda a uma falta de aplicação prática destes materiais na construção pode trazer melhores garantias (garantia do fornecedor) assim como a utilização de placas de gesso com PCM, placas bastante requisitadas nos dias que



correm, devido à multiutilização que hoje em dia se requer nos edifícios. (Jornal do Governo dos Municípios, nº10, 2004)

✓ *Cimento e cal*

A cal foi bastante utilizada como ligante hidráulico e argamassa para revestimentos. Hoje em dia a sua utilização é mais vulgarizada como aditivo a argamassas de cimento. A adição de cal ao cimento, traz vantagens ao nível da plasticidade e retração, permitindo que as argamassas tenham maior capacidade para absorver os movimentos do suporte ou seja absorver maiores deformações sem fissurar caso tivessem só cimento. As argamassas com cal retêm mais água da amassadura aumentando a sua plasticidade, permitindo melhores resultados de aderência ao suporte. (Miranda, 2009)

A nível térmico a utilização de cimento e cal com uma dosagem de 20% tem melhores resultados para o aumento das temperaturas mínimas em relação as máximas. A nível mecânico, registou bons resultados na sua resistência à compressão numa dosagem de 1:1:5 + 20% de PCM. (Miranda, 2009)

✓ *Gesso e cal aérea*

A argamassa de gesso e cal, tal como cimento e cal é considerada uma argamassa melhorada, a adição de cal ao gesso vem permitir ganhos a nível de plasticidade e retenção de água, resultando numa argamassa com uma trabalhabilidade com maior duração, tempos de cura superiores verificando-se menores fissurações e fendilhações. É uma argamassa essencialmente permeável aos vapores de água e pode ser tanto aplicado em revestimentos de paredes interiores para edifícios novos como antigos.

A adição de cal aérea ao gesso com PCM, veio melhorar as resistências mecânicas face a uma argamassa só de gesso.

A nível térmico houve razoáveis melhorias térmicas com 20% de PCM sendo mais notório quando estando em período de arrefecimento com 10% de massa em cal, 7% em gesso, 67% de areia e 17% de PCM. (Lucas, *et al.*, 2010), (Miranda, 2009)

2.4.1.2 – Agregado

O PCM, funciona como agregado numa argamassa. Este pode ser adicionado a uma argamassa padrão, ou substituir uma parte de areia por PCM.



✓ *Areia*

O grau de finura do agregado para uma argamassa de reboco com acabamento liso tende essencialmente a diminuir ao longo das camadas, na primeira camada, o salpico, onde se pretende ganhar aderência ao suporte é utilizado uma areia mais grossa, à medida que se vai progredindo vai-se utilizando um agregado mais fino de modo a que o acabamento se torne mais liso e deste modo haja uma maior aderência entre as camadas, devido ao espaço deixado entre os diferentes diâmetros de areia como se pode verificar da tabela seguinte.

Tipos	Módulo de finura - MF	Utilização
Areia grossa	$MF > 3.3$	Salpico
Areia média	$2.4 < MF < 3.3$	Emboço
Areia Fina	$MF < 2.4$	Reboco

Tabela 15 - Modulo de finura da areia, adaptado de Vieira (2012)

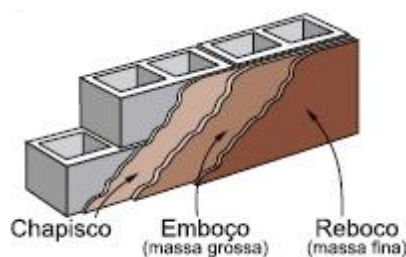


Figura 16 - Camadas de reboco (Ribeiro, 2002)

2.4.1.3 – Água

Para determinar a quantidade de água terá se recorrer ao ensaio de espalhamento (EN 1015-3) até chegar a uma boa relação de a/c, normalmente, este ensaio é uma mais-valia pois permite quantificar a trabalhabilidade da argamassa, os valores de diâmetro de espalhamento para uma argamassa de reboco situam-se entre [160-180mm]. (Vieira, 2012)

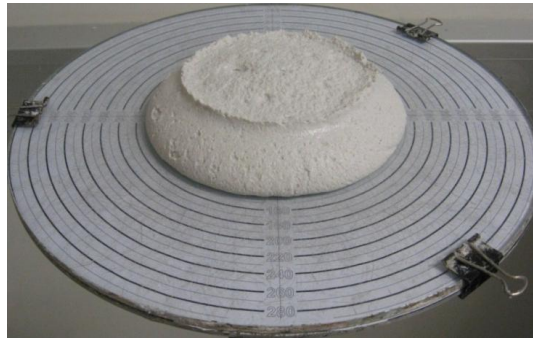


Figura 17 - Ensaio na mesa de espalhamento (Vieira, 2012)

2.4.1.4 – Propriedades

✓ *Resistência mecânica*

A resistência mecânica de uma argamassa com PCM, é influenciada por todos os intervenientes na argamassa, agregado, água e ligantes. Ao nível dos ligantes quando estamos perante percentagens iguais, uma argamassa de cimento consegue atingir resistências superiores (flexão e compressão). A percentagem de PCM, contida na argamassa influencia em bastante as resistências, no capítulo 3, os valores onde se conseguiram melhores resultados pelos vários autores situaram-se entre 20 e 30%, superior e inferior a este valor, existem quebras de resistência à compressão e flexão.

✓ *Elasticidade da argamassa*

O módulo de elasticidade confere à argamassa a capacidade de ela absorver os movimentos do suporte antes de ocorrer rutura ou fendilhação. No capítulo 3, verificou-se que a adição de PCM em argamassas padrão diminui em muito o módulo de elasticidade de uma argamassa, segundo Da Silva (2006), os valores do módulo de elasticidade estão relacionados com vários aspetos, a relação de a/c, que quanto maior, implica módulos de deformação mais baixos. O tipo de areia utilizado, que se for composto por uma grande quantidade de material pulverulento (menor dimensão) melhora as características elásticas, por exemplo utilizando areia de britagem.

✓ *Aderência ao suporte*

A aderência ao suporte é uma característica importante de qualquer argamassa para reboco, esta pode ser obtida pelo ensaio “*pull-off*” a aderência ao suporte é geralmente



quebrada por uma maior incorporação de PCM, contudo, ligantes á base gesso obtiveram melhores resultados de adesão ao suporte.

✓ *Fissuração*

A fissuração resultante da combinação entre PCM e ligante aconteceu em todas as argamassas com ligantes de cimento, cal, gesso e cal em junção com 20% de PCM (Lucas, et al., 2010), sendo que foi mais evidente a fissuração em argamassas com ligante de cimento. A argamassa com gesso e cal foi a que demonstrou menor fissuramento como se pode ver na figura seguinte.

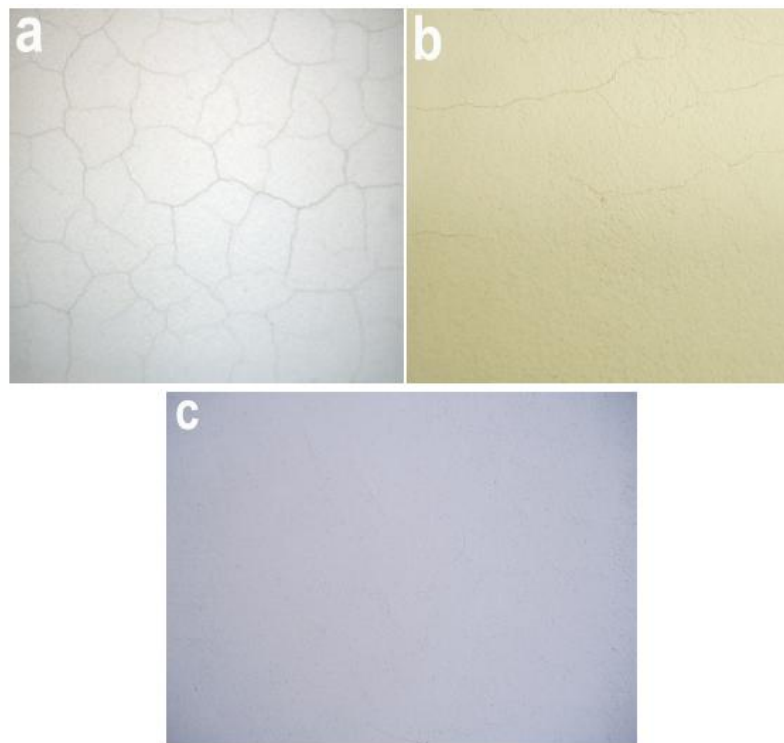


Figura 18 – Fissuração com 20% de PCM a) cimento com PCM b) cal com PCM c) gesso e cal (Lucas, et al., 2010)

✓ *Comportamento térmico*

Como se pode observar na Tabela 36, a percentagem de PCM é o fator que mais contribui no comportamento térmico das argamassas, face as restantes propriedades nomeadamente retração e resistência, situou-se entre os 20 e os 30% quando o ligante é cal e\ou gesso. Contudo em argamassas de cimento, a adição de 5% de PCM, permitiu variações de temperatura na ordem de 2°C, um valor que em algumas análises experimentais com outras argamassas foi idêntico.



✓ *Argamassa para acabamento*

De modo a diminuir a espessura de reboco, o autor Monteiro (2005), propõe a utilização de uma argamassa para fins de acabamento de reboco, assim como a própria webber, com o seu produto webber mur clima. As argamassas à base de gesso com elementos de PCM, conseguem graus de finura de modo a criarem uma pasta fina e com bom acabamento. Permitindo uma solução mais económica devido à utilização de uma menor espessura, apresentando também melhorias térmicas de uma forma notória como se pode observar na Tabela 36.

2.4.2 – Compatibilidade com outros materiais

Como referido anteriormente, as microcápsulas de PCM podem ser utilizadas junto de qualquer ligante. Na utilização de argamassas de reboco interior, tem que se ter em conta os materiais que vão estar na envolvente da camada de reboco, de modo a que se possa potencializar os efeitos pretendidos. A camada de reboco interior com PCM, realiza trocas energéticas entre o ar interior e os elementos da parede envolvente, (parede de alvenaria, bloco de cimento, estrutura de cimento). Assim, deste modo, quando se utiliza outro material sobre a camada de reboco com PCM, poderá se estar a reduzir o efeito de transferência de energia, para tal a seleção de tintas com alta condutividade térmica permitirá potencializar o processo de transferência de energia. A própria argamassa, envolvente poderá influenciar de algum modo a capacidade de transferência de energia, assim, terá que se encontrar um equilíbrio entre a condutividade e a quantidade de energia armazenada. (Weber Saint-Gobain, 2013)

Na opinião geral da comunidade científica, existe uma grande compatibilidade das microcápsulas de PCM com a maior partes dos materiais, contudo o fabricante de argamassas com PCM indica que será de evitar o uso de materiais à base de silicato. Será interessante num estudo futuro sobre os efeitos da compatibilidade com tintas à base de silicato e a sua compatibilidade com as microcápsulas de PCM.

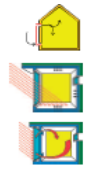






2.4.3 – Utilização em edifícios

Os edifícios podem ser constituídos por sistemas ativos e/ou passivos de aquecimento e arrefecimento. Os sistemas ativos em edifícios são sistemas que transformam a energia elétrica fornecida em energia calorífica, de modo a regularizar a temperatura interior dos edifícios, por ex.: pisos radiantes, AVAC e ventoinhas ou seja são sistemas artificiais. Por outro lado os sistemas passivos são sistemas que não requerem energia elétrica para o seu funcionamento, são sistemas que contribuem para o arrefecimento e aquecimento de



uma forma natural como por ex.: colunas de ar, ventilação natural, isolamentos térmicos e PCMs, tirando partido de várias estratégias indicadas no quadro seguinte.

Neste subcapítulo são tratadas aplicações de PCM em edifícios, demonstrando o seu contributo e compatibilidade com outras soluções passivas e ativas a nível de otimização térmica.

Estação	Estratégias Bioclimáticas	Sistemas Passivos	
Inverno - estação de aquecimento	Promover ganhos solares	Todos os sistemas de ganho são adequados para os tipos de edifícios mais convenientes	
	Restringir perdas por condução	Isolamento da envolvente	
	Promover inercia forte	Paredes pesadas com isolamento pelo interior.	
Verão - Estação de arrefecimento	Restringir ganhos solares	Sombreamento de envidraçados	
	Restringir ganhos por condução	Isolamento da Envolvente exterior	
	Arrefecimento evaporativo	Ventilação com pequenas velocidades de ar através de fontes e espelhos de água	
	Ventilação	Ventilação	Ventilação transversal (noturna)
Tubos enterrados			




	Promover inercia forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior.	
--	------------------------	---	---

Tabela 16 - Sistemas passivos. (Gonçalves, et al., 2004)

✓ 3 liter house

O 3 liter house, foi um projeto de reabilitação de um edifício situado em Ludwigshafen na Alemanha (clima continental, com invernos rigorosos) construído em 1951 sobe autoria da Luwoge's onde foram implementados os mais recentes materiais de isolamento térmico e técnicas no que toca ao comportamento térmico, assim como células energia de modo a que o edifício consiga produzir a energia necessária para o seu funcionamento. O interesse neste trabalho foi a possibilidade de demonstrar que um edifício antigo pode ser termicamente eficiente e autossustentável, tendo um consumo de apenas 3 litros de óleo de aquecimento por metro quadrado ao ano. Depois de reabilitado o edifício foi monitorizado durante 3 anos por uma universidade. Os resultados foram bastante satisfatórios, as melhorias no edifício corresponderam a uma poupança energética de 85%. (Schubert, 2005)

As Principais alterações do ponto de vista energético:



Figura 19 - Painéis NEOPOR da BASF, isolante da parede exterior. (Schubert, 2005)

Janelas com vidros triplos, de alta qualidade contendo gás inerte no seu interior contribui para que se baixasse o valor da condutividade térmica das janelas, diminuindo assim as



perdas e ganhos térmicos no inverno\verão, com condutibilidades na ordem dos $0,8\text{W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$. (Schubert, 2005)

Painéis fotovoltaicos na cobertura, contribuíram para que o edifício necessitasse de menos energia da rede elétrica, tendo deste modo a sua própria fonte energética através de energia fotovoltaica. Trata-se de um sistema de autoconsumo, ou seja a energia produzida é fornecida diretamente ao sistema elétrico da casa que poderá alimentar o sistema AVAC para arrefecimento\aquecimento ou qualquer outro aparelho elétrico em utilização. (Schubert, 2005)



Figura 20 - Aplicação de reboco com PCM. (Schubert, 2005)

Aplicação de reboco monocamada, com PCM nas divisões para ocupação usando uma temperatura de funcionamento entre os 22 a 26°C



Figura 21 - Sistema AVAC com recuperador de calor. (Schubert, 2005)



Figura 22 - Célula de produção energética a hidrogénio. (Schubert, 2005)

Este edifício é dotado das mais inovadoras soluções de geração de energia, utilizando uma célula de produção que através de uma reação eletroquímica entre o hidrogénio e o oxigénio do ar obtém-se energia elétrica e água como produtos finais. Este sistema, consegue produzir até 30% das necessidades de aquecimento (aquecimento de água e fornecimento de energia elétrica). Ainda quando não estivesse a ser utilizada esta energia era diretamente depositada na rede elétrica pública, resultando assim também numa fonte de rendimento. (Schubert, 2005)

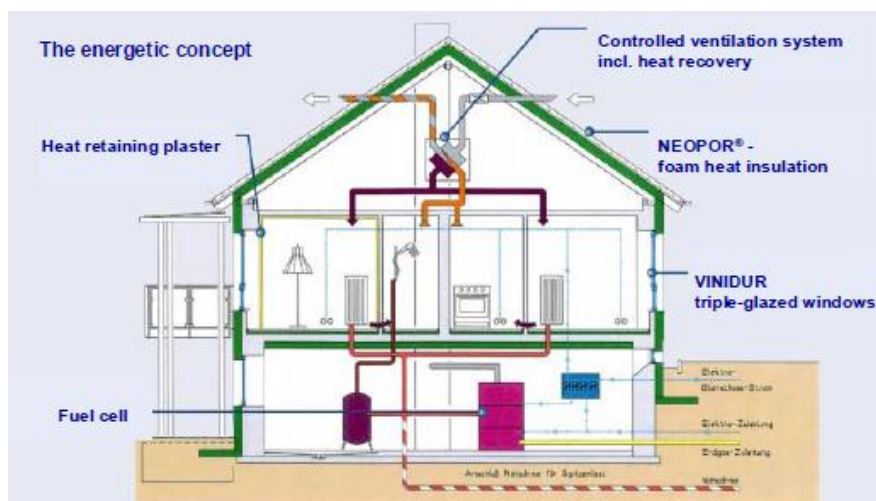


Figura 23 - Esquema com as várias soluções propostas. (Schubert, 2005)

O edifício em questão, com uma área total útil de 699m², foi sujeito a vários tipos de intervenção de modo a que se pudesse fazer uma análise mais alargada de vários graus de investimento face às poupanças energéticas. Assim a reparação geral, tal como o nome indica tratou-se apenas de uma reparação dos elementos existentes. A



modernização geral, consistiu em alterar o edifício para padrões de exigência atuais. Acrescentado, três padrões de consumo de energia para aquecimento.

Tipo de Intervenção	Custos €/m ²	Detalhe
Reparação geral	267 €	Remodelação da envolvente do edifício, remodelação elétrica Remodelação das WC's, renovação da varanda e escada.
Modernização geral	502 €	Remodelação interior, incluindo demolição e construção de novas paredes, novo chão, modernização e instalação de aquecimento central, ampliação e renovação de portas e janelas, renovação das varandas
Intervenção energética		
Consumo de 7 litros	108 €	Instalação de isolamento térmico na parede exterior, cobertura e teto com 10cm de espessura, janelas com $U=1,4W.m^2\backslash K$
Intervenção energética		
Consumo de 5 litros	201 €	Instalação de isolamento térmico na parede exterior, cobertura, teto e cave com 20cm de espessura, janelas com $U=1,4 W.m^2\backslash K$, sistema de ventilação controlada com recuperação de 75% do calor, tratamento de algumas pontes térmicas e estanquidade.
Consumo de 3 litros	517 €	Instalação de isolamento térmico na parede exterior, cobertura, teto e cave com 20cm de espessura, janelas com $U=0,8 W.m^2\backslash K$, sistema de ventilação controlada com recuperação de 85% do calor, tratamento amplo das pontes térmicas e estanquidade.

Tabela 17 - Intervenção no edifício de 1950. (Sabine, et al., 2002)

Objetivo de remodelação	Custos totais de remodelação €/m ²	Custos para eficiência energética €/m ²	Percentagem do custo para eficiência energética %	Custo do isolamento térmico aplicado em €/m ²
Casa de 3 litros	1286	517	40	84
Casa de 4 litros	970	201	21	84
Casa de 7 litros	877	108	12	70

Tabela 18 - Parcelas de intervenção adaptado de Sabine, et al., 2002



Como se pode observar, a redução de 3 litros de combustível dos 7 litros corresponde a um investimento de quase o dobro para melhorar a eficiência energética, para chegar ao valor de 3 litros a redução de apenas um litro face ao consumo de 4 litros, fica a mais 316€/m², correspondendo a um investimento de 40% do valor total da reabilitação. (Sabine, et al., 2002) Por outro lado, a diferença de 108€/m² entre a casa de 7 litros e a de 4 litros corresponde também á implantação do sistema AVAC, já em relação ao isolamento térmico a diferença de usar o isolamento térmico NeoPor de 10cm de espessura e o de 20cm é 14€/m². O uso de isolamento de 20cm nas paredes exteriores e 10cm na cobertura, permitiu que houvesse uma poupança anual de 215kWh/m², ou 6500€. A alteração das janelas do tipo vidro simples para janelas com vidro duplo de boa qualidade, permitiu poupanças na ordem dos 35kWh/m².

O gráfico seguinte, demonstra os ganhos e as perdas térmicas antes e depois da intervenção.

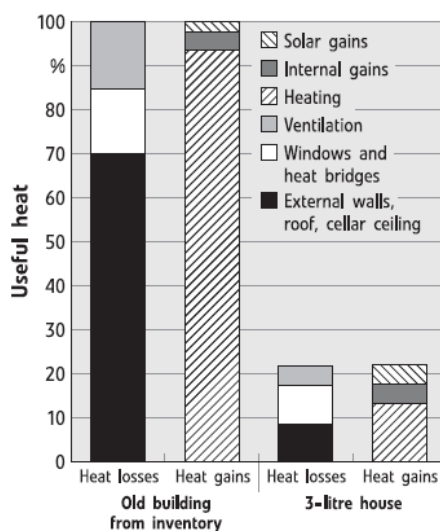


Gráfico 4 - Reabilitação antes e depois. (Sabine, et al., 2002)

O gráfico, mostra consideravelmente uma redução drástica das perdas e ganhos solares na ordem dos 80%, também de constar que a colocação do isolamento térmico nas paredes exteriores e tratamento de pontes térmicas permitiu reduzir as perdas de energia em 63%.



