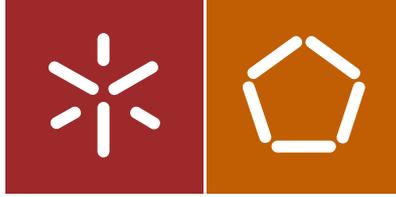




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José André Gomes Pinheiro

Estudo de tecnologias e materiais de
mudança de fase para armazenamento de
energia térmica na envolvente de edifícios



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

José André Gomes Pinheiro

Estudo de tecnologias e materiais de
mudança de fase para armazenamento de
energia térmica na envolvente de edifícios

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Luís Bragança
Supervisionado por:
Engenheira Catarina Araújo

AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer aos meus orientadores, ao Professor Doutor Luís Bragança e Engenheira Catarina Araújo, por todo o conhecimento transmitido, incentivo e ajuda prestada ao longo deste trabalho, um muito obrigado!

Aos meus pais gostaria de agradecer por todo o apoio, confiança, motivação que me transmitiram ao longo destes anos, tornando-me na pessoa que sou hoje. Um muito obrigado!

Aos meus amigos e à minha família, por todo o apoio e amizade sendo essenciais ao longo da minha vida e no percurso académico.

Gostaria por ultimo de agradecer à Martinha Correia e ao José Pedro G. Oliveira por todo o apoio, motivação e dedicação e também por sempre me encorajarem e apoiarem incondicionalmente nesta fase da minha vida.

A todas as pessoas, que ao longo do tempo e em diferentes níveis contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho, um MUITO OBRIGADO!

RESUMO

O consumo e a produção de energia estão associados a impactos ambientais muito elevados. O sector dos edifícios é um dos que mais contribui para estes impactos. Isto deve-se em parte à existência de padrões de conforto, cada vez mais exigentes e a um elevado ritmo de crescimento da população. O consumo de energia nos edifícios residenciais está maioritariamente associado ao aquecimento e arrefecimento do ambiente interior. Uma solução para reduzir estes consumos é a implementação de tecnologias e materiais de mudança de fase para o armazenamento de energia térmica de forma a obter um maior rendimento económico e conforto térmico. O número de estudos sobre esta temática tem aumentando ao longo dos anos, o que demonstra as expectativas benéficas deste tipo de tecnologias.

Esta dissertação tem por objetivo o estudo dos materiais de mudança de fase e análise da sua viabilidade económica quando aplicados no Norte de Portugal. Para isso, foram analisados oito PCMs com diferentes temperaturas de fusão num edifício de geometria simples com soluções construtivas de uma habitação unifamiliar em diferentes zonas do Norte de Portugal (Bragança, Montalegre, Porto e Vila Real).

Durante o desenvolvimento do trabalho foram utilizadas ferramentas de simulação dinâmica, o *DesignBuilder* e o *EnergyPlus*, de modo a estudar o edifício em questão. Numa primeira fase identificou-se o tipo e a quantidade de PCMs para as quatro zonas de estudo. De seguida estudaram-se as soluções construtivas ou o suporte que melhor se comporta com os materiais de mudança de fase. Numa última fase estudaram-se, para as quatro cidades, os PCMs que obtiveram melhor desempenho térmico na primeira fase com a melhor solução construtiva, no edifício em questão.

Para a solução otimizada do Porto foi efetuada uma análise económica e uma análise de conforto térmico para os utilizadores do edifício.

O estudo constata a relevância da incorporação dos PCMs na envolvente do edifício obtendo reduções nas necessidades energéticas e vantagens do ponto de vista do conforto térmico. Contudo numa análise custo/benefício conclui-se que o custo da aquisição deste material não pode ser recuperado tão facilmente. Em suma, os PCMs implementados no edifício analisado apresentam grandes benefícios em termos energéticos e conforto.

Palavras-Chave: Materiais de mudança de fase, energia, armazenamento de energia térmica, calor latente.