2.5 - RCCTE e materiais de mudança de fase

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios pretende dar resposta às mudanças nos hábitos de consumo de energia dos edifícios e à necessidade de implementação da Diretiva Europeia, publicada a 4 de Janeiro de 2003 em relação à eficiência energética dos edifícios – 2002/91/CE, de 16 de Dezembro de 2002. O objetivo final desta diretiva é a contenção dos consumos energéticos face ao aumento do consumo por parte dos utilizadores que recorrem a sistemas de ar-condicionado e sistemas de ventilação para controlar as condições ambientes interiores dos edifícios, em prol de uma deterioração cada vez maior do meio ambiente.

Em Portugal a atual versão em vigor de 2006 do RCCTE (Decreto – Lei nº 80/2006 de 4 de Abril de 2006) exige que a todas as novas construções de frações autónomas quer sejam de habitação ou edifícios de serviços sem sistemas de climatização centralizados, o licenciamento ou autorização no território nacional de modo a que sejam satisfeitas as exigências relativas ao conforto térmico, à qualidade do ar no interior dos edifícios e às necessidades de águas quentes sanitárias.

O RCCTE divide o país por zonas climáticas impondo diferentes necessidades de arrefecimento e aquecimento em cada estação do ano consoante a localização do imóvel, tendo em conta a sua orientação e exposição solar. Tem em conta também a envolvente do edifício, impõe critérios e necessidades consoante a utilização do espaço, tendo em conta a condutividade térmica das paredes, chão e teto, considerando também a inercia térmica, pontes térmicas e áreas envidraçadas e condições de arejamento fazendo o seu balanço e chegando ao valor das necessidades globais de arrefecimento e aquecimento.

No ponto de vista de aplicação ao RCCTE, a aplicação do PCM em revestimentos é no fundo igual a outro qualquer revestimento no campo da condutividade térmica para quantificar os ganhos e percas térmicas (situação verão\inverno) a percentagem de participação de PCM no ligante, vai contribuir para que o U do revestimento seja um valor ponderado. (Camelo, et al., 2006)

2.5.1- Cálculo da resistência térmica

O cálculo das resistências térmicas segundo o RCCTE é dado pelas seguintes equações;

$$U = \frac{1}{R} \quad \text{(equação 2.5.1)}$$



$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (\text{equação 2.5.2})$$

Em que:

U= Coeficiente de transmissão térmica [W/m² . °C]

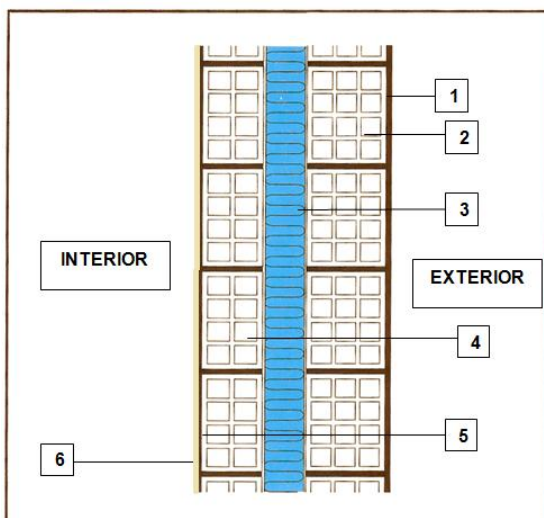
R= Resistência térmica [m².°C/W]

e= Espessura do elemento [m]

λ= Condutibilidade térmica do material [W/m.°C]

Exemplo:

No caso de uma parede exterior dupla com 0.35 m de espessura, composta por reboco exterior com 2.5 cm de espessura + tijolo cerâmico furado 30x20x15 assente em argamassa de cimento e areia + isolamento térmico em placas de poliestireno extrudido (XPS com 40 mm) + tijolo cerâmico furado 30x20x11 assente em argamassa de cimento e areia + revestimento interior em estuque tipo “Seral” (25 mm) + camada de acabamento de estuque do tipo “Seral” (1mm) contendo uma percentagem de 25% de PCM o calculo da resistência e inercia térmica será o seguinte apresentado na tabela 19.



1- Acabamento exterior aderente em reboco (25 mm), incluindo pintura;

2- Pano de alvenaria exterior de tijolo furado 30x20x15 (150 mm);

3- Isolamento – "WALLMATE IB-A" 4 (40 mm);

4- Pano de alvenaria interior de tijolo furado 30x20x11 (110 mm);

5- Acabamento interior aderente em estuque tipo “Seral” (25 mm).

6-Acabamento interior aderente em estuque tipo “Seral” (1mm) contendo 25% de PCM incluindo pintura;

Figura 24 - Esquema da parede. (Grade, *et al.*, 2009)



Na inclusão de 25% capsulas de PCM na argamassa “Seral” o valor da condutibilidade térmica em termos analíticos terá que ser ponderado:

$$\lambda_{pond} = \% \lambda_{seral} + \% \lambda_{pcm} \quad (\text{equação 2.5.3})$$

$$\lambda_{pond} = 0.75 * 0.430 + 0.25 * 0.200$$

$$\lambda_{pond} = 0.75 * 0.430 + 0.25 * 0.200 = 0.373 \text{ [W/m.}^\circ\text{C]}$$

Parede dupla de fachada principal com isolamento térmico a preencher a caixa-de-ar					
Composição da Parede	Referências	e (m)	λ [W/m.°C]	R = e/λ [m².°C/W]	U = 1/R [W/m² . °C]
R _{se} (exterior)	ITE 50 - Q 1.3			0.04	
Composição da Parede	Referências	e (m)	λ [W/m.°C]	R = e/λ [m².°C/W]	U = 1/R [W/m² . °C]
1 - Reboco com argamassa na face exterior da parede com 2,5 cm	ITE 50 - Q 1.2	0.025	1.15	0.022	
2 - Pano de alvenaria exterior em tijolo furado 30x20x15	ITE 50 - Q 1.5	0.15		0.39	
3 - Isolamento térmico tipo "WALLMATE IB-A" 4 cm	TabFab-DOW	0.04	0.035	1.143	
4 - Pano de alvenaria interior em tijolo furado 30x20x11	ITE 50 - Q 1.5	0.11		0.27	
5 - Revestimento interior aderente (estruque tipo "Seral") com 2,5 cm	ITE 50 - Q 1.2	0,025	0,430	0.058	



6 - Acabamento interior aderente em estuque tipo "Seral" (1mm) contendo 25% capsulas de PCM incluindo pintura;	ITE 50 - Q I.2; RUBITHER M® PK	0.001	0.373	0.003	
Composição da Parede	Referências	e (m)	λ [W/m.°C]	R = e/λ [m².°C/W]	U = 1/R [W/m² . °C]
R _{si} (interior)	ITE 50 - Q I.3			0.13	
Total				2.056	0.486

Tabela 19 - Calculo da resistência térmica da parede

2.5.2 - Cálculo da massa superficial útil

$$Msi_{pond} = (\% \lambda Msi_{seral} + \% Msi_{pcm}) * espessura \quad \text{(equação 2.5.4)}$$

$$Msi_{pond} = (0.75 * 1050Kg + 0.25 * 900Kg) * 0.001m$$

$$Msi_{pond} = 1.01[Kg/m^2]$$

2.5.3 - Cálculo da inercia térmica

$$I_{t=\frac{\sum Msi \cdot Si}{Ap}} [Kg/m^2] \quad \text{(equação 2.5.5)}$$

Em que :

M_{s i}= Massa superficial útil do elemento i [Kg/m²]

S_i= Área da superfície interior do elemento i [m²]

A_p= Área útil de pavimento [m²]



2.5.4 - Necessidades de aquecimento\ arrefecimento

✓ *Aquecimento*

As necessidades anuais de aquecimento (N_{ic}) têm em conta as perdas de calor por condução através da envolvente, perdas de calor por renovação do ar, áreas envidraçadas, zonas de contacto entre o pavimento e o terreno, perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício. A nível de ganhos térmicos na estação de aquecimento (Inverno) o RCCTE apenas tem em conta os ganhos uteis através dos equipamentos, ocupantes e ganhos solares uteis. No caso da utilização de revestimentos à base de PCM está previsto no RCCTE a utilização de outras fontes geradores de ganhos uteis de calor desde que justificados. Deste modo os revestimentos com capacidade de armazenamento de energia como o PCM deverão ser contabilizados como elementos que podem gerar ganhos de calor uteis acrescentando a sua participação face aos restantes ganhos (Q_{gu}), visto que o valor de entalpia (capacidade de armazenamento) destes materiais ser notoria relativamente aos restantes materiais, como se pode observar no gráfico 3.

$$N_{ic} = \frac{(Q_t + Q_v + Q_{gu})}{A_p} \text{ [kWh/m}^2\text{]} \quad \text{(equação 2.5.6)}$$

N_{ic} - necessidades anuais de aquecimento;

Q_t - perdas de calor por condução através da envolvente;

Q_v - perdas de calor por renovação de ar;

Q_{gu} - ganhos de calor úteis resultantes da iluminação, dos equipamentos, dos ocupantes e dos ganhos solares úteis através dos envidraçados, PCM;

A_p - área útil de pavimento;

$$Q_t = Q_{ext} + Q_{Lna} + Q_{pe} + Q_{pt} \text{ [kW]} \quad \text{(equação 2.5.7)}$$

Q_{ext} - perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados, coberturas e pavimentos em contacto com o exterior;

Q_{Lna} - perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados e pavimentos em contacto com locais não aquecidos;

Q_{pe} - perdas de calor pelos pavimentos e paredes em contacto com o terreno;



Q_{pt} - perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício;

O cálculo da energia potencial das microcápsulas de PCM, poderá ser quantificada pela capacidade de armazenamento dos PCM como demonstrado no seguinte exemplo considerando haver um ciclo diário de arrefecimento e aquecimento do PCM ou seja que a temperatura de referência 26°C seja ultrapassada inferiormente e superiormente uma vez ao dia.

$\Delta h = 110 \text{ KJ/Kg}$ (Micronal DS 5001)

Se for utilizado por exemplo um quantidade na argamassa de 0.2kg de PCM por m² de superfície de parede.

Então:

$$E_{\text{arm}} = 110 \text{ KJ/Kg} \times 0.2 \text{ Kg/m}^2 = 22 \text{ KJ/m}^2 = 22 \text{ kW/m}^2$$

Conversão para horas:

$$\frac{22 \text{ KW/m}^2}{3600 \text{ s}} = 6.11 \text{ W.h/m}^2$$

Energia total armazenada no interior devido ao PCM:

$$E_{\text{total arm}} = 6.11 \text{ W.h/m}^2 \times \text{Área superficial}_{\text{PCM}} \text{ [W.h]}$$

Aplicação ao regulamento:

$$Q_{\text{gu}} = Q_i + Q_s \text{ [W/m}^2\text{]} \quad \text{(equação 2.5.8)}$$

Q_i – Ganhos internos por área útil do pavimento

Q_s – Ganhos internos solares por área útil do pavimento

$$Q_i = \sum q_i \cdot M \cdot A_p \cdot 10^{-3} \text{ [kW.h]} \quad \text{(equação 2.5.9)}$$



q_i - ganhos térmicos internos médios por unidade de área útil de pavimento (W/m^2), numa base de 24h/dia, todos os dias do ano no caso dos edifícios residenciais, e em cada dia em que haja ocupação nos edifícios de serviços.

M – duração média da estação convencional de aquecimento em meses. (anexo 1)

A_p – área útil de pavimento (m^2)

$$q_{i.pcm} = \frac{E_{total arm}}{A_p} [kW.h/m^2] \quad (\text{equação 2.5.10})$$

✓ *Arrefecimento*

O RCCTE, considera as necessidades nominais de arrefecimento de uma fração autónoma de um edifício, a energia útil necessária para retirar ou manter a temperatura interior nos 25°C durante a estação de arrefecimento nos meses de Junho a Setembro.

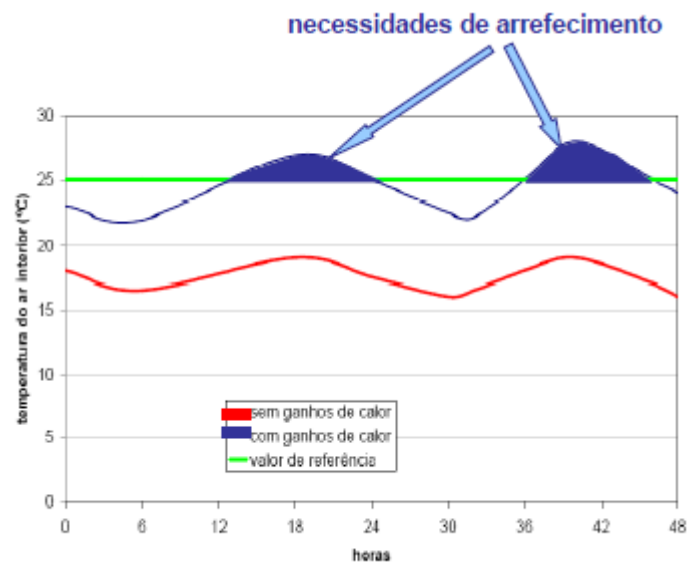


Gráfico 5 - Necessidades de arrefecimento (Costa, 2009)



Cálculo das necessidades de arrefecimento

$$N_{VC} = \frac{Q_g \cdot (1-\eta)}{A_p} \text{ [kW.h/m}^2\text{]} \quad \text{(equação 2.5.11)}$$

Em que:

Q_g - Ganhos totais brutos do edifício ou fração autónoma. [kW.h]

η – Fator de utilização dos ganhos.

A_p – Área útil do pavimento. [m²]

O RCCTE, contabiliza praticamente todas as parcelas como ganhos térmicos na estação de arrefecimento, a única forma que o RCCTE prevê para contabilização de perdas térmicas (arrefecimento) será por via da ventilação (mecânica ou natural) e pela envolvente mas apenas quanto a temperatura exterior se encontra inferior à temperatura de referência para esta estação de 25°C pela parcela de Q_v . Deste modo, quanto menor for o valor de N_{vc} menor serão as necessidades de arrefecimento do edifício. Quanto se realiza a escolha de um equipamento para arrefecimento baseado no valor de N_{vc} , poderemos escolher um equipamento de menor potencia se o nosso edifício contiver elementos de PCM nos revestimentos. Após o cálculo de energia armazenada como exemplificado para a estação de aquecimento, poderá se subtrair este valor ao N_{vc} , pois como se sabe o PCM tem a capacidade de absorver a energia do interior, baixando a temperatura. O contributo dos PCM, a nível do RCCTE não pode ser contabilizado, mas poderá ter se em conta o seu uso para o pré-dimensionamento de um sistema de ar-condicionado. (RCCTE)



3 – AVALIAÇÃO DE CASOS DE EXPERIMENTAIS

3.1- Aplicação de um PCW – Phase change wallboard (gesso) baseado no armazenamento de frio (estação de Verão)

Uma equipa de investigadores na China estudou a variação de temperatura e a capacidade de armazenamento de um PCW, nas paredes interiores de uma casa.

O edifício, localizado na zona nordeste da China, na cidade de Shenyang, caracterizado por ter um clima continental de monções, (Frio e seco de Setembro a Abril, húmido e quente no restante do ano).

A experiência ocorreu entre Julho e Agosto de modo a obter-se maior amplitude térmica.

Foram analisadas duas divisões climatizadas (ar condicionado) com 12m² com 3m de pé direito, uma janela para o exterior com 1,5x1,5m virada a sul e uma porta virada a norte para um wall interior. As paredes exteriores tinham uma espessura de 370mm e as paredes interiores de 240mm. O teto estava isolado termicamente e acusticamente com material de fibra de vidro.

O PCW utilizado era composto por gesso e PCM do tipo orgânico (parafina) com uma dosagem de 24%. A temperatura de fusão do material seria dos 18 aos 24°C.

Foram utilizados termopares para medir as temperaturas na superfície das paredes e a temperatura do ar interior, monitorizando-as ao longo de 24h.

O plano experimental consistiu em ligar o ar-condicionado em modo frio durante as primeiras 5h durante a noite de modo a que houvesse armazenamento de Energia no sentido negativo, mantendo o PCM abaixo da temperatura de solidificação e deste modo, iniciar a absorção de energia ao longo do dia quando as temperaturas fossem mais altas, permitindo que os picos térmicos fossem menores.



Resultados:

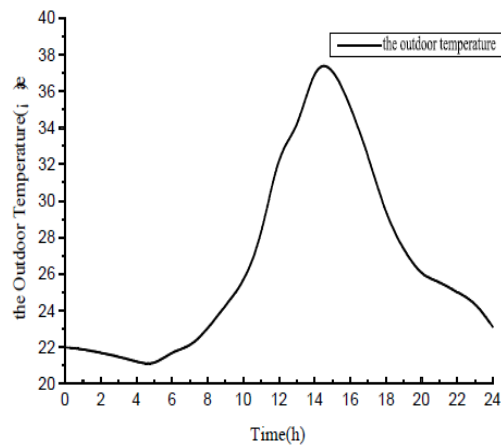


Gráfico 6 - Temperatura exterior (Feng, *et al.*, 2006)

O gráfico 6, mostra a variação de temperatura exterior ao longo do dia, como se pode observar é atingido um mínimo de 20.9°C às 5h e um máximo de 37 °C às 14h. Das 10 às 14h, o crescimento sucedeu-se rapidamente, enquanto que a partir das 15h a temperatura decresceu rapidamente.

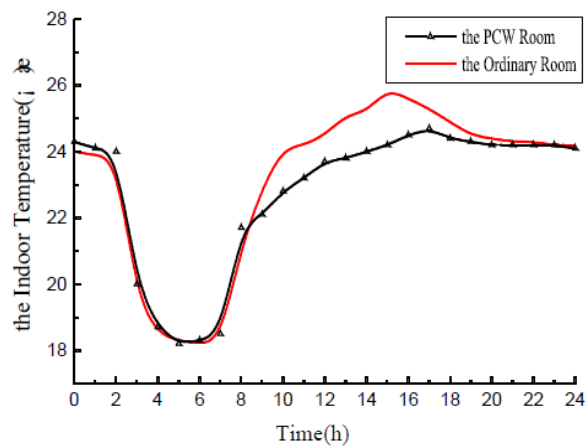


Gráfico 7 - Temperatura interior das divisões (Feng, *et al.*, 2006)

Neste gráfico 7 é possível observar que na sala com placa de gesso sem PCM, é atingido temperaturas mais altas. A temperatura de pico máximo na sala sem PCM também ocorreu mais cedo que a sala com PCW, numa diferença de 2h. Indicador de que, uma sala com PCW não se atinge temperaturas tão altas, obtém-se flutuações mais ligeiras, e há um retardamento na temperatura de pico máximo.

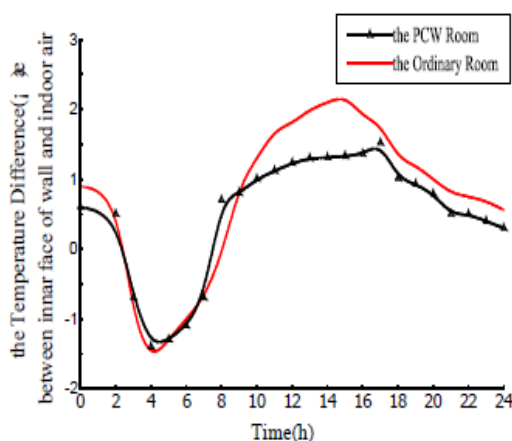


Gráfico 8 - Diferença de temperatura entre ar interior e temperatura da parede (Feng, *et al.*, 2006)

No gráfico 8 é demonstrada a diferença de temperatura do ar interior e a temperatura da parede com e sem PCM. Podemos observar que a temperatura da parede, raramente se encontra à temperatura interior. As diferenças maiores registadas são na parede sem PCM, estando mais fria que o ar interior na altura da noite e por sua vez mais quente durante o dia em relação à PCW. As diferenças maiores obtidas sem PCM, foram -1.5°C e 2.3°C , enquanto com PCW as diferenças maiores foram -1.4°C e 1.3°C . A maior diferença de temperaturas em relação entre o PCW e sem PCM, foi de 1.1°C .