ABSTRACT

The consumption and production of energy are associated with high environmental impacts. The sector of buildings is a major contributor to this impact. This happens mostly due to the existence of nowadays comfort patterns, that are more and more demanding and to an excessive growth rate of the population. The consumption of energy in the residential buildings is mostly associated to the heating and the cooling of the indoor environment. One solution to reduce this consumption is the implementation of phase-change materials and technologies for thermal energy storage in order to obtain a larger economic efficiency and thermal comfort. The number of studies about this thematic have increased for the past years. These studies have demonstrated the benefits of this type of technologies. This dissertation aims to study phase-change materials (PCM). Additionally it is intended to perform an economic viability analysis when applying PCMs in a building located in the North of Portugal. To do so, eight PCMs with different temperatures of fusion were analysed in a building of simple geometry. The case study was analysed in different zones of the North of Portugal (Bragança, Montalegre, Porto and Vila Real).

During the development of the work dynamic software tools were used, namely, *Design Builder* and *EnergyPlus*. In a first phase the type and the quantity of PCMs for the four zones of study were analysed. Then, the constructive solution and support element with the best behavior in the presence of PCMs were analysed. In the last phase, the PCMs with the best thermal performance and the best constructive solution were analysed together in the case study. The economic analysis was performed for the optimized solution for the location of Porto. In addition a thermal comfort analysis was also conducted for this scenario.

In the study the relevance of the incorporation of the PCMs in the envelope of the building is verified. This solution allows to obtain reductions in the energy needs and it also brings advantages in the thermal comfort point of view. However, the economic viability analysis shown that the investment cost of this material is not easily recovered. In summary, the PCMs implemented in the analysed building presents high benefits in terms of energy and comfort.

Key Words: Phase change materials, energy, thermal energy storage, latent heat.

ÍNDICE

1. Enquadramento.....	1
1.1 Âmbito.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da Dissertação.....	3
2. Estado da Arte.....	5
2.1 Eficiência Energética.....	5
2.2 Armazenamento de calor.....	7
2.2.1 Armazenamento de Calor Sensível.....	7
2.2.2 Armazenamento de Calor Latente.....	7
2.3 Materiais de mudança de fase.....	8
2.4 Classificação dos PCMs.....	13
2.4.1 PCMs Orgânicos.....	13
2.4.2 PCMs Inorgânicos.....	15
2.4.3 Misturas Eutécticas.....	16
2.5 Técnicas de incorporação dos materiais de mudança de fase nos materiais de construção.....	19
2.5.1 Incorporação direta.....	19
2.5.2 Imersão.....	19
2.5.3 Impregnação a Vácuo.....	20
2.5.4 Encapsulamento.....	21
2.6 Tecnologias para armazenamento de energia térmica.....	25
2.6.1 Sistemas Passivos.....	25
2.6.2 Sistemas Ativos.....	25
3. Metodologia.....	31
3.1 Simulação.....	32
3.1.1 Procedimento.....	32
3.1.2 Programa de Simulação Dinâmica.....	35
3.2 Caso de estudo.....	39