Com esta campanha experimental, estes investigadores concluíram que a diferença da temperatura interior para a temperatura da parede é menor numa parede com PCM. A temperatura máxima do ar interior é menor numa divisão com PCM, chegando a uma diferença de 2°C para a de uma divisão sem PCM.

Como estudado pelos autores Castellón, *et al.*, (2007), Ermolli, *et al.*, (2011), Lucas, *et al.*, (2012) uma parede com PCM, a temperatura de pico atingida é retardada, neste caso com um atraso de 2h em relação a uma parede sem PCM.

Os autores Ermolli, *et al.*, (2011), Origgi, (2011), Monteiro, (2005) chegaram à mesma conclusão de que a utilização de PCM num edifício, permite reduzir os custos ligados ao consumo de energia e aumentar a eficiência energética dos mesmos conseguindo um abaixamento de consumo até $4.6\text{W}/\text{m}^2$. (Feng, *et al.*, 2006)

3.2- Aplicação de microcápsulas com PCM em placas de gesso e blocos de cimento



Uma equipa de investigadores de Espanha estudou a influência das microcápsulas em elementos de cimento. Para tal, construiu dois cubículos em betão com portas e janelas, um contendo microcápsulas de PCM e o outro cubículo sem microcápsulas de PCM. A experiência ocorreu na zona espanhola de Puigverd de Lleida, com um clima típico continental frio e seco no inverno e quente e seco no verão.



Figura 25 - Cubículos em betão (Castellón, *et al.*, 2007)

Os cubículos pré-fabricados foram constituídos por 6 painéis pré-fabricados em betão e unidos entre si (4 painéis laterais, 1 painel de cobertura e 1 painel de pavimento). Os cubículos continham as seguintes dimensões 2.64 x 2.64 x 2.52m e a espessura de cada painel era de 0.12m. Eram constituídos também por 1 janela a este e a oeste com 1.7 x 0.6m (seladas), 4 janelas a sul com 0.75 x 0.4 e uma porta a norte.

O PCM utilizado foi o Micronal da Basf com um ponto de fusão aos 26°C e uma entalpia de 110kJ/Kg, misturado com betão a uma taxa de 5% em apenas 3 painéis (painel sul, painel este e painel de cobertura).

Foram instalados sensores de temperatura no interior dos painéis, no interior dos cubículos, sensores de fluxo térmico na superfície da parede sul assim como uma estação meteorológica no interior.

Foi adicionada uma parede de Trombe no interior das paredes sul no outono e inverno de modo a aumentar a temperatura da parede e aumentar a influência do PCM.

O plano experimental consistiu na análise da temperatura em dias típicos de verão e de inverno, analisando as diferenças de temperatura dos dois cubículos fazendo a sua comparação final, no verão procedeu-se ao arejamento das divisões (um típico



comportamento mediterrânico) e no inverno foi adicionado uma parede interior nos cubículos com vista a ganhos térmicos no interior.

Verão:

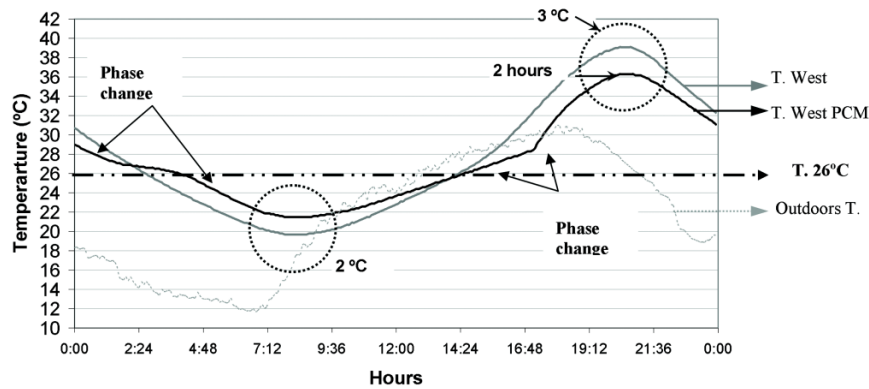


Gráfico 9- Temperatura exterior e temperatura da parede oeste com e sem PCM (janelas fechadas) (Castellón, *et al.*, 2007)

No gráfico 9 é possível perceber que a temperatura máxima exterior de 31°C, enquanto que passado 2h foram alcançadas no interior dos cubículos as temperaturas máximas de 36 e 39°C, com e sem PCM respetivamente, alcançando um diferença de temperatura máxima entre os dois de 3°C. Já na temperatura mínima é observada entre os dois cubículos uma diferença de 2°C. De notar também que ambos os cubículos (com e sem PCM) atingiram os seus máximos após 2h face ao valor máximo no exterior.

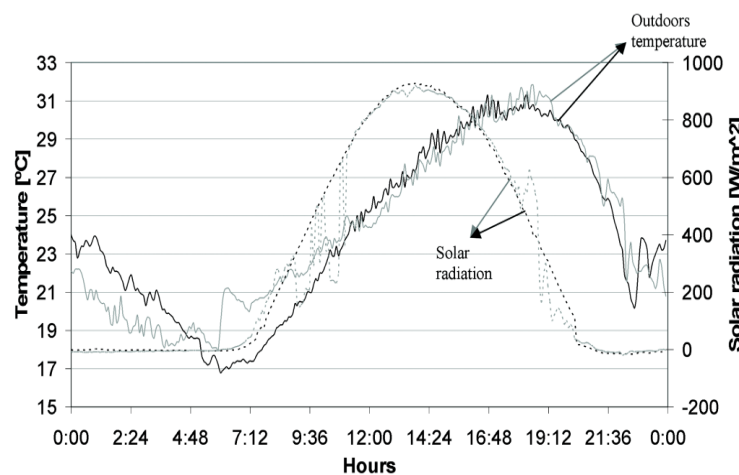


Gráfico 10 - Níveis de radiação solar e temperatura nos dias (05/07/2006 e 28/07/2006) (Castellón, *et al.*, 2007)

No gráfico 10, é possível observar que tanto no dia 5 como no dia 28 os níveis de radiação e temperatura mantiveram-se bastante idênticos.

Foram analisados os três casos seguintes:



Caso 1 (Arrefecimento livre): Abertura das janelas à noite, fecho das janelas durante o dia.

Caso 2: Abertura das janelas todo o dia.

Caso 3: Fecho das janelas durante todo o dia.

A melhor opção segundo os autores, foi o do caso 1, que permitiu o arrefecimento do PCM para alcançar o ciclo de solidificação.

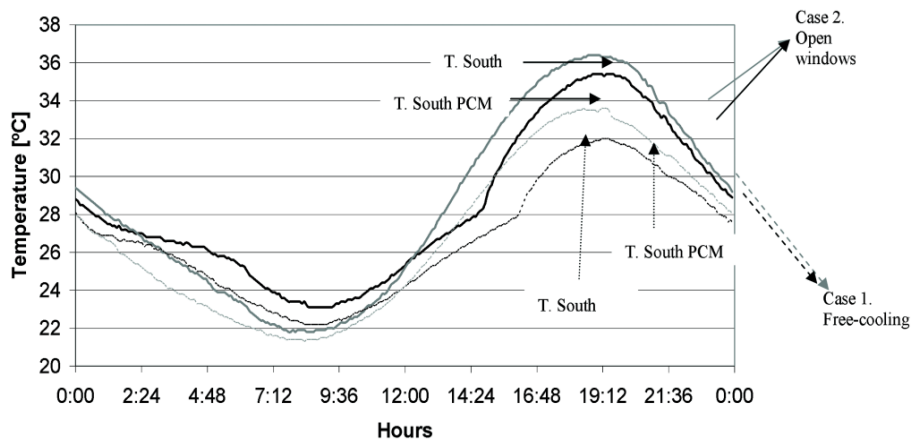


Gráfico 11 - Temperatura da parede sul (com e sem PCM) nos dias 05/07/2006 e 28/07/2006 (caso 1 e caso 2, respetivamente) (Castellón, *et al.*, 2007)

No gráfico 11, pode-se observar que no caso 1 as temperaturas máximas com PCM, alcançaram os 32°C e sem PCM os 33,5°C e um desfasamento de 2h para a parede com PCM em relação à sem PCM no alcance da temperatura máxima e mínima.

No caso 2 com as janelas sempre abertas, observou-se picos de temperatura superiores ao caso 1, 36,5°C sem PCM e 35,5°C com PCM. Neste caso houve um atraso de 3h do cubículo com PCM para o sem PCM, ambos para a temperatura máxima e mínima.

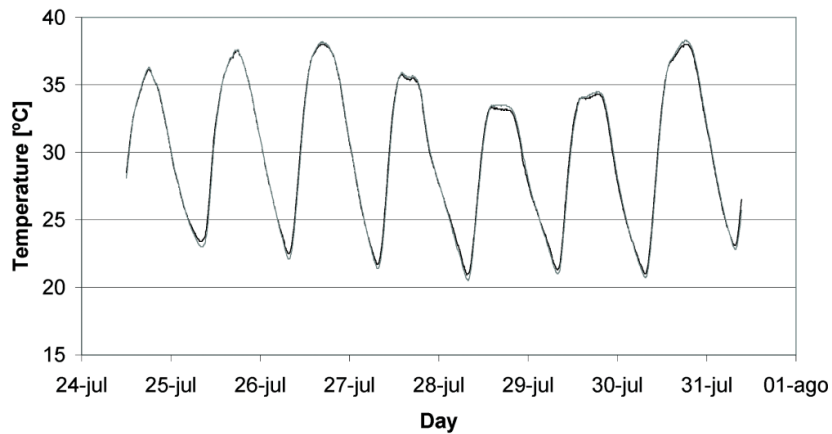


Gráfico 12 - Temperatura da parede Este nos 2 cubículos (julho de 2006) (Castellón, *et al.*, 2007)

No gráfico 12, referente à temperatura das paredes Este, dos cubículos, observa-se que as temperaturas foram as mesmas, pois nenhuma das paredes continha PCM.

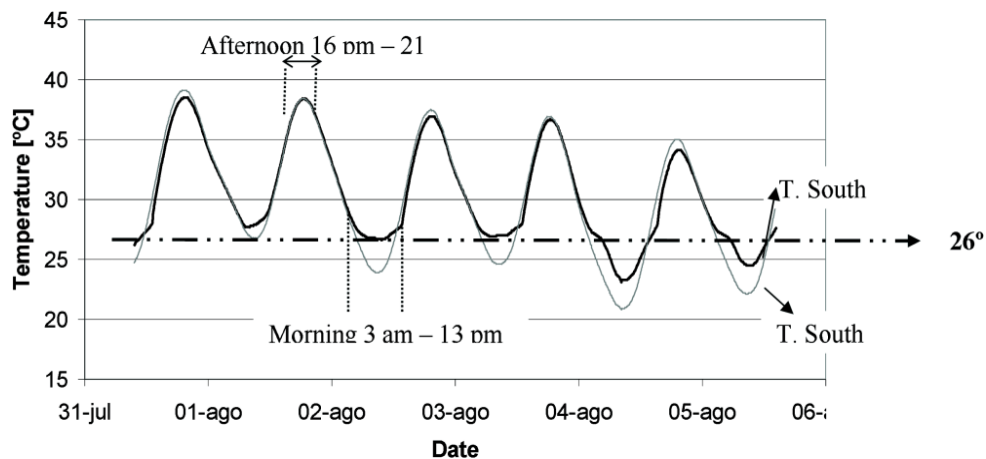


Gráfico 13 - Temperatura da parede sul com e sem PCM (caso3 : janelas fechadas, Agosto 2006) (Castellón, *et al.*, 2007)

No gráfico 13 observa-se que a temperatura máxima da parede sul com e sem PCM, manteve-se bastante semelhante, sentindo-se apenas diferença nas temperaturas mínimas, que na parede sem PCM alcançaram valores mais baixos. A estes factos justifica-se que o PCM ao não conseguir baixar da sua temperatura de solidificação não consegue atenuar a temperatura máxima, nem a retardar.

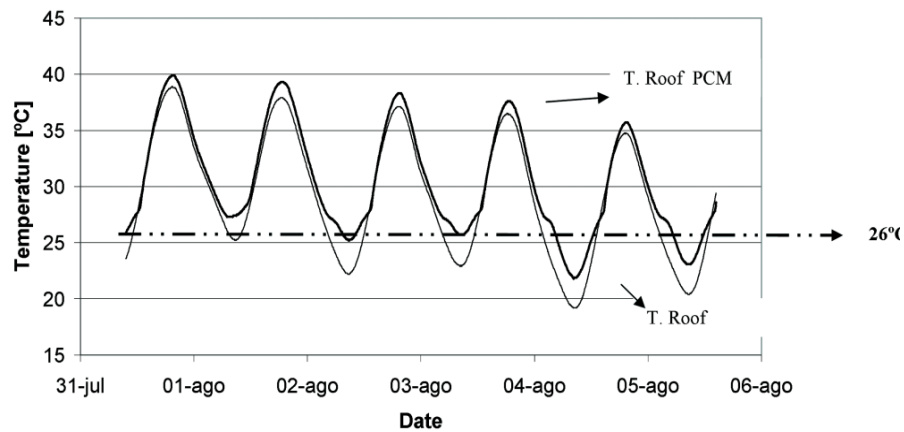


Gráfico 14 – Temperatura dos 2 telhados (janelas fechadas, Agosto 2006) (Castellón, *et al.*, 2007)

No gráfico 14, observa-se um aumento da temperatura máxima por parte do telhado com PCM, do que com o telhado sem PCM.

Inverno:

Na época de outono-inverno foi adicionado uma “*parede de Trombe*” aos cubículos, trata-se de um vidro afastado de 10 cm da parede sul como se pode observar na figura 26 . A radiação passa através do vidro e aquece a parede sul, aumentando o seu aquecimento através de um efeito de estufa. A ideia dos investigadores com a adição do “*Parede de Trombe*” foi tentar ganhar calor na parede sul e aumentar a temperatura do PCM quando a temperatura exterior for menor que a temperatura de fusão do PCM.

De seguida procedeu-se à criação de mais 3 casos.

Caso 4 (aquecimento livre): Janelas abertas durante o dia e fechadas durante a noite.

Caso 5: Janelas abertas dia e noite.

Caso 6: Janelas fechadas dia e noite.



Figura 26 - Parede de Trombe com vidro exterior (Castellón, *et al.*, 2007)

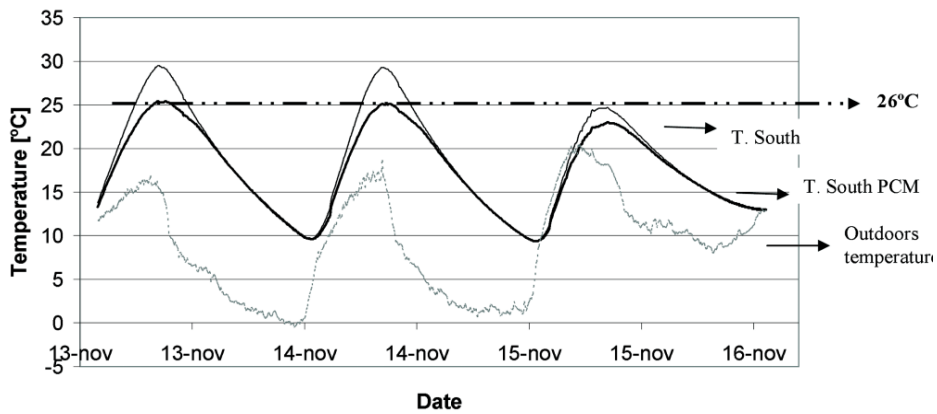


Gráfico 15 - Temperatura exterior e temperatura do painel sul com “parede de Trombe”, com e sem PCM (Novembro de 2006) (Castellón, *et al.*, 2007)

No gráfico 15, a temperatura na parede sul no cubículo com PCM foi inferior à temperatura da parede sul do cubículo sem PCM, contrariamente ao que se esperava.

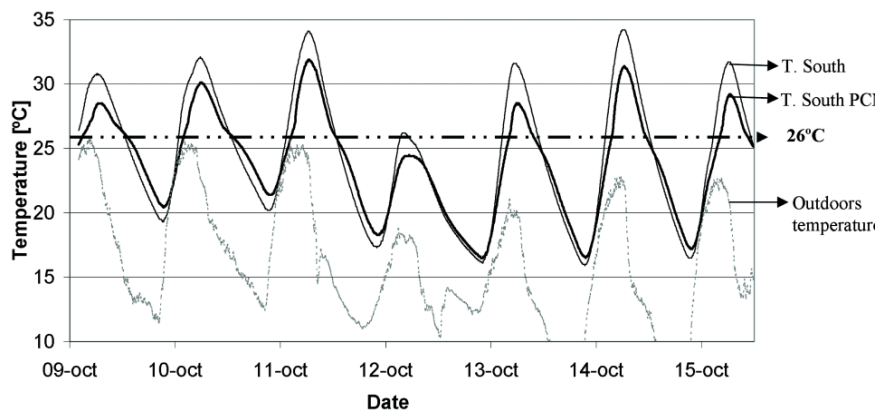


Gráfico 16 - Temperatura exterior e temperatura do painel sul com “parede de Trombe”, com e sem PCM e janelas fechadas (Novembro de 2006) (Castellón, *et al.*, 2007)



No gráfico 16, observa-se que a temperatura ambiente esteve abaixo dos 26°C, mas com o “*Parede de Trombe*”, foi possível obter-se temperaturas superiores no interior dos cubículos, a vantagem predominante na utilização do PCM na parede sul foi ser possível obter um aumento da temperatura mínima em 1°C e uma diminuição da temperatura máxima em 2°C em relação à parede sul sem PCM, permitindo assim um melhoramento da temperatura de conforto.

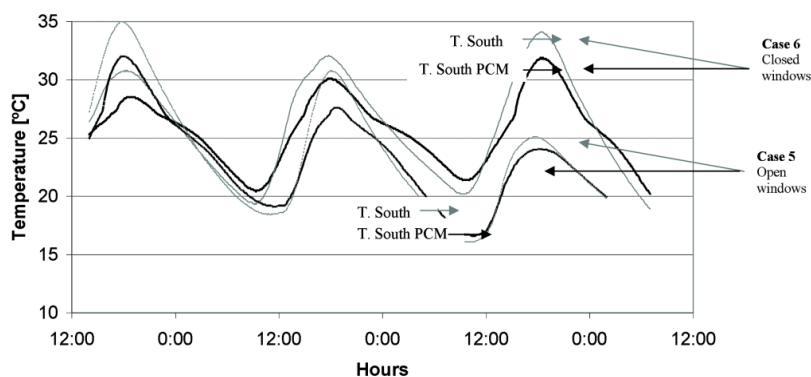


Gráfico 17 - Comparação entre o caso 6 - janelas fechadas (9–12/10/2006) e o caso 5 - janelas abertas (27–29/10/2006), ambos com “parede Trombe” (Castellón, *et al.*, 2007)

No gráfico 17 monitorizou-se as temperaturas para 2 dias com iguais amplitudes térmicas, (24°Cmax., 11°Cmin. e 700W/m² de radiação máxima solar), é possível observar que no caso 6 com as janelas fechadas é possível alcançar temperaturas mais elevadas nas paredes sul.

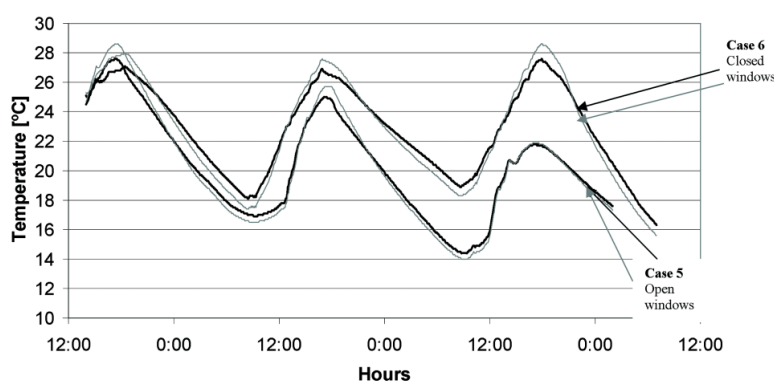


Gráfico 18 - Temperaturas ambientes interiores no caso 6 (9–12/10/2006) e caso 5 (27–29/10/2006) com “Parede de Trombe” (Castellón, *et al.*, 2007)

No gráfico 18, semelhante ao gráfico 11, pode-se observar a temperatura ambiente interior medida a 1.2m que no caso 6 as temperaturas são mais elevadas que no 5.

Com esta experiência pode-se concluir que foi possível utilizar PCM junto com cimento que demonstrou ter uma maior inercia térmica em relação ao cubículo sem PCM, possibilitando um atraso de até 2h no alcance da máxima temperatura em relação ao



cubículo sem PCM. Com picos térmicos, temperaturas muito baixas durante a noite e muito altas durante o dia, o PCM tem uma melhor performance por exemplo no verão, em que no início da manhã o PCM encontra-se solidificado e durante a tarde liquefeito.

Depois de observados os resultados, é possível ver que em todos os casos há vantagens e desvantagens em relação ao uso de PCM dependendo dos meses e estações (Lleida ou Madrid). Durante Abril-Junho o uso de “*Parede de Trombe*” favorece o funcionamento do PCM, ao permitir alcançar maiores temperaturas no interior.

De Abril a Maio, com as janelas fechadas em Junho utilizando o caso de aquecimento livre e o caso das janelas abertas. A partir de Julho é recomendado a remoção do “*Parede de Trombe*” e utilizar o caso do arrefecimento livre devido às altas temperaturas que se registam.

Em nota final, nem sempre nesta experiência foi possível alcançar as temperaturas de fusão, o que limita o funcionamento do PCM, contudo devido à capacidade de utilização do PCM com cimento, é possível quantificar numa fase posterior a poupança de energia em edifícios que incorporem PCM no cimento. (Castellón, *et al.*, 2007)

3.3- Argamassas térmicas sustentáveis: Contributo dos Materiais de Mudança de Fase (cal aérea e gesso)

Uma equipa de investigadores Portugueses da Universidade do Minho estudou a incorporação de materiais de mudança de fase em argamassas, estudando as características físicas e mecânicas para diferentes composições e percentagens de PCM. O ligante utilizado foi a cal aérea e o gesso. Foi utilizado também fibras de nylon para diminuição da fissuração provocada pela retração, a quantidade de água utilizada foi determinada pelo ensaio da mesa de espalhamento.

Material utilizado:

PCM em pó com temperatura de fusão de 23°C e uma entalpia de 110kJ/kg, superplastificante baseado em poliacrilato com uma densidade de 1050kg/m³, areia de diâmetro médio 439.9 µm, cal aérea com densidade de 1100kg/m³, gesso e fibras sintéticas de nylon com um comprimento de 6mm. As percentagens de PCM utilizadas foram de 0%, 10%, 20% e 30% como demonstra a seguinte tabela.



Composição	Areia(g)	Água(%)	Gesso(%)	PCM(%)	Fibras(%)	Superplastificante(%)
L100G0	561.4	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0
L100G0PCM10	561.4	18.5	0.0	10	0.0	1.0
L100G0PCM20	561.4	29.0	0.0	20	0.0	1.0
L100G0PCM30	561.4	45.0	0.0	30	0.0	1.0
L100G0F	561.4	23.0	0.0	0.0	0.1	0.0
L100G0PCM10F	561.4	18.5	0.0	10.0	0.1	1.0
L100G0PCM20F	561.4	30.0	0.0	20.0	0.1	1.0
L100G0PCM30F	561.4	45.0	0.0	30.0	0.1	1.0
L90G10F	561.4	23.5	10.0	0.0	0.1	0.0
L90G10PCM10F	561.4	19.2	10.0	10.0	0.1	1.0
L90G10PCM20F	561.4	31.0	10.0	20.0	0.1	1.0
L90G10PCM30F	561.4	47.0	10.0	30.0	0.1	1.0
L80G20PCM20F	561.4	31.0	20.0	20.0	0.1	1.0
L70G30PCM20F	561.4	32.0	30.0	20.0	0.1	1.0
L60G40PCM20F	561.4	32.0	40.0	20.0	0.1	1.0

Tabela 20 - Composição das argamassas (água, PCM, fibras e superplastificante em % do peso da areia) (Cunha, *et al.*, 2012)

✓ Trabalhabilidade

O ensaio de trabalhabilidade foi feito na mesa de espalhamento conforme a norma europeia EN 1015-3, em que apenas foram considerados os resultados compreendidos entre 160-180mm resultando deste modo a quantidade de água necessária por tentativa.

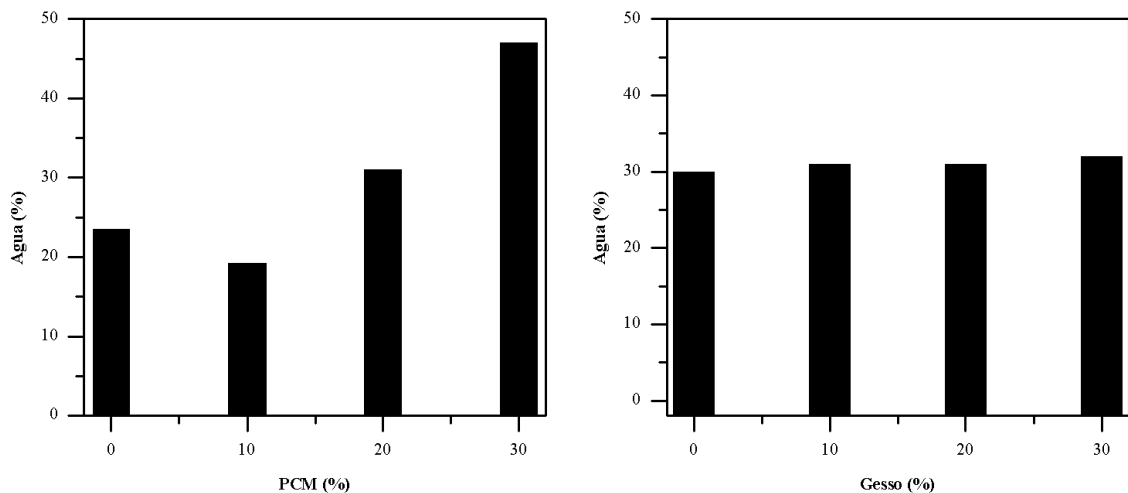


Gráfico 19 - Composição das argamassas (Água, PCM, Fibras e Superplastificante em % das partículas sólidas) (Cunha, et al., 2012)

Como se pode verificar no gráfico 19 um aumento de 10% de PCM provoca um aumento de 50% de água, devido ao grau de finura do PCM e pela absorção da parede de polímero das microcápsulas.

Por sua vez, a incorporação de 10% de gesso, provocou um ligeiro aumento da quantidade de água.

✓ Resistência mecânica

Os ensaios realizados foram com base na EN 1015-11. No ensaio à flexão foram usados provetes prismáticos de 40x40x160 mm³, e postos sobre uma força de 10 N/s.

Já no ensaio à compressão os provetes foram submetidos a uma força de 50 N/s.

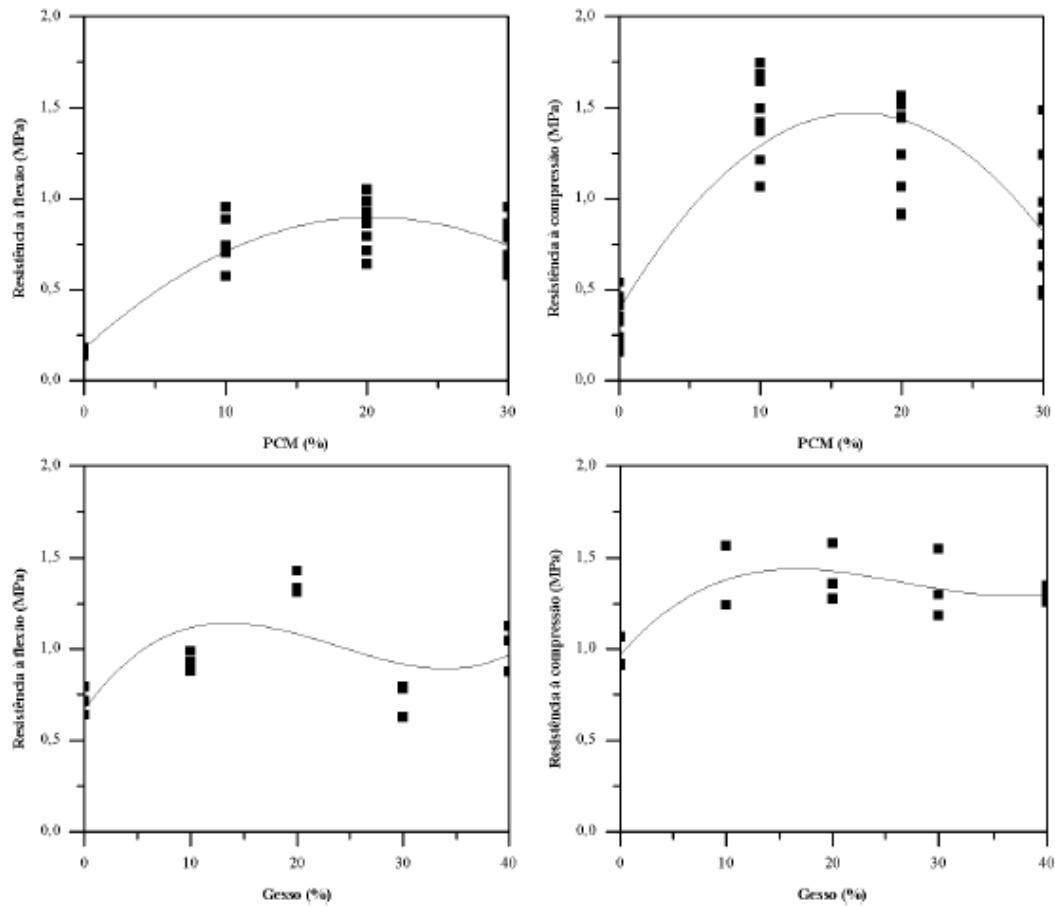


Gráfico 20 - Ensaio mecânico das argamassas variado a % de gesso e PCM. (Cunha, *et al.*, 2012)

Como se pode observar no gráfico 20, um aumento da porcentagem de PCM, melhora as propriedades mecânicas da argamassa, contudo acima de 20% estas características pioram. Este aumento das resistências está relacionado com o aumento da porosidade, originado pela introdução de uma maior quantidade de água tal como apresentam os autores Lucas, *et al.*, (2012), Vieira (2012) e Monteiro (2005).

Relativamente ao gesso, a partir de 20% também se verifica a diminuição das características mecânicas.

✓ Retração

Na retração foi analisada principalmente a influência do PCM, a incorporação das fibras de nylon e gesso.

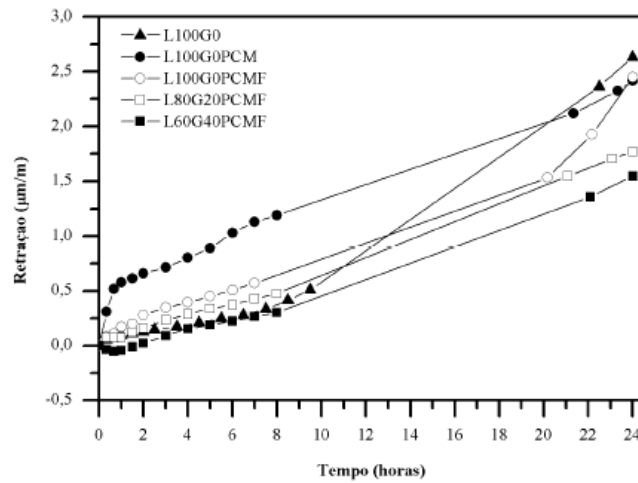


Gráfico 21 - Retração desde a moldagem até as 24h (Cunha, *et al.*, 2012)

Segundo os investigadores o aumento da percentagem de PCM, resultou também num aumento dos valores de retração, sendo que a adição de gesso e fibras de nylon, diminuíram a retração nas primeiras 24h.

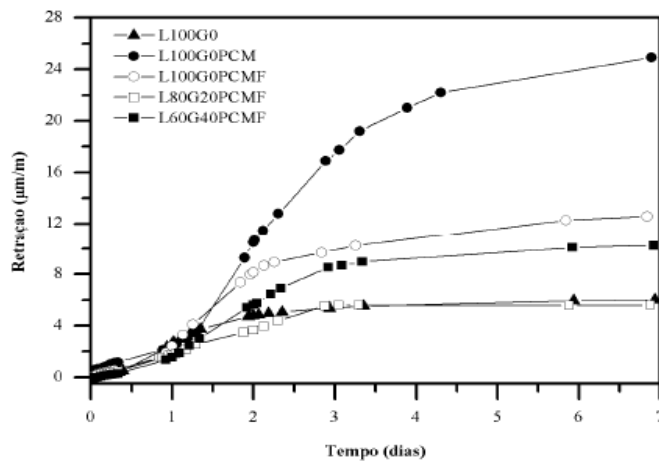


Gráfico 22 - Retração desde a moldagem até aos 7 dias (Cunha, *et al.*, 2012)

Até aos 7 dias a argamassa com 20% de PCM (L100G0PCM), teve um aumento nos valores de retração em cerca de 4 vezes relativamente à argamassa usada como referencia (L100G0), com a adição de fibras de nylon (L100G0PCMF) registou-se uma diminuição da retração para cerca de metade relativamente à argamassa L100G0PCM.

Com a adição de gesso à argamassa de PCM (L80G20PCMF e L60G40PCMF), observou-se também uma diminuição dos valores de retração.



Com a adição de PCM, torna-se necessário a inclusão de mais água, com mais água, a retração por sua vez aumenta por dessecação, por outro lado a adição das fibras de nylon impede os movimentos no interior das argamassas diminuindo a retração. A adição de gesso, também diminui a retração, pois este expande com a sua hidratação.

Como nota final desta experiência, permitiu-se perceber que para a adição de PCM a uma argamassa é necessário juntar mais água de forma a obter uma melhor trabalhabilidade. O comportamento à compressão e à flexão não fica comprometido, tendo até uma melhoria quando a concentração de PCM varia entre 15% e 20%.

Após o ensaio de varias amostras, a argamassa com 60% de cal aérea, 40% de gesso e 20% de PCM, foi a que obteve melhor equilíbrio entre as suas características mecânicas e de retração. (Cunha, *et al.*, 2012)

3.4- Aplicação de PCM – Estudo térmico comparativo e estudo económico

Uma equipa três investigadores na Universidade do Minho, Guimarães, estudou a influência de argamassas à base de gesso incorporando PCM, nas estações de inverno e verão no edifício em estudo situado em Vila Nova de Famalicão, Braga. Para além do comportamento térmico é também acrescentado nesta investigação uma componente económica devido ao elevado custo do PCM. Foi utilizado microcápsulas de parafina com temperatura de fusão aos 20°C e capacidade de calor latente 140kJ/kg, a percentagem de utilização no peso total foi de 20%.

Foram estudadas duas divisões lado a lado, uma com reboco de gesso sem PCM - REF e a outra com reboco em gesso com PCM.

Nome	REF		Divisão com PCM
Dimensões da divisão de tese (L x W x H em m)		4.10x2.50x2.60	
Área rebocada (m ²)		9.74	
Quantidade de gesso usado (kg)	10		7.5
PCM usado (kg)	-		1.9
Consumo de reboco (kg/m ²)	1.03		0.77
Consumo de PCM (kg/m ²)	-		0.2



Nome	REF	Divisão com PCM
Capacidade de armazenamento (W.h/m ²)	-	7.6

Tabela 21 - Características do material utilizado, adaptado de Ermolli, *et al.*, (2011)

Na primeira parte da experiência foram monitorizadas a temperatura e a humidade relativa no período de 21 de Julho a 8 de Agosto de 2007 como se observa no gráfico 23 e 24.

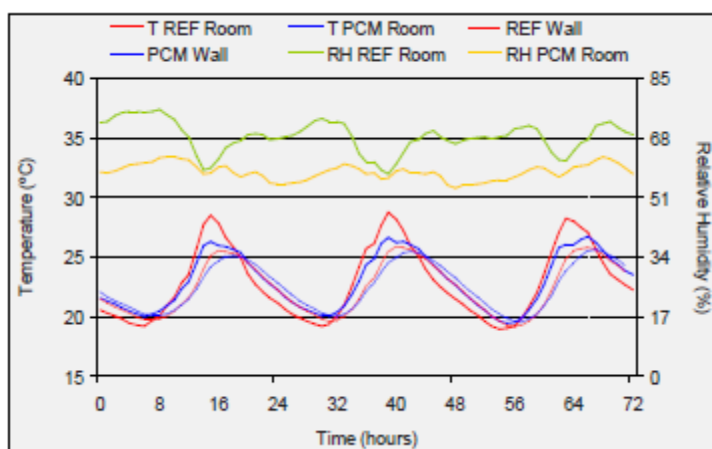


Gráfico 23 - Temperatura e humidade relativa para o dia mais frio (9,0°C < Temperatura exterior < 25,8°C) (Ermolli, *et al.*, 2011)

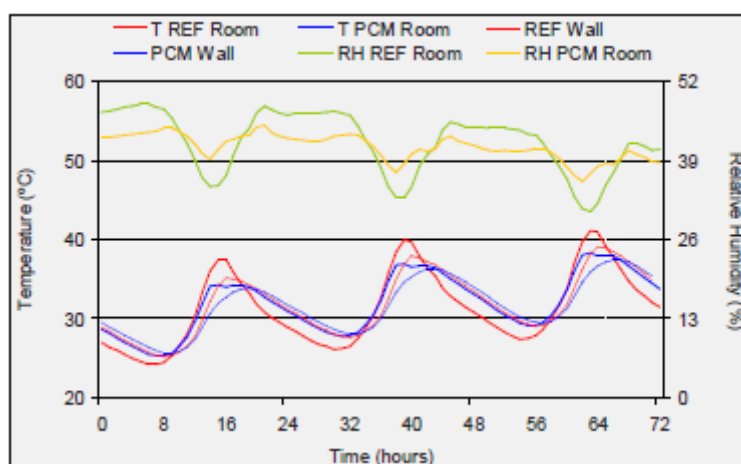


Gráfico 24 - Temperatura e humidade relativa para o dia mais quente (14,9°C < Temperatura exterior < 36,8°C) (Ermolli, *et al.*, 2011)



	Temp. Exterior	Zona de REF	Divisão com PCM	Parede - REF	Parede com PCM
Tmax (°C)	36.8	42.2	38.1	39.2	37.5
Tmin (°C)	9	19.1	19.2	19.2	19.6

Tabela 22 - Máximo e mínimo registado durante o período de monitorização adaptado de Ermolli, *et al.*, (2011)

	Temperatura/ Tempo de atraso	
	Máxima	Mínima
ΔT (°C)	-4.9	1.4
Δt (h)	3	2

Tabela 23 - Diferença de temperaturas máximas e mínimas e tempos de atraso para a divisão sem PCM –REF e a divisão com PCM. Adaptado de Ermolli, *et al.*, (2011)

ΔQ_T (W)	ΔQ_h (W)	ΔQ_{parede} (W/m ² de parede)	ΔQ_{andar} (W/m ² andar)	$\Delta Q_{parede.chão}$ (W/m ² de parede e chão)
24788	21.3	2.2	4.3	0.44

Tabela 24 – Calculo das diferenças do fluxo de calor entre as duas divisões (com e sem PCM). Adaptado de Ermolli, *et al.*, (2011)

T refere-se ao período total de monitorização; h refere-se a uma hora; parede refere-se por unidade de área de parede; chão refere-se por unidade de área de chão; parede.chão refere-se por unidade de área de parede e chão. Face aos resultados obtidos, a investigação contribui mais uma vez para confirmar os resultados positivos quanto ao uso do PCM em revestimentos. Durante o período experimental atingiu-se uma diferença na temperatura máxima de 5°C, quanto á temperatura mínima atingiu-se uma redução de 1.4°C. Houve também um atraso de 3 e 2°C para o alcance das temperaturas máximas e mínimas em relação à divisão com PCM e sem PCM (Ermolli, *et al.*, 2011)

Considerando o cálculo do fluxo de calor através da equação e tendo em conta o custo da eletricidade em Portugal, se utilizarmos um AC de potência máxima 1000 W com uma área de 16m² de parede e um custo de eletricidade de 0.2407 €/kWh (Portugal EDP, 2013) pode-se chegar a uma redução do consumo em cerca de 0,03€/h ou de 12%, uma



redução de custo que tende essencialmente a aumentar face ao aumento dos preços da energia. Tal como Origgi, (2011) e Monteiro, (2005) que também chegaram à conclusão dos benefícios económicos do uso de PCM.

Capacidade de armazenamento do PCM: 7.6 W.h/m^2

Capacidade de armazenamento de energia de uma parede de 16m^2 : 121.6 W.h

Energia necessária com PCM: $1000\text{W.h} - 121.6\text{W.h} = 878.4 \text{ W.h}$

Diferença de custos: $1\text{kW} \times 0.2407\text{€/kW.h} - 0.8784\text{kW} \times 0.2407\text{€/kW.h} = 0.029 \text{ €/h}$ ou 256.4€/ano (considerando a utilização do AC 24h durante 365 dias).

Outra propriedade analisada pela equipa de investigadores foi a humidade relativa que, comparadas as duas divisões, verificou-se níveis mais baixos para a divisão que continha PCM, que na estação quente rondou os 35-45% *versus* os 30-50% e na estação fria os 53-62% *versus* os 57-76%, deste modo a possibilidade de ocorrência de fenómenos de condensação, fica reduzido com o uso de PCM.

Na segunda parte da experiencia a equipa de investigadores decidiu estudar a influencia da ventilação natural no PCM, analisando e comparando uma divisão do lado norte e outra divisão do lado sul. O revestimento interior escolhido foi á base de gesso, com e sem PCM.



Figura 27 – Fachada a) exposta a sul e b) exposta a norte (Ermolli, et al., 2011)



Propriedade	Sem PCM - REF		Com PCM	
	Norte	Sul	Norte	Sul
Área da divisão (m ²)	17	21.5	17	21.5
Área rebocada (m ²)	54	62	54	62
Gesso usado (kg)	60		40	
PCM usado (kg)	-	-	10	
Consumo de gesso (kg/m ²)	0.52		0.35	
Consumo de PCM (kg/m ²)	-	-	0.086	
Capacidade de armazenamento de energia (Wh/m ²)	-	-	3.3	

Tabela 25 - Características do material utilizado (Ermolli, *et al.*, 2011)

Nas divisões situadas a norte, foi colocado um aquecedor a óleo de 2500W, com a finalidade de ajudar o PCM a atingir a sua temperatura de fusão para além dos ganhos térmicos solares. As divisões a sul, a fonte de aquecimento foi apenas por parte de ganhos solares.

Ciclos de aquecimento						
ON	00h00	04h00	08h00	12h00	16h00	20h00
OFF	02h00	06h00	09h00	13h00	17h00	22h00

Tabela 26 - Ciclos de aquecimento utilizando o aquecedor (Ermolli, *et al.*, 2011)

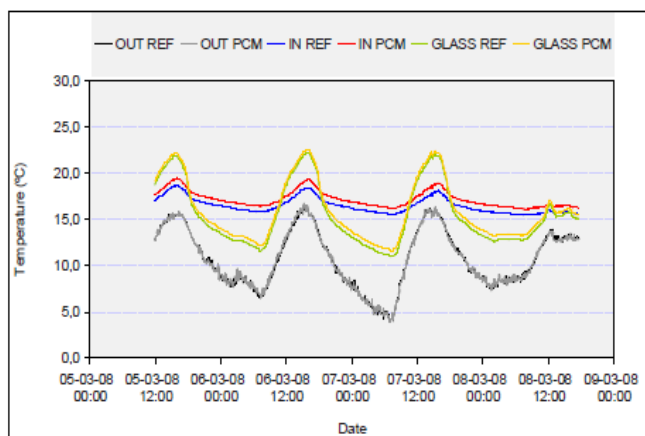


Gráfico 25 - Temperaturas exteriores e interiores para as divisões viradas a sul (Ermolli, *et al.*, 2011)

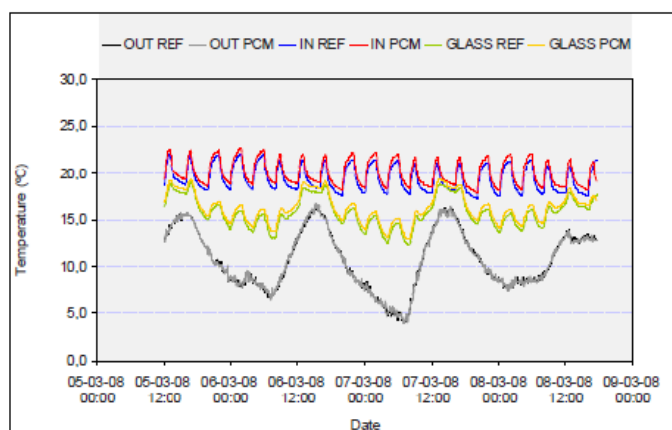


Gráfico 26 - Temperaturas exteriores e interiores para as divisões viradas a norte (Ermolli, *et al.*, 2011)

Como se pode verificar nos gráficos 25 e 26, as diferenças de temperaturas entre a solução com PCM e sem PCM, não foram muito significativas durante o período de monitorização, segundo o autor, o facto de as temperaturas rondarem muito perto de 20°C e não haver grandes variações, fez com que o PCM fique inibido de mudar a sua fase (mudando apenas de uma forma parcial) e deste modo não armazene uma quantidade significativa de energia, contudo ainda assim é visível que nas divisões com PCM atingiram-se temperaturas superiores face à divisão sem PCM. Com esta experiência o autor propõe o estudo da utilização de materiais de mudança de fase com diferentes temperaturas de fusão para uma optimização na estação de verão e no inverno. (Ermolli, *et al.*, 2011)

3.5- Influência do isolamento térmico e os materiais de mudança de fase, no consumo de energia e emissões de CO₂ nas várias cidades europeias utilizando modelos de simulação.

Um grupo de investigadores estudou a influência do uso de sistemas de isolamento térmico da marca BASF, em edifícios localizados em Varsóvia, Londres, Paris, Roma e Sevilha utilizando para tal um programa de simulação térmico (DYNBIL). O objetivo da simulação foi quantificar os gastos energéticos dos edifícios em vários climas europeus, perceber a influência dos PCM face ao investimento inicial elevado e o período de retorno.

O programa de simulação intervém nas seguintes condições:



- ✓ Áreas, coeficientes térmicos, ganhos térmicos, orientação do local, geometria, janelas, fontes de calor internas.
- ✓ Condução térmica dos materiais e sua capacidade de armazenamento de energia;
- ✓ Transferência de calor por convecção entre as várias superfícies interiores do apartamento.
- ✓ Radiação de grande comprimento de onda, considerando a troca de calor dos diferentes materiais no interior da habitação.
- ✓ Radiação de curto comprimento de onda, proveniente da radiação incidente nas janelas.
- ✓ Transferência de calor entre os elementos exteriores, considerando a ação do vento, radiação solar, temperatura exterior.
- ✓ Fontes internas de calor, considerando os vários mecanismos de transporte de calor.

Foi utilizado para simulação um exemplo de um edifício de escritórios, constituído por uma estrutura leve, as dimensões internas foram as seguintes: 1,80metros de largura, 4metros de altura, as janelas com 1,80metros de altura e 1,60metros de largura, o corredor uma largura de 1,20metros.

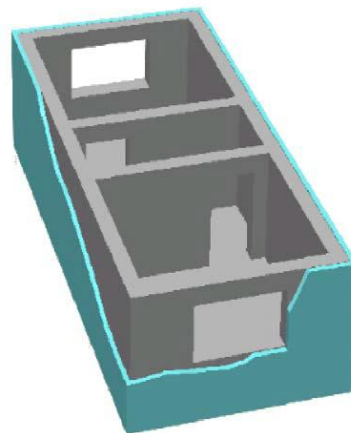


Figura 28 - Modelo de Escritório (Origi, 2011)

O programa de simulação determinou a utilização de ar-condicionado quando a temperatura sobe dos 25°C, à noite o sistema de ar-condicionado é desligado e o arrefecimento é garantido pela abertura das janelas, foi considerado a utilização do espaço apenas de 2ª a 6ª feira e contemplados os consumos internos dos equipamentos (equipamentos eletrónicos, iluminação, etc..).

O sistema de isolamento é composto por Neopor nas paredes exteriores e utilização de Smartboard PCM nas paredes interiores.



Os resultados foram os seguintes:

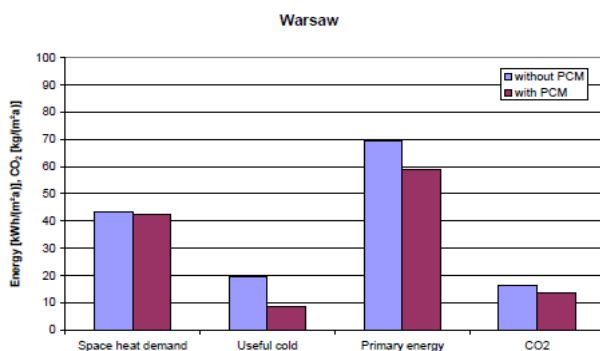


Gráfico 27 - Consumos em Varsóvia (Origi, 2011)

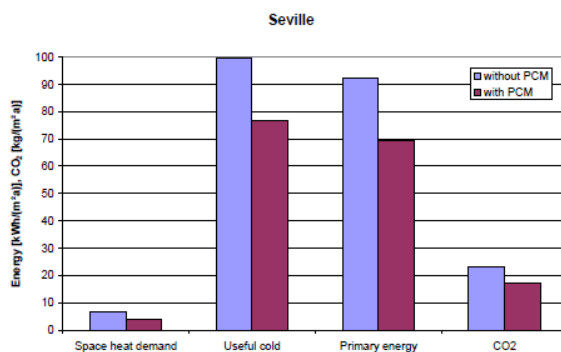


Gráfico 28 - Consumos em Sevilha (Origi, 2011)

As necessidades energéticas são diferentes de cidade para cidade, Varsóvia foi a cidade que mais precisou de energia para aquecimento, já Sevilha foi a cidade que registou mais altos consumos energéticos para arrefecimento. Com a utilização do PCM, os gastos energéticos em todos os casos diminuíram.

Segundo este estudo devido à presença do PCM (Micronal PCM SmartBoard) e assumindo que a temperatura interior ultrapasse os 21°C e os 25°C uma vez por dia, gera-se um armazenamento de energia de 357kJ/m² dia, ou 130MJ/m² ano (365 dias) o equivalente a 31.7kWh/m² que pode ser aproveitado para aquecimento ou arrefecimento. Face ao investimento inicial do Micronal PCM SmartBoard ser de 40€/m², teria um período de retorno ao fim de 11 anos. Os resultados obtidos são apenas indicadores, as poupanças energéticas podem andar por baixo destes valores pois nem sempre há a necessidade de utilização do ar-condicionado todos os dias, a manutenção da temperatura pode ser feito muitas vezes só com as janelas abertas.



Em seguida apresenta-se os valores de poupança em gastos energéticos utilizando o PCM segundo a simulação para as várias cidades.

Poupanças [€/m ² PCM]					
Varsóvia	Frankfurt	Londres	Paris	Roma	Sevilha
0,38	0.42	0.40	0.42	0.51	0.80

Tabela 27 - Poupanças de Energia nas Cidades Europeias (Origgi, 2011)

A utilização de sistemas passivos para arrefecimento e aquecimento como é o caso do PCM, pode ser um pequeno investimento face ao investimento de um ar-condicionado, que em média tem um custo entre 2000 a 2600€ por compartimento e mais 3.5% do seu valor para a sua manutenção todos os anos. Para além do seu custo, os ar-condicionados tem um tempo estimado de vida de 15 anos. Face a isto, os PCM podem até vir a ser uma solução alternativa ou complementar, pois não tem gastos de manutenção e um tempo de vida superior.

Os sistemas de mudança de fase têm um papel mais determinante quanto maior for a intensidade de utilização do local e uma variação térmica bastante acentuada. Dependendo do local climatérico o uso de placas de gesso contendo PCM na envolvente interior do edifício, face à utilização de placas de gesso sem PCM, permite economizar em energia entre 15 a 32%, sendo mais acentuada a poupança quando se procura arrefecer o ambiente interior. A longa duração dos componentes do PCM, e o investimento inicial, torna-se redundante quando comparado aos custos da utilização do ar-condicionado. (Origgi, 2011)

3.6- Papel dos nano-aditivos na funcionalização das argamassas

Um grupo de investigadores da Universidade de Aveiro estudou vários aditivos em argamassas entre os quais os PCM de parafina da BASF, com vista a caracterização das mesmas. Neste trabalho apresenta-se novamente uma argamassa à base de cal aérea e areia siltosa, que incorporou diferentes percentagens de PCM, 0, 10, 20 e 30%.

Os provetes normalizados (40x40x160 mm) foram previamente preparados e realizados os seguintes ensaios;



- Compressão e flexão;
- Porosidade;
- Comportamento térmico dos provetes;

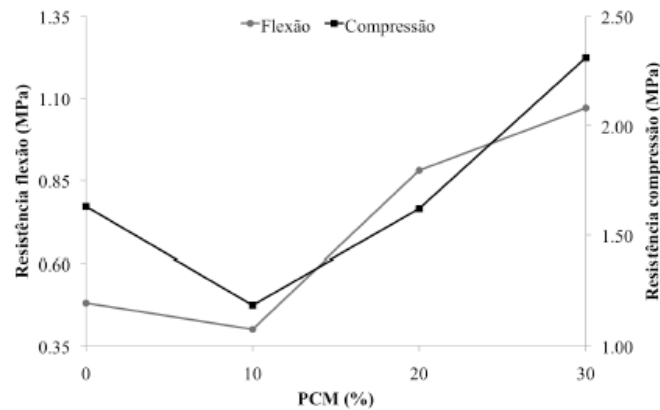


Gráfico 29 - Resistência mecânica da composição de cal com PCM (Lucas, *et al.*, 2012)

A indução de PCM induz inicialmente uma quebra das resistências até aos 10% de PCM, a partir daí os valores das resistências aumentam até à percentagem de 30% de PCM como se observa no gráfico 29.

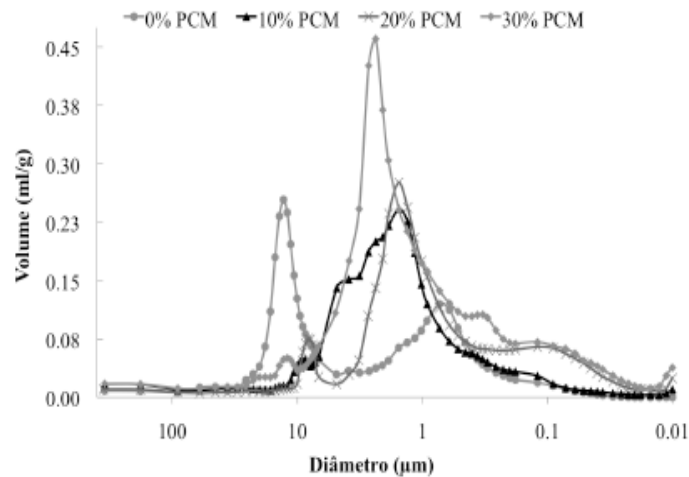


Gráfico 30 - Distribuição da microestrutura interna das argamassas (Lucas, *et al.*, 2012)

No gráfico 30, pode-se observar que com o aumento da percentagem de PCM, a gama de poros entre os 10 e os 0.1 µm aumenta consideravelmente, isto porque o PCM, tem um diâmetro medio de 4 µm, poderá existir uma relação entre a porosidade e a resistência em que o aumento de concentração dos nanoporos (<0.5 µm) pode resultar



no aumento das resistências, tal como se verifica neste gráfico, em que a adição de PCM resulta numa maior concentração de poros de 2 μm . (Lucas, *et al.*, 2012)

3.7- Funcionalização de argamassas para controlo das condições ambiente

Um estudo feito por uma equipa portuguesa pretendeu caracterizar uma argamassa padrão comparando-a adicionando 20% de PCM, embora tenham sido adicionados outros aditivos para além do PCM, para a análise deste trabalho será tido em conta apenas este ultimo. Foram feitos os seguintes ensaios às argamassas, percentagem de ar e água na argamassa, massa volúmica aparente, variação da massa das misturas em estado endurecido, variação dimensional em estado endurecido, módulo de elasticidade dinâmico, resistência à flexão e compressão, condutividade térmica, coeficiente de capilaridade.

A seguinte argamassa padrão foi preparada e as suas dosagens calibradas de modo a que fosse possível atingir uma boa trabalhabilidade como se pode observar no quadro seguinte:

Materiais constituintes	Argamassa padrão
Cal aérea hidratada	8%
Cimento	8%
Areia de sílica (160 a 630 μm) Carbonato de cálcio (630 a 1500 μm)	Proporção 1:1
Hidrofugo de massa	0,1%
Introdutores de ar	0.025%
Retentores de água e plastificante (éter de celulose)	0.08%
Fibras	0.1%
Cargas leves	1%
Características em pó ou em pasta	
Traços ponderais (cimento:cal:areia)	Proporção 1:1:5
Teo de partículas finas	30%

Tabela 28 - Dosagens da argamassa padrão, adaptado de Vieira (2012)

Nesta experiência foram realizados ensaios com argamassas aditivadas, pondo o PCM em contato com poliacrilato de sódio e partículas de Titânia que estão representados pelas siglas na seguinte tabela.



Nomenclatura	Composição da argamassa
P	Padrão
1T	Padrão + 1% de TiO ₂
Nomenclatura	Composição da argamassa
20PCM	Padrão + 20% de PCM
1PA	Padrão + 1% de Poliacrilato de sódio
1.5PA	Padrão + 1,5% de Poliacrilato de sódio
1T20PCM	Padrão + 1% TiO ₂ + 20% de PCM
1T1PA	Padrão + 1% de TiO ₂ + 1% de Poliacrilato de sódio
1PA20PCM	Padrão + 1% de Poliacrilato de sódio + 20% de PCM
Nomenclatura	Composição da argamassa
1PA1T20PCM	Padrão + 1% de Poliacrilato de sódio + 1% de TiO ₂ + 20% de PCM
10PA Pintada	Padrão + 1% de Poliacrilato de sódio + Acabamento superficial

Tabela 29 - Composição da argamassa adaptado de Vieira (2012).

Em seguida apresenta-se os ensaios em estado fresco e seco das argamassas.

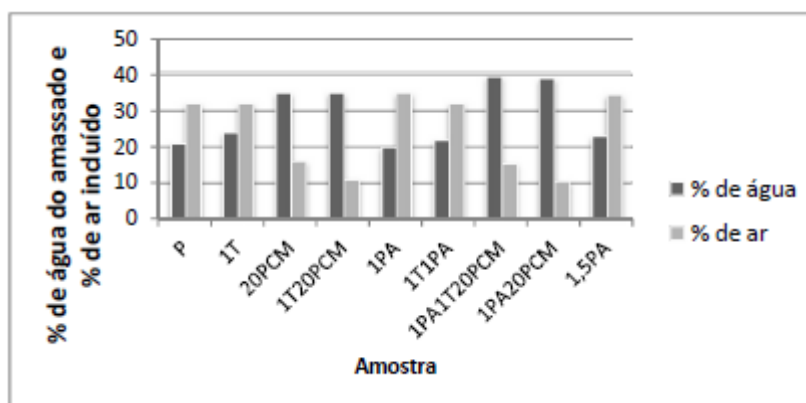


Gráfico 31 - Teor em ar das amostras (Vieira, 2012)

No gráfico 31, pode-se observar o efeito dos vários aditivos na argamassa padrão no estado fresco relativamente ao teor em água. Como se pode observar na argamassa 20PCM, o acrescento de 20% de PCM, aumenta cerca de 15% a percentagem de água e por outro lado diminui o teor em ar para o valor de 15%, relativamente aos 31% da argamassa padrão.

Já no caso da amostra 1T20PCM, o teor em água não aumenta relativamente à argamassa 20PCM, havendo um decréscimo do teor em água. Na amostra



1PA1T20PCM, registou-se a maior percentagem de água e a menor quantidade de vazios.

O autor justifica a maior percentagem de água devido ao acrescento da mesma para efeitos de trabalhabilidade que se estabelece a partir do ensaio de mesa de espalhamento no sentido de obter um diâmetro de 140mm.

Relativamente à massa volúmica pode-se observar no gráfico 32.

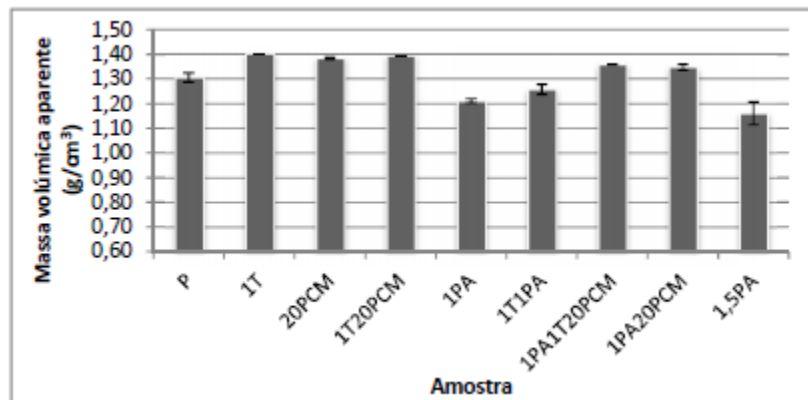


Gráfico 32 - Massa volúmica das amostras (Vieira, 2012)

A massa volúmica das amostras com PCM, são sempre superiores, devido ao aumento da concentração das partículas finas.

Amostra	P	1TA	20PCM	1T20PCM	1PA	1T1PA	1PA1T20PCM	1PA20PCM	1,5PCM
% de H ₂ O	21	24	35	35	20	22	39.5	39	23
% de H ₂ O para reologia	21	24	36	36	22	24	39.5	39	27

Tabela 30 - Diferença de % de H₂O do amassado e do preparado para reologia, adaptado de Vieira (2012)



Como se pode observar a percentagem de água para PCM, foi sempre superior.

No seguinte gráfico observa-se a evolução de escoamento e viscosidade plástica das argamassas.

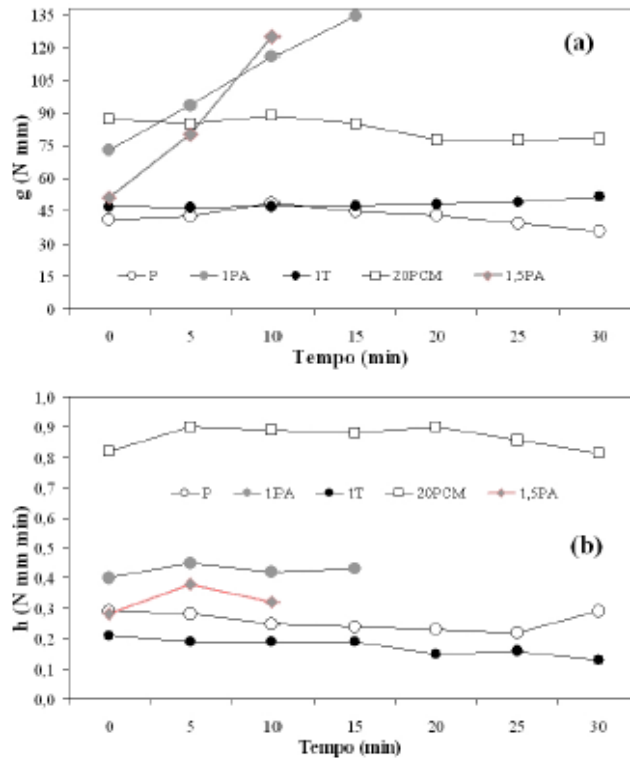


Gráfico 33 - Evolução da tensão de escoamento a) e evolução da viscosidade plástica b) (Vieira, 2012)

Este tipo de ensaio serve para determinar a reologia dos materiais, percebendo a evolução das características plásticas ao longo de um intervalo de tempo [30min]. Como se pode observar no gráfico 33, a introdução do PCM, fez com que a tensão de escoamento aumentasse para 95 N.mm, a registar-se também para o caso do PCM, uma elevada viscosidade plástica. É perceptível o efeito do PCM nas características reológicas.

Em seguida é apresentado no gráfico 34 a mudança de volume das amostras aos 7 e 28 dias.

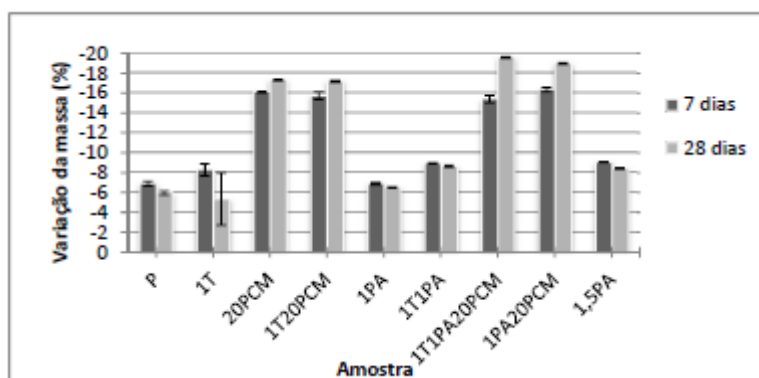


Gráfico 34 - Evolução do volume das amostras endurecidas (Vieira, 2012)

Como se pode observar no gráfico 35, as argamassas com PCM, continuam a retrair ao fim de 7 dias ainda dum modo mais intenso, devido substancialmente à maior quantidade de água necessária na amassadura “atrasando” o processo de cura. Nas restantes amostras o processo de secagem é mais intenso até aos 7 dias, após este período as amostras sem PCM, tendem também absorver alguma humidade no meio ambiente, aumentando a sua massa.

No gráfico 35 tem-se a variação dimensional por mm/m das amostras, demonstrando a sua retração.

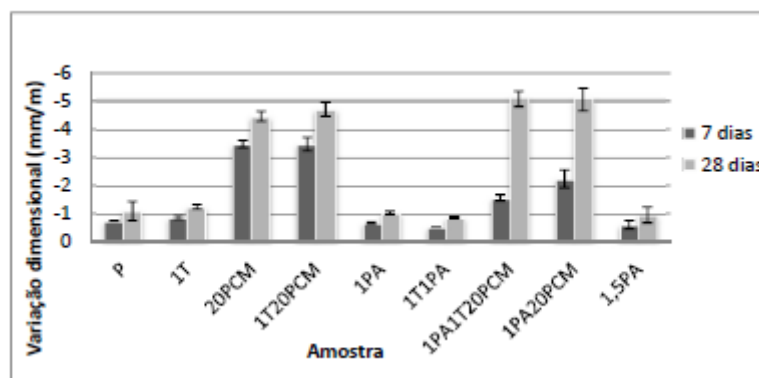


Gráfico 35 - Retração das amostras (Vieira, 2012)

No gráfico 35, observa-se uma maior retração nas amostras que contem PCM, por outro lado as amostras que não contiveram PCM, apresentam retrações similares à argamassa padrão. A presença de PA (Poliacrilato de sódio) origina um aumento ainda superior das retrações em junção com o PCM, segundo o autor a presença de PA contribui para que haja uma absorção e libertação de água originando variações de dimensão que podem gerar futuras fissuras. No gráfico 36, apresenta-se os resultados da massa volúmica aparente para 1, 7 e 28 dias.

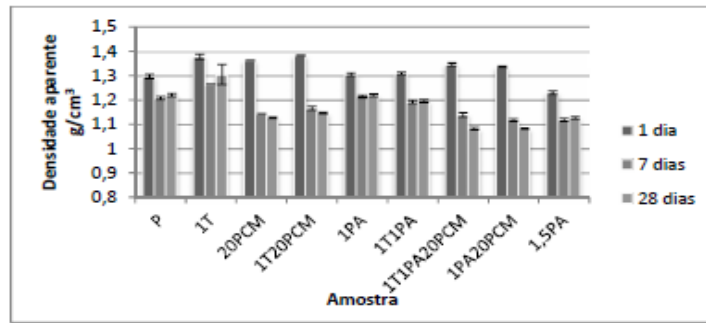


Gráfico 36 - Massa volúmica aparente (Vieira, 2012)

É de notar no gráfico 36, a grande diminuição da massa volúmica aparente das amostras com PCM, relativamente à argamassa padrão ao passar dos dias, a justificação está na quantidade de água que sai por evaporação.

No seguinte gráfico, é demonstrado a evolução do módulo de elasticidade dinâmico durante o processo de secagem da argamassa, que tendencialmente tende a perder capacidade elástica aumentando a sua solidez.

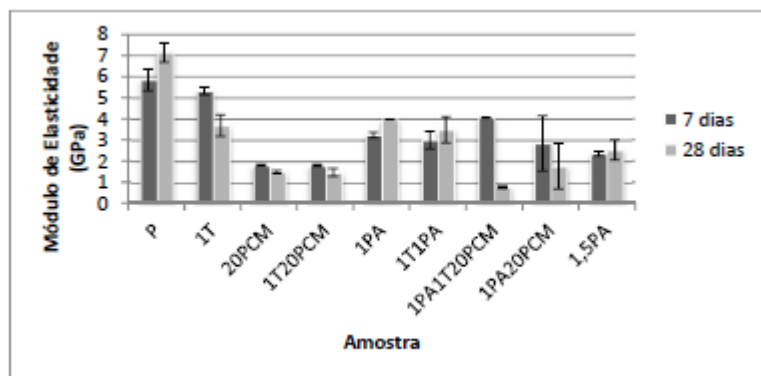


Gráfico 37 - Módulo de elasticidade das amostras (Vieira, 2012)

Como se pode observar pelo gráfico 37, as argamassas aditivadas apresentam um módulo de elasticidade bastante inferior relativamente à argamassa padrão. As microcápsulas de PCM, introduziram um maior decréscimo do módulo de elasticidade, sendo que a par do aditivo de Titânia as únicas a perder elasticidade aos 28 dias.

Na tabela 31, representa-se os valores de condutividade térmica das argamassas.



Amostras	Condutividade 30°C	Massa volúmica aparente
P	0.6781	1.22
1T	0.4992	1.3
20PCM	0.3783	1.13
1T20PCM	0.3765	1.14
1PA	0.8061	1.22
1T1PA	0.5439	1.2
1PA1T20PCM	0.3846	1.08
1PA20PCM	0.3611	1.08
1,5PA	0.678	1.13

Tabela 31 - Condutividade térmica das argamassas aos 30°C . Adaptado de Vieira (2012)

As argamassas com PCM apresentaram valores mais baixos de condutividade térmica, sendo mais isolantes que as argamassas padrão.

Quanto à capilaridade pode-se observar no gráfico 38 o valor dos coeficientes das amostras curadas ao fim de 28 dias.

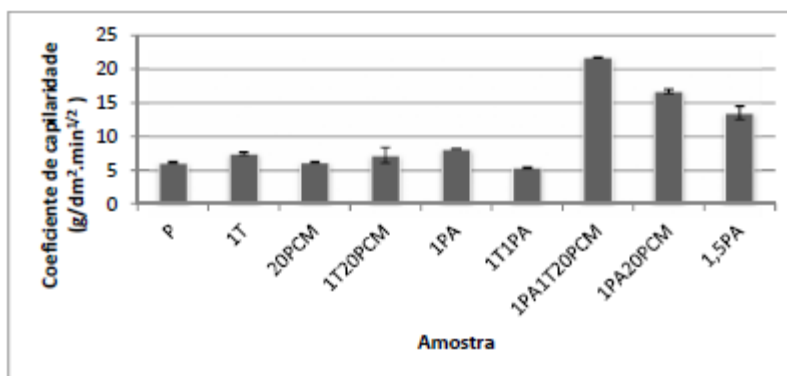


Gráfico 38 - Coeficientes de absorção de água por capilaridade das amostras ao fim de 28 dias. (Vieira, 2012)

Pela amostragem do gráfico 38, é possível observar que o coeficiente de absorção de água da amostra com PCM é bastante idêntica ao da argamassa padrão, já quando é adicionado Titânia e sulfato à argamassa de PCM, os valores aumentam. A razão principal deve-se ao facto das argamassas aditivadas serem mais porosas do que a argamassa padrão.

Neste estudo foi também realizada uma análise à capacidade fotocatalítica nas argamassas representada no gráfico 39. Este tipo de ensaios pretende avaliar a capacidade de degradação de moléculas de azoto com oxigénio (NO_x) presentes no ar e que são potencialmente nocivos para a saúde humana (causador de chuvas acidas, smog, doenças inflamatórias pulmonares e maus cheiros) por parte das argamassas.

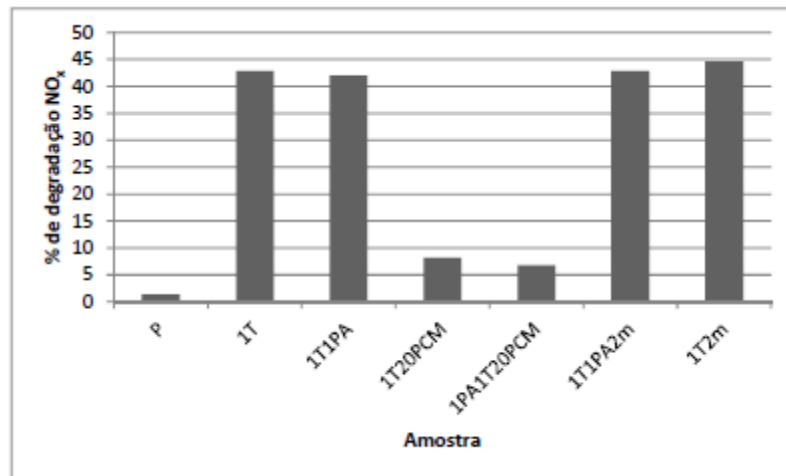


Gráfico 39 - Valores de degradação de NO_x (Vieira, 2012)

Nota-se que a adição de 1% de Titânia na amostra padrão, faz com que haja um aumento de degradação para 45%, já quando adicionada os mesmos 1% a uma argamassa com 20% de PCM, os elementos que realizam degradação não entram em ação, apresentando melhorias pouco significativas, mas melhor que a argamassa padrão passando de 2% para 8% o valor de degradação.

Nesta experiência permitiu-se perceber a influência do PCM em argamassas com cal e cimento e restantes aditivos, de modo a ser possíveis novas opções no uso de PCM. As argamassas de PCM, provaram terem bons resultados a nível de viscosidade plástica e tensão de escoamento apesar de necessitar mais água de amassadura. A relação do PCM com a argamassa mista PA no ensaio de capilaridade resultou numa grande absorção de quantidade de água, gerando um inchamento da amostra, o que, pode resultar em danos superficiais numa aplicação de reboco. O grau de finura do PCM, também contribui para que haja uma maior absorção de água. Nos ensaios de resistência, a adição de PCM, permitiu perceber que não há grande variação em relação à argamassa padrão, chegando até a aumentar a resistência à compressão. No ensaio fotocatalítico, a argamassa com PCM e Titânia mostrou ter pouca influência na degradação de NO_x, apresentando um ligeiro aumento face à argamassa padrão, mas muito aquém dos resultados obtidos sem PCM e com Titânia. (Vieira, 2012)

3.8- Argamassas de desempenho térmico melhorado, utilização de PCM como argamassa de acabamento

As argamassas prontas com PCM, tem sido comercializadas com ligantes à base de gesso tal como pelas empresas Webber e BASF. Nesta experiência é analisada a ligação



do PCM com o gesso, demonstrando as suas resistências à compressão e à flexão: Também foi feita uma análise térmica na opção de utilização como argamassa para acabamento, experimentado varias concentrações de PCM.

O autor propõe explorar a argamassa de gesso como argamassa para acabamento, numa fina camada face à espessura total do reboco. Deste modo a resistência final, será uma ponderação entre a argamassa padrão que terá 1cm de espessura e a argamassa com PCM para acabamento que terá 1mm de espessura (Monteiro, 2005).

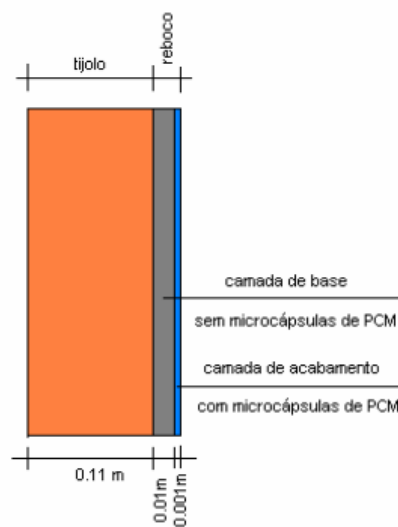


Figura 29 - Argamassa de gesso e PCM para acabamentos (Monteiro, 2005)

A resistência ponderada de um reboco multicamada será dada pela seguinte expressão:

Resistência à compressão:

$$R_{C_{Total}} = \frac{R_{Cp} \cdot e_p + R_{C_{pcm}} \cdot e_{pcm}}{e_p + e_{pcm}} \text{ [Mpa]} \quad \text{(equação 3.8.1)}$$

Resistência à flexão:

$$R_{S_{Total}} = \frac{R_{Sp} \cdot e_p + R_{S_{pcm}} \cdot e_{pcm}}{e_p + e_{pcm}} \text{ [Mpa]} \quad \text{(equação 3.8.2)}$$

R_{Cp} = Resistência à compressão da argamassa padrão.



$R_{c_{pcm}}$ = Resistência à compressão da argamassa padrão com PCM.

R_{s_p} = Resistência à flexão da argamassa padrão.

$R_{s_{pcm}}$ = Resistência à flexão da argamassa padrão com PCM.

e_p = Espessura da camada da argamassa padrão.

e_{pcm} = Espessura da camada da argamassa com PCM.

Considera-se uma primeira camada de 1 cm utilizando a argamassa padrão e 1mm para camada de acabamento utilizando a argamassa padrão com 30% de PCM, as resistências ponderadas serão as seguintes:

$$R_{C_{Total}} = \frac{3.154 * 1 + 0.206 * 0,1}{1 + 0,1} = 2,88 \text{ MPa}$$

$$R_{S_{Total}} = \frac{1.62 * 1 + 0.17 * 0,1}{1 + 0.1} = 1,49 \text{ MPa}$$

Célula de teste

O estudo das temperaturas exteriores e das paredes com e sem PCM multicamada (1cm + 1mm), tal como esquematizado na figura seguinte, utilizando uma concentração de 25% de PCM, foi elaborado numa célula de teste de modo a perceber a eficácia da solução de PCM.

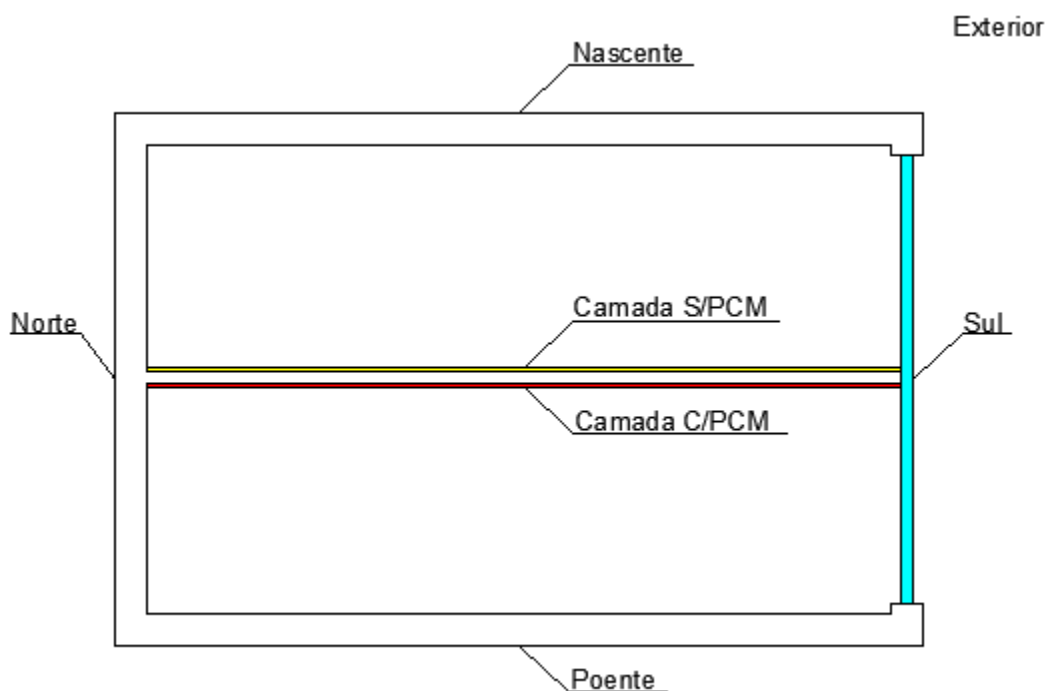


Figura 30 - Aplicação de multicamada de reboco (Monteiro, 2005)

Em seguida é apresentada uma tabela de custos da solução estudada:

	€/Kg	Quantidade usada (Kg)	Área rebocada (m ²)	Rendimento (€/m ²)
Massa de acabamento	0.15	3.2	12	1.04
PCM utilizado	15	0.8		

Tabela 32 - Custo da argamassa para acabamento (valores de 2004) (Monteiro, 2005)

Segundo o autor, a utilização da argamassa de acabamento acresce 1€/m² face à utilização de uma argamassa para acabamento sem PCM, o que significa por exemplo, numa casa com 100 m² de área útil, uma área de vãos interiores aproximadamente de 600m², ou seja 600€. Numa casa que tem um custo de construção de 100.000€, este valor não atinge um aumento de 1%. (Monteiro, 2005).

3.9- Análise de Resultados

Em síntese dos casos de estudo, a utilização de PCM tem algumas condicionantes para a sua utilização de modo a garantir maiores ganhos energéticos, quando a temperatura interior se mantém constante sem picos térmicos, o PCM tem dificuldade em alternar o seu estado, para tal em algumas experiencias foi forçada a variação da temperatura



interior, ou por ventilação noturna de modo a baixar a temperatura interior ou por colocação de painéis do tipo “*Parede de Trombe*” para aumentar a temperatura interior, a realização de um ciclo diário de solidificação-fusão do PCM é que permite tirar um total partido deste, assim aconselha-se a que na estação do verão, pelo menos durante a noite se abram as janelas para permitir a solidificação do PCM e assim durante o dia, haja a absorção de energia. Na estação do inverno, torna-se necessário que haja uma forma de aquecimento durante o dia, permitindo assim à noite que o PCM liberte a sua energia enquanto inicia a sua solidificação. A nível económico, o investimento inicial é elevado rondando os 40€/m² de parede, apesar disso torna-se redundante face ao investimento de um sistema AVAC que tem um tempo de vida mais limitado e necessita de uma manutenção anual, o período de retorno, está dependente do local climático, sendo que seja mais rápido para locais onde tenham verões bastante quentes pois o PCM torna-se mais eficaz com o calor, chegando a uma economia de 32%.

Em seguida é apresentado uma análise qualitativa entre os vários casos experimentais, a comparação contudo é meramente indicativa pois as condições de ensaio não foram iguais para todos os casos. A nível do estudo térmico pretendeu-se isolar os casos em que não houve arejamento de modo a que a temperatura interior do espaço atingisse valores mais altos, maximizando as diferenças de temperatura entre as soluções com PCM e sem PCM.

A nível de características da argamassa em estado endurecido é apresentado dois tipos de argamassa na tabela 33.

Argamassa	Retração (24h)	Retração (7 dias)	Teor em ar	PCM
Argamassa gesso e cal aérea	0.002mm/m	0.006mm/m	-	20%
Argamassa de cal aérea e cimento	-	4.5mm/m	15%	20%

Tabela 33 - Características em estado endurecido (Castellón, *et al.*, 2007),(Vieira, 2012



Argamassa	Massa volúmica	Módulo de elasticidade (28 dias)	Capilaridade	PCM
Argamassa gesso e cal aérea	-	-	-	20%
Argamassa de cal aérea e cimento	1.39g/cm ³	1.5Gpa	6g/dm ² .min ^{1/2}	20%

Tabela 34 - Características em estado endurecido (Castellón, *et al.*, 2007),(Vieira, 2012)

Tal como nos ensaios dos outros autores apresentados a retração aumentou com uma maior percentagem de PCM. Foi relevante também que o período de secagem para argamassas com PCM com cal aérea é mais extenso tendo a retração se notado até aos 28 dias. Os valores obtidos experimentalmente não foram muito semelhantes havendo grandes diferenças, o que leva a crer que o ensaio de retração no caso da argamassa de gesso e cal aérea não esteja correto dado que uma argamassa normalmente atinge valores de retração entre 4 e 10mm/m (Basto, *et al.*, 2005).

As experiencias dos diversos autores permitiram comprovar que o PCM pode ser utilizado com qualquer ligante seja cimento, cal aérea ou gesso em simultâneo com areia. Contudo há um maior conhecimento sobre a utilização com ligante gesso. A utilização de 20% de PCM com este ligante demonstrou ser o melhor compromisso em termos de resistência à compressão e flexão obtendo-se 0,8 MPa e 1,5 MPa respetivamente. É desaconselhado o aumento das concentrações de PCM pois as suas resistências pioram.

Nos ensaios de retração, o aumento da percentagem de PCM, implica um aumento de água na amassadura, que resulta numa maior percentagem de retração, para colmatar esta situação pode-se incorporar fibras de nylon de modo a reduzir a retração. A nível da trabalhabilidade, um aumento da percentagem de PCM, requer um aumento de água, pois o PCM absorve bastante água ainda assim o uso de superplastificastes pode ser necessário.

A ligação de gesso a cal aérea numa dosagem de 20% e 60% respetivamente e acrescentando 20% de PCM traduziu-se num melhor equilíbrio a nível de resistências.

Na utilização de cal aérea e 30% de PCM obteve-se 2,4MPa na resistência à compressão e 2.1 na resistência á flexão.



Já na utilização do ligante cimento e cal com 20% de PCM mostrou também ser uma boa conjugação obtendo-se resistências à compressão e flexão 2.6 MPa e 1 MPa respetivamente.

Na utilização de gesso, atingiram-se as resistências mais baixas como expectável, devido a ser um ligante mais poroso e menos denso. A resistência à compressão e flexão foram de 0.2 MPa e 0.3 MPa respetivamente.

Segundo a norma EN 998-1 relativa a argamassas de reboco e estuque para propósitos gerais, o valor mínimo da tensão de compressão é 0.4 MPa. O projecto de norma prEN 13279-1 (projeto de norma) relativo a argamassas de gesso indica que o valor mínimo se situara entre a 0.1MPa e 2.0MPa. Já no caso de aplicações especiais para fins de isolamento térmico (sendo o objetivo principal do uso) os valores mínimos para a compressão e flexão são considerados de 0.5MPa.

Argamassa	Percentagem de PCM	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)	Adesão ao suporte (MPa)	Norma de ensaio
Cal aérea e gesso	20%	1.4	0.8	n.d.	EN1015-11
Cal aérea	30%	2.4	2.1	n.d.	EN 1015-11
Cimento e cal aérea	20%	2.6	1	n.d.	EN 1015-11
Gesso	20%	0.2	0.3	n.d.	EN 13279-1
Gesso	25%	2.70	1.77	0.48	EN13279-1

Tabela 35 - Resistências nos vários tipos de ligantes com PCM

(Cunha, *et al.*, 2012) (Lucas, *et al.*, 2012) (Vieira, 2012) (Monteiro, 2005) (Camelo, *et al.*, 2006)

O estudo da aderência comprovou a forte influência do PCM na perda de aderência da argamassa ao suporte com ligante à base de cimento, algo que seria previsível ao se observar a fissuração. Contudo entre os 20 e os 30% de PCM em argamassas de cimento não alterou o seu valor de aderência (Tabela 35). A placa de gesso contendo PCM, registou valores superiores de aderência, o gesso com PCM cria menos fissuras em relação a argamassas com cimento resultando de uma maior força de adesão.

Como se pode observar na tabela 34, a argamassa de reboco com cal aérea e 30% de PCM, obteve os melhores resultados a nível de resistências mecânicas.



Material	%PCM	Aderência ao suporte (Mpa)
Argamassa com ligante de cimento	0	0,53
Argamassa com ligante de cimento	20	0.10
Argamassa com ligante de cimento	30	0.10
Alba balance Plaster boards - gesso	n.d.	0.25

Tabela 36 - Ensaio de aderência. Adaptado de Felix, *et al.*, (2009) e Alba balance thermalcore (2013)

Material	ΔT max(°C)	ΔT min(°C)	Δt max (h)	Δt min (h)	Percentagem de PCM
PCW	1.1	0.2	2	30min	24%
Cimento e PCM	3	2	2	2	5%
Gesso e PCM	4.9	1.4	3	2	20%
Cal aérea e PCM	4	5	5min	5min	30%
Gesso com PCM em acabamento	10	0.5	0	0	25%

Tabela 37 - Temperaturas das várias argamassas.

Adaptado de Feng, *et al.*, (2006), Castellón, *et al.*, (2007), Ermolli, *et al.*, (2011) Camelo, *et al.*, (2006) e Monteiro (2005)

Em termos de comportamento térmico houve uma grande discrepância entre os vários autores nos seus ensaios devido ao facto das condições de ensaio não serem as mesmas. Contudo a média de diferenças de temperatura entre soluções com PCM e sem PCM foi de 4°C, e um atraso de 2h na temperatura máxima e mínima. Quanto à percentagem de PCM, esta sendo maior, maior será a diferença de temperatura em relação à argamassa padrão (sem PCM).

É de salientar também que bastou 5%, de PCM na utilização em argamassas com cimento para ter benefícios térmicos equivalente a percentagens superiores com outro tipo de ligante.

Em média, houve uma maior variação em relação à temperatura máxima do que à mínima, isto porque a temperatura exterior atingiu uma diferença maior em relação à temperatura de fusão na altura de maior pico de calor, contribuído para que a absorção de energia fosse superior mas, na altura de libertação de energia esta foi apenas parcialmente libertada.



4 – Simulação

4.1 - Objetivo

Para melhor compreensão dos efeitos do PCM numa intervenção a um edifício, realizou-se uma simulação energética de um edifício em Cascais construído em 1960. O objetivo principal foi perceber qual a variação de temperaturas interiores de um apartamento após a adição de PCM ao seu revestimento interior num dia típico de Inverno e de Verão. A simulação foi feita no programa *DesignBuilder* tendo em conta para cada material, os valores de entalpia, resistência térmica, densidade dos materiais e curvas de entalpia para o caso dos materiais de mudança de fase, tendo também em conta os dados meteorológicos fornecidos pelo INETI.

Na construção do modelo teve-se em conta a geometria do edifício assim como o edifício vizinho, de modo a recriar as condições de fronteira para o apartamento em estudo, assim como as suas atividades por piso, materiais, exposição solar, velocidade do vento e sistemas de ventilação AVAC (apenas no R/C) e Natural.

4.2 - Método de Calculo

O DesignBuilder utiliza dois tipos de cálculo para simulação, o CTF - Conduction Transfer Function, que considera que os materiais mantêm as suas características independentemente da temperatura a que estejam e o CFD - Conduction Finite Difference, que considera a alteração das características dos materiais conforme a temperatura a que estão sujeitos. No caso da utilização do PCM o CTF não pode ser usado pois o PCM altera as suas características conforme a temperatura, nomeadamente o seu valor de entalpia, conforme esteja em período sensível ou período latente de modo que foi utilizado o método de cálculo de CFD.



4.3 - Caracterização do modelo

- Localização

Distancia ao mar	800m
Altitude	5m
Longitude e Latitude	(-9.42°,38.69°)
Orientação	10° NW
Classe de exposição ao vento 1 sem dispositivos de admissão de ar na fachada	$R_{ph} = 1 \text{ h}^{-1}$

Gráfico 40 - Dados geográficos, (RCCTE)

- Arquitetura

O edifício de estudo é composto por 4 pisos: o R\C dedicado a lojas com forte componente envidraçada e os restantes andares para fim residencial. O edifício possui uma área útil de construção de 900m².

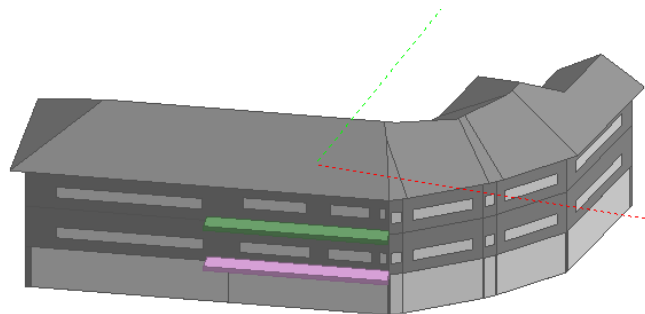


Figura 31 - Edifício Modelo

O apartamento em estudo, localizado no 1º andar, tem uma área útil de 149m². Apresenta-se a planta na Figura 32.

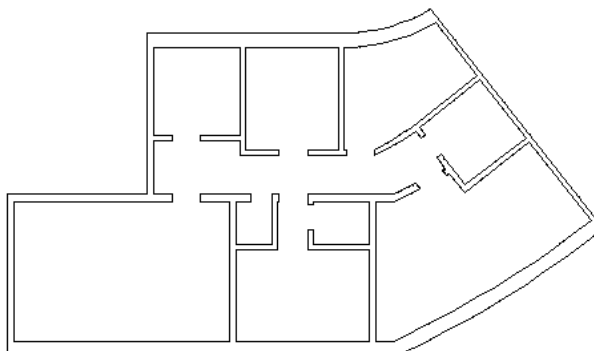


Figura 32 - Planta do modelo de estudo

- Materiais

Os materiais utilizados, típicos da construção dos anos 60, estrutura com grande espessura em betão armado, paredes de um único pano sem isolamento térmico e janelas de vidro simples. Na solução com PCM, foi acrescentado às paredes e teto no lado interior o material BioPCM M182/Q21 seguido de placas de gesso cartonado como se pode observar nas tabelas 37 e 38.

- Sem PCM

Paredes exteriores	
Elemento	Espessura (cm)
Reboco de cimento	3
Tijolo do tipo "duplex"	34
Reboco com acabamento em estuque	3
Paredes interiores	
Elemento	Espessura (cm)
Reboco com acabamento em estuque	2.5
Tijolo de 30x20x15	15
Reboco com acabamento em estuque	2.5



Materiais de Mudança de Fase em Revestimentos

Elemento	Espessura (cm)
Soalho em madeira	2.5
Laje em betão armado	30
Reboco com acabamento em estuque	1.5

Tabela 38 - Elementos de construção sem PCM

Elemento	U (W/m ² .°C)
Paredes exteriores sem pcm	1.299
Paredes interiores sem pcm	2.099
Laje sem pcm	1.688
Janelas com vidros simples	6.257

Tabela 39 - Condutividade térmica dos elementos sem PCM

- Com PCM

Paredes exteriores com PCM	
Elemento	Espessura (cm)
Reboco de cimento	3
Tijolo do tipo "duplex"	34
Reboco com acabamento em estuque	3
BioPCM M182/Q21	1.2
Placa de gesso cartonado	1.5
Paredes interiores com PCM	
Elemento	Espessura (cm)



Materiais de Mudança de Fase em Revestimentos

Placa de gesso cartonado	1
Elemento	Espessura (cm)
BioPCM M182/Q21	1.2
Reboco com acabamento em estuque	2.5
Tijolo de 30x20x15	15
Reboco com acabamento em estuque	2.5
BioPCM M182/Q21	1.2
Placa de gesso cartonado	1
Laje com PCM	
Elemento	Espessura (cm)
Soalho em madeira	2.5
Laje em betão armado	30
Reboco com acabamento em estuque	1.5
BioPCM M182/Q21	1.2
Placa de gesso cartonado	1

Tabela 40 - Elementos de construção com PCM

Elemento	U (W/m ² .°C)
Paredes exteriores com pcm	1.103
Paredes interiores com pcm	1.434
Laje com pcm	1.444
Janelas com vidros simples	6.257

Tabela 41 - Condutividade térmica dos elementos com PC



4.4 - Resultados

Para a elaboração da simulação escolheu-se um dia típico de inverno, 1 de Janeiro e um dia típico de verão, 1 de Agosto em que as amplitudes térmicas são maiores. A escolha do PCM teve como fator principal a maior diferença térmica entre a solução sem PCM que resultou num PCM com temperatura de fusão de 21°C num compromisso entre a estação de Verão e Inverno.

✓ Inverno

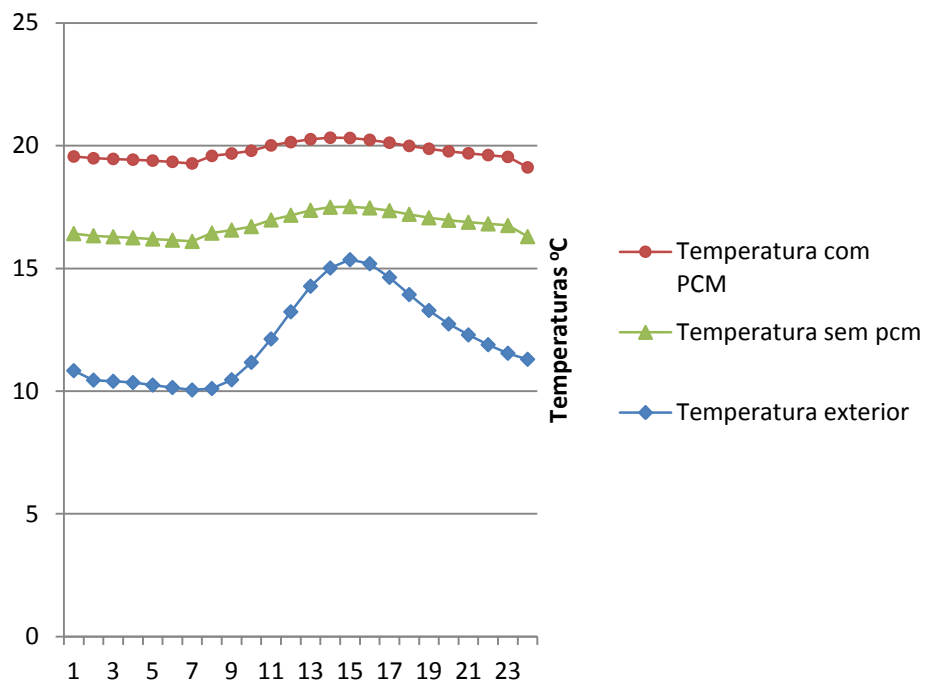


Gráfico 41 - Temperaturas a 1 de Janeiro

Como se pode observar no gráfico de Inverno existiu uma diferença considerável entre PCM e sem PCM no apartamento modelo, a diferença média de temperaturas durante as 24h foi de 3.105°C. Às 7h foi atingida a temperatura mais baixa exterior, 10.047°C e a temperatura interior sem PCM e com PCM foi respetivamente 16.033 e 19.368°C.



✓ Verão

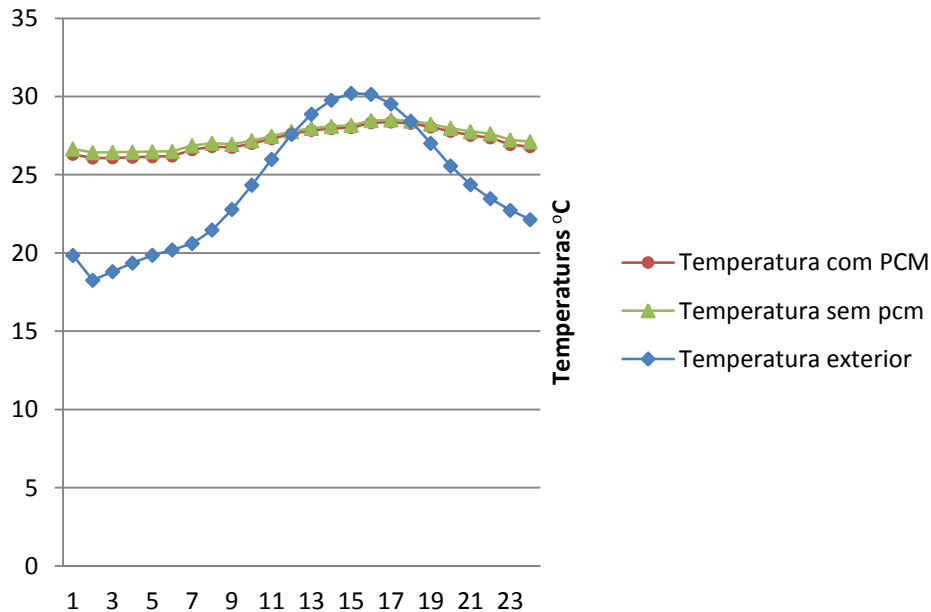


Gráfico 42 - Temperaturas a 1 de Agosto

A variação de temperaturas no Verão como se pode observar no gráfico foi mínima entre a solução com PCM e sem PCM, houve realmente um decréscimo da temperatura na ordem dos 0.222°C , a temperatura máxima exterior foi de 30.205°C às 15h, já a temperatura máxima interior foi registada às 17h em que a temperatura com PCM foi de 28.366°C e sem PCM 28.508°C .

4.5 - Análise de Resultados

A utilização de programas de simulação permite otimizar e ajustar a intervenção energética a uma dada área, a utilização de PCM, trouxe vantagens para o conforto térmico reduzindo os picos térmicos interiores, o facto de a temperatura interior não se aproximar ao ponto de fusão/solidificação do PCM nos 21°C na estação de verão contribuiu para que o armazenamento de energia fosse limitado e não fosse tão notória a sua utilização como durante o Inverno em que a temperatura interior se aproximou do ponto de fusão gerando melhorias térmicas. Ainda assim para este modelo poderá-se melhorar as resistências térmicas que ainda estão bastante baixas e facultaram elevadas perdas e ganhos térmicos no Inverno\Verão nomeadamente.



5 - CONCLUSÃO

5.1 – Conclusões

O desenvolvimento deste trabalho contribuiu para se perceber o princípio de funcionamento dos materiais de mudança de fase relativamente à sua grande capacidade de armazenamento de energia que é devida essencialmente à sua longa duração do período de latência entre fases e a sua interação energética por condução e convecção. Entre os vários tipos de materiais de mudança de fase, os materiais orgânicos, são os que transmitem maior potencialidade para a utilização devido à sua facilidade de configuração molecular de modo a alterar o valor de ponto de fusão e se poder adaptar a cada situação. Também por outro lado, a sua consistência e manutenção das características ao longo de vários ciclos de fusão/solidificação. Para a aplicação à construção o micro-encapsulamento do PCM, contribuiu para que se pudesse diversificar a utilização do PCM junto com outros materiais sem pôr em causa a estabilidade e potencialidade. As opções de aplicação hoje em dia são diversas, contudo a aplicação de PCM em revestimentos interiores paredes e teto, permitiu que se reduzisse a fatura energética a nível de climatização interior dos edifícios entre os 15 e os 32%, segundo estudos realizados por Origgi (2011).

A nível térmico o PCM, torna-se mais eficaz em locais com grandes amplitudes térmicas, conseguindo reduzir em média 4°C à temperatura máxima e aumentar em 2°C a temperatura mínima, essencialmente porque os edifícios conseguem armazenar algum calor e não deixam o PCM descarregar toda a sua energia potencial. Deste modo, edifícios localizados em locais com elevados picos térmicos têm um aproveitamento superior do que em locais com temperaturas mais amenas. Assim, para que a sua utilização seja mais eficaz será necessário na estação de arrefecimento prover o arejamento interior da habitação de forma a baixar a temperatura interior e durante o dia com o calor para que o PCM tenha a máxima capacidade para absorver energia. Na estação de aquecimento, durante o dia é necessário aumentar os ganhos térmicos seja por via de raios solares ou sistemas de aquecimento, de modo a que à noite, haja uma libertação gradual de energia por parte dos PCM.

Para um nível de otimização energética a escolha da percentagem de incorporação de PCM em argamassas assim como a temperatura de fusão vai influenciar a quantidade de energia armazenada assim como o valor da temperatura média interior de um edifício. Contudo, estas percentagens de incorporação não devem ser superiores a 30% para a



maioria das argamassas pois colocam em risco a funcionalidade do revestimento no que se refere à sua resistência mecânica. Devido ao facto de o PCM absorver uma quantidade significativa de água, poderá ocorrer fissuração em alguns revestimentos, especialmente em revestimentos com ligantes cimentícios, neste caso aconselha-se utilizações inferiores a 10% ou a adição de cal de modo a que a argamassa ganhe mais elasticidade.

A utilização de argamassas com PCM para acabamento, pode ser uma solução bastante útil para se iniciar uma reabilitação energética de um edifício, a utilização de finas camadas com PCM à superfície permite uma redução de custos de aplicação que mostrou ser eficaz pois esta fina camada está em contacto com o ar interior, favorecendo as trocas energéticas.

Na aplicação ao RCCTE dos PCM, a contribuição dos PCM pode vir a ser contabilizada para o cálculo das perdas/ganhos térmicas totais, para o cálculo da inercia térmica, para as necessidades internas de aquecimento, contribuindo como uma fonte de calor justificada. Nas necessidades internas de arrefecimento, o regulamento não prevê perdas térmicas, mas poder-se-á contabilizar quando se fizer um pré-dimensionamento de um ar-condicionado, nomeadamente reduzindo a sua potência.

Na Alemanha e em outros países já começa a ser uma realidade o aparecimento dos PCM na construção seja em edifícios novos ou reabilitados. A era dos edifícios com capacidade de produzir a sua energia para autoconsumo é o futuro e a integração de mecanismos passivos como o PCM, irão certamente contribuir para que as casas venham a ser cada vez mais eficientes energeticamente.

5.2 – Desenvolvimentos futuros

No que se refere a estudos futuros, considero necessário e interessante o aprofundamento da ciência com base em:

- ✓ O estudo do desempenho das argamassas a longo prazo e pesquisa para perceber se a sua capacidade de armazenamento de energia se matem constante;
- ✓ No ponto de vista de otimização energética a realização de uma análise comparativa sobre a incorporação de PCMs com ponto de fusão mais alto para o verão e mais baixo



para o inverno no mesmo revestimento relativamente a revestimentos com apenas um tipo de PCMs;

- ✓ Estudo da viabilidade de utilização de outro tipo de materiais para as microcápsulas de forma a aumentar a sua condutibilidade sem perderem a sua resistência e pequena dimensão.
- ✓ Comparação entre modelos reais e de simulação ao nível de edifícios com PCM, de modo a que futuramente se possa ter uma maior confiança nos modelos de simulação a nível térmico.



BIBLIOGRAFIA

Alba balance thermalcore http://www.rigips.ch/download/rigips_alba_balance_infobro_de_low_en_korr_arial.pdf (2013-07-16)

Araujo, A. *Transporte e Armazenamento de Energia*. Universidade de Aveiro, www.scribd.com/doc/95503162 (2013-04-19).

Bastos, P.; Nakakura, E.; Cincotto, M. *Ensaio de Retração de Argamassas nos Estados Frescos e Endurecido—contribuição para a normalização Brasileira*. In: 1º Congresso Nacional De Argamassas De Construção. Portugal, 2005.

Buckley, Theresa M. *Phase change thermal control materials, method and apparatus*. U.S. Patent No 5,722,482, 1998.

Camelo, Susana, et al. *Manual de apoio à aplicação do RCCTE*. ADENE, LNEC, INETI, IPQ, versão, 2006. Portugal, 2006.

Cardoso, I., *Aplicação de Microcápsulas de PCM em Materiais de Isolamento Térmico para Fatos de Proteção e Combate ao Fogo*, Departamento de Engenharia Têxtil, Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2006.

Castellón, C., et al. *Use of microencapsulated phase change materials in building applications*. In: *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings X International Conference*. Espanha, 2007.

Construlink, *Gesso Cartonado/Pladur*. Dossier Técnico, http://construlink.com/dt_27_gesso_cartonado_pladur_2010_09_21_.pdf (2013-04-23)

Cool-phase, Monodraught <http://www.monodraught.com/> (2013-04-11)

Costa, A. *Folhas da cadeira de Física das Construções*. ISEL. Portugal, 2009

Coutinho, João. *Materiais de mudança de fase para isolamento térmico e armazenamento de energia*. Engenharia Química, 2006, 2: 4-6.

Cunha, Sandra R., et al. *Argamassas Térmicas Sustentáveis: O Contributo dos Materiais de Mudança de Fase*. Portugal, 2012.

Da Silva, Narciso Gonçalves. *Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária*. Portugal, 2006.

Davis, Danny Allen, et al. *Macrocapsules containing microencapsulated phase change materials*. U.S. Patent No 6,703,127, 2004.

Decreto de Lei, 2006, 80. *Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios*. Portugal, 2006.



Dupont Energain, http://energain.co.uk/Energain/en_GB/index.html (2013-08-06)

Duran Heat, <http://www.duran-heat.com/technology/phase-change-material/> (2013-08-02)

Ermolli, Sergio Russo; Koukkari, Heli; Bragança, Luis. *Phase changing materials in building elements*. Portugal 2011.

Félix, Mónica; Aguiar, J. L. *Study of a cement mortar with incorporation of PCM microcapsules*. Portugal, 2009.

Feng, Guohui, et al. *Research on Thermal Properties in a Phase Change Wallboard Room Based on Air Conditioning Cold Storage*. 2006.

Gonçalves, Ana Maria Almeida. *Simulação numérica da transferência de calor numa cavidade*. Portugal, 2011.

Gonçalves, Helder; Graça, João Mariz. *Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal*. Portugal, 2004.

Grade, et al., *Projeto de verificação térmica de edifício unifamiliar*. Física das Construções ISEL. Portugal, 2009

lapmei, *Micropolis: Inovação constante no mundo das microcápsulas*. Informar Portugal, 2004, 6.

Jornal do Governo dos Municípios, nº10. *Gesso na arquitetura*. Universidade Federal de Santa Catarina. Brasil, Dezembro 2004.

Kyoto Protocol to the United Nations framework convention to the climate change. United Nations. 1998

L. Cabeza, A. Heinz e W. Streicher, *Inventory of phase change materials (PCM), A Report of IEA Solar Heating and Cooling Programme – Task 32, Report C of Subtask C*, 2005, 1-33.

LI, Wei, et al. *Preparation and characterization of microencapsulated phase change material with low remnant formaldehyde content*. *Materials Chemistry and Physics*, 2007.

Lucas, S., et al. *Papel de nano-aditivos na funcionalização de argamassas*. Portugal, 2012.

Lucas, S.; Aguiar, J. L.; Ferreira, V. M. *Argamassas funcionais para uma construção sustentável*. Portugal, 2010.

Lucas, S.; Aguiar, J. L.; Ferreira, V. M. *Argamassas funcionais para uma construção sustentável*. Portugal, 2010.

Mendes, J. Farinha, et al. *Armazenamento de Energia Solar Térmica*. Brasil, 2010.

Micronal *PCM Smartboard*, BASF, http://www.lowex.info/projekte/Importe/projekt08/FL_SmartBoard_e.pdf (2013-04-23)



Miranda, Lina Maria Carvalho da Costa. *Estudo comparativo entre argamassa de revestimento à base de cimento com adição da cal hidráulica e da cal hidratada*. Portugal, 2009.

Monteiro J. , Aguiar J. et al, *Utilização de materiais activos em argamassas*. Universidade do Minho. 2005

Monteiro, J. et al *Utilização de materiais activos em argamassas*. Portugal, 2005

Monteiro, José M., et al. *Argamassas com desempenho térmico melhorado*. Portugal, 2005.

Origgi, Daniela. BASF AG *Influence of Thermal Insulation and Phase-Change Material on Energy Demand and CO₂-Emissions in Different European Climates*. Alemanha, 2006.

Outlast® <http://www.outlast.com/pt/usos-finais/outros-usos-finais/>, (2012-07-11).

Patente da Microtek, <http://www.microteklabs.com/u-s-patents.html> (2013-04-12)

Pérez J. Ph. et Romulus A.M. *Thermodynamique. Fondements et applications*, Masson, Paris, 1993.

Pires, Luís; Silva, Pedro D.; Castro Gomes, J. P. *A importância do consumo energético dos edifícios na Europa: soluções propostas para a sua redução*. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2005.

Ribeiro, Carmen Couto. *Materiais de construção civil*. Editora UFMG,Portugal, 2002.

Sabine P. et al, the *Three-litre House – Innovative Insulation Brings Energy Savings in the Refurbishment of Old Buildings*. Alemanha, 2002.

Schubert W. *3-Liter-House in the modernization of old properties*, Luwoge, Wohnugsuntemehmen der BASF GmbH, Alemanha, 2005.

Sharma, S. D.; Sagara, Kazunobu. Latent heat storage materials and systems: a review. *International Journal of Green Energy*, 2005, 2.1: 1-56.

Silva, N. *Incorporação de materiais de mudança de fases em materiais de construção*. Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2009.

Silva, N., et al. *Gypsum plasters for energy conservation*. 2007.

Su, Jun-Feng, et al. *Thermal conductivity of microPCMs-filled epoxy matrix composites*, *Colloid and Polymer Science*, 2011.



Su, Jun-Feng; Wang, Lixin; Ren, Li. *Fabrication and thermal properties of microPCMs: Used melamine formaldehyde resin as shell material*. Journal of applied polymer science, 2006, 101.3: 1522-1528.

The Schundler Company, *Schundler vermiculite concrete lightweight and Insulating*, <http://www.schundler.com/vermcon.htm> (2013-09-20)

Vieira, João Emanuel Ramos. *Funcionalização de argamassas para controlo das condições ambiente*. Portugal, 2012.

Vieira, João. *Funcionalização de argamassas para controlo das condições ambiente*. Universidade de Aveiro. Portugal, 2012

Weber mur clima, Weber Saint-Gobain, <http://www.sg-weber.de/fassade-wand/weber-guide/produkte/gipsprodukte/webermur-clima-26.html> (2013-04-24)

Wikipedia Carl Reinchenbach, http://en.wikipedia.org/wiki/Carl_Reichenbach (2013-11-22)

Zhang, G. Sun, Z. *Mechanical properties of melamine-formaldehyde microcapsules*. *Journal of microencapsulation*, 2001.



ANEXO I – DURAÇÃO DO PERÍODO DE AQUECIMENTO (RCCTE)

2478

DIÁRIO DA REPÚBLICA — I SÉRIE-A

N.º 67 — 4 de Abril de 2006

QUADRO III

Distribuição dos concelhos de Portugal continental segundo as zonas climáticas e correspondentes dados climáticos de referência

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 projecto (°C)	Amplitude térmica (°C)
Abrantes	I ₂	1 630	6	V ₃	36	17
Águeda	I ₁	1 490	6,7	V ₁	31	12
Aguiar da Beira	I ₃	2 430	7,3	V ₂	32	13
Alandroal	I ₁	1 320	6	V ₃	36	17
Albergaria-a-Velha	I ₁	1 470	6,3	V ₁	30	11
Albufeira	I ₁	1 130	5,3	V ₂	33	14
Alcácer do Sal	I ₁	1 240	5,3	V ₃	35	16
Alcanena	I ₂	1 680	6	V ₂	33	14
Alcobaca	I ₂	1 640	6,3	V ₁	29	10
Alcochete	I ₁	1 150	5,3	V ₃	34	13
Alcoutim	I ₁	1 270	5	V ₃	34	14
Alenquer	I ₁	1 410	5,7	V ₂	33	12
Alfândega da Fé	I ₃	2 340	7,7	V ₂	33	15
Alijó	I ₃	2 500	7	V ₃	34	16
Aljezur	I ₁	1 120	5,3	V ₁	30	10
Aljustrel	I ₁	1 260	5,7	V ₃	35	17
Almada	I ₁	1 160	5,3	V ₁	31	10
Almeida	I ₃	2 540	7,7	V ₂	33	16
Almeirim	I ₁	1 340	5,7	V ₃	35	15
Almodôvar	I ₁	1 390	5,7	V ₃	35	16
Alpiarça	I ₁	1 360	5,7	V ₃	35	15
Alter do Rio	I ₁	1 340	6	V ₃	36	16
Alvaiázere	I ₂	1 810	6	V ₃	34	14
Alvão	I ₁	1 220	5,3	V ₃	36	18
Amadora	I ₁	1 340	5,7	V ₁	31	10
Amarante	I ₂	2 040	6,7	V ₂	33	13
Amares	I ₂	1 690	7	V ₂	32	14
Anadia	I ₁	1 460	6,3	V ₂	32	12
Ansião	I ₂	1 780	6	V ₂	33	14
Arcos de Valdevez	I ₃	2 250	6,7	V ₂	32	14
Arganil	I ₂	2 050	7	V ₂	33	14
Armamar	I ₃	2 370	6,3	V ₃	35	15
Arouca	I ₂	2 050	7	V ₁	31	12
Arraiolos	I ₁	1 380	5,7	V ₃	35	17
Arronches	I ₁	1 460	6,3	V ₃	35	16
Arruda dos Vinhos	I ₁	1 480	5,3	V ₂	33	11



ANEXO II – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO A 1 DE AGOSTO

Horas	Temperatura sem pcm °C	Temperatura exterior °C	Temperatura com pcm Q21 °C	Variação °C
01/08/2002 01:00	26.66093	19.8525	26.33505	0.32588
01/08/2002 02:00	26.44162	18.2625	26.10575	0.33587
01/08/2002 03:00	26.45001	18.815	26.11847	0.33154
01/08/2002 04:00	26.47029	19.3625	26.1495	0.32079
01/08/2002 05:00	26.49074	19.8625	26.1827	0.30804
01/08/2002 06:00	26.51648	20.205	26.22682	0.28966
01/08/2002 07:00	26.87975	20.615	26.63984	0.23991
01/08/2002 08:00	27.04035	21.4775	26.83286	0.20749
01/08/2002 09:00	26.96987	22.7875	26.77768	0.19219
01/08/2002 10:00	27.1936	24.34	27.02131	0.17229
01/08/2002 11:00	27.47324	25.9925	27.3217	0.15154
01/08/2002 12:00	27.76526	27.5875	27.62712	0.13814
01/08/2002 13:00	27.97454	28.8775	27.83758	0.13696
01/08/2002 14:00	28.08882	29.7675	27.94929	0.13953
01/08/2002 15:00	28.15264	30.205	28.00687	0.14577
01/08/2002 16:00	28.46729	30.1425	28.3227	0.14459
01/08/2002 17:00	28.5088	29.5275	28.36681	0.14199
01/08/2002 18:00	28.43974	28.4175	28.28536	0.15438
01/08/2002 19:00	28.2436	27.0125	28.06191	0.18169
01/08/2002 20:00	27.98867	25.565	27.78689	0.20178
01/08/2002 21:00	27.77377	24.375	27.54209	0.23168
01/08/2002 22:00	27.63949	23.48	27.3827	0.25679
01/08/2002 23:00	27.2445	22.7325	26.95714	0.28736
02/08/2002	27.12228	22.1375	26.82346	0.29882



ANEXO III – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO A 1 DE JANEIRO

Horas	Temperatura sem pcm °C	Temperatura exterior °C	Temperatura com pcm Q21 °C	Varição °C
01/08/2002 01:00	16.34503	10.8325	19.6182	3.27317
01/08/2002 02:00	16.25946	10.4475	19.54776	3.2883
01/08/2002 03:00	16.21843	10.4	19.52126	3.30283
01/08/2002 04:00	16.17895	10.3475	19.49228	3.31333
01/08/2002 05:00	16.13087	10.2475	19.45425	3.32338
01/08/2002 06:00	16.0839	10.1475	19.4167	3.3328
01/08/2002 07:00	16.03304	10.0475	19.36836	3.33532
01/08/2002 08:00	16.37655	10.105	19.67223	3.29568
01/08/2002 09:00	16.5038	10.4625	19.76261	3.25881
01/08/2002 10:00	16.64674	11.1725	19.86959	3.22285
01/08/2002 11:00	16.91662	12.125	20.08123	3.16461
01/08/2002 12:00	17.11379	13.23	20.20991	3.09612
01/08/2002 13:00	17.30855	14.2725	20.3244	3.01585
01/08/2002 14:00	17.42416	15.015	20.38447	2.96031
01/08/2002 15:00	17.44452	15.3525	20.37426	2.92974
01/08/2002 16:00	17.39332	15.19	20.30439	2.91107
01/08/2002 17:00	17.28776	14.6325	20.19448	2.90672
01/08/2002 18:00	17.1508	13.9325	20.06877	2.91797
01/08/2002 19:00	17.0095	13.285	19.95498	2.94548
01/08/2002 20:00	16.90535	12.7375	19.85366	2.94831
01/08/2002 21:00	16.82714	12.29	19.77196	2.94482
01/08/2002 22:00	16.76049	11.89	19.69988	2.93939
01/08/2002 23:00	16.69693	11.5425	19.62758	2.93065
02/08/2002	16.23746	11.295	19.1977	2.96024



ANEXO IV - RENOVAÇÃO DO AR NO INTERIOR DOS EDIFÍCIOS (RCCTE)

QUADRO IV.1

Valores convencionais de R_{ph} (em h^{-1}) para edifícios de habitação

Classe de exposição	Dispositivos de admissão na fachada	Permeabilidade ao ar das caixilharias (de acordo com a norma EN 12207)								Edifícios conformes com a NP 1037-1
		Sem classificação		Classe 1		Classe 2		Classe 3		
		Caixa de estore		Caixa de estore		Caixa de estore		Caixa de estore		
		Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	
1	Sim	0,90	0,80	0,85	0,75	0,80	0,70	0,75	0,65	0,60
	Não	1,00	0,90	0,95	0,85	0,90	0,80	0,85	0,75	
2	Sim	0,95	0,85	0,90	0,80	0,85	0,75	0,80	0,70	
	Não	1,05	0,95	1,00	0,90	0,95	0,85	0,90	0,80	
3	Sim	1,00	0,90	0,95	0,85	0,90	0,80	0,85	0,75	
	Não	1,10	1,00	1,05	0,95	1,00	0,90	0,95	0,85	
4	Sim	1,05	0,95	1,00	0,90	0,95	0,85	0,90	0,80	
	Não	1,15	1,05	1,10	1,00	1,05	0,95	1,00	0,90	