3.3	Soluções Construtivas.....	45
3.3.1	<i>Dados de entrada no software</i>	47
3.4	Materiais de Mudança de fase	50
4.	Resultados e Discussões	57
4.1	Primeira Fase	57
4.1.1	Porto – Climatização permanentemente ativa	57
4.1.2	Porto – Climatização durante o período de ocupação	61
4.1.3	Bragança.....	63
4.1.4	Montalegre	67
4.1.5	Vila Real.....	69
4.1.6	Soluções otimizadas	71
4.2	Segunda Fase	73
4.3	Terceira Fase.....	76
4.3.1	Bragança.....	76
4.3.2	Montalegre	79
4.3.3	Porto	81
4.3.4	Vila Real.....	83
4.4	Conforto.....	85
4.5	Análise Económica	91
5.	Conclusões e Trabalhos Futuros	95
5.1	Conclusões.....	95
5.2	Trabalhos Futuros	97
	Bibliografia.....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comportamento dos PCMs em termos de calor sensível e latente armazenado.....	9
Figura 2: Processo de mudança de fase.....	9
Figura 3: PCMs orgânicos, inorgânicos e Eutéticos.....	11
Figura 4: Diferença da entalpia de fusão e a temperatura de fusão para alguns materiais comuns usados como PCM	11
Figura 5: Esquema de instalação de impregnação a vácuo	20
Figura 6: Macro cápsulas plásticas com forma esférica, com forma de painel revestida a alumínio e com forma de bolsa revestida a plástico combinado geralmente com uma camada metal.....	22
Figura 7: A) Zonas climáticas de Inverno; B) Zonas climáticas de Verão	33
Figura 8: Interface visual da funcionalidade EP-Launch	37
Figura 9: Interface visual do IDF Editor	38
Figura 10: A interface visual do DesignBuilder.....	39
Figura 11: Representação da planta do edifício simulado obtido no <i>DesignBuilder</i>	41
Figura 12: Vista da fachada Sul e Oeste do edifício simulado.....	41
Figura 13: Vista da fachada Norte e Oeste do edifício simulado.....	42
Figura 14: Vista da Fachada Sul e Este do edifício simulado	42
Figura 15: Pormenor construtivo da cobertura.....	46
Figura 16: Pormenor construtivo do pavimento.....	46
Figura 17: Pormenor construtivo das paredes exteriores	47
Figura 18: Pormenor construtivo das paredes interiores.....	47
Figura 19: Curva da entalpia de fusão RT 15.....	52
Figura 20: Curva da entalpia de fusão RT 18HC	53
Figura 21: Curva da entalpia de fusão RT 21.....	53
Figura 22: Curva da entalpia de fusão RT 22HC	54
Figura 23: Curva da entalpia de fusão RT 24.....	54
Figura 24: Curva da entalpia de fusão RT 25.....	55
Figura 25: Curva da entalpia de fusão RT 26.....	55
Figura 26: Curva da entalpia de fusão RT 28HC	56
Figura 27: Necessidades energéticas do caso de estudo com a aplicação de PCMs na cobertura num edifício localizado na cidade do Porto	58

Figura 28: Necessidades energéticas de diferentes PCMs aplicados nas paredes exteriores do edifício em estudo localizado na cidade do Porto	58
Figura 29: Necessidades energéticas do edifício em estudo situado na cidade do Porto, com PCMs na cobertura e nas paredes exteriores	59
Figura 30: Necessidade energética do caso de estudo com a aplicação de diferentes PCMs na cobertura num edifício localizado na cidade do Porto	61
Figura 31: Necessidade energética do caso de estudo com a aplicação de diferentes PCMs nas paredes exteriores num edifício localizado na cidade do Porto	61
Figura 32: Necessidades energéticas do edifício em estudo situado na cidade do Porto com a aplicação de PCMs nas paredes exteriores e na cobertura	62
Figura 33: A necessidade energética do caso de estudo com a aplicação de diferentes PCMs na cobertura num edifício localizado na cidade de Bragança	64
Figura 34: Necessidades energéticas de diferentes PCMs aplicados nas paredes exteriores do edifício em estudo localizado na cidade de Bragança.....	64
Figura 35: Necessidades energéticas do edifício em estudo situado na cidade de Bragança, com PCMs na cobertura e nas paredes exteriores	65
Figura 36: Necessidades energéticas de um edifício localizado em Montalegre com a implementação de diferentes PCMs na cobertura	67
Figura 37: Necessidades energéticas de vários PCMs aplicados nas paredes exteriores do edifício em estudo localizado em Montalegre.....	67
Figura 38: Necessidades energéticas do edifício em estudo localizado em Montalegre com PCMs nas paredes exteriores e cobertura.....	68
Figura 39: Necessidades energéticas do edifício em estudo com a aplicação de diferentes PCMs na cobertura num edifício localizado na cidade de Vila Real	69
Figura 40: Necessidades energéticas do edifício em estudo com a aplicação de diferentes PCMs nas paredes exteriores num edifício localizado na cidade de Vila Real.....	70
Figura 41: Necessidades energéticas do edifício em estudo situado na cidade de Bragança, com PCMs na cobertura e nas paredes exteriores	70
Figura 42: Resultados obtidos dos melhores PCMs nas quatro zonas em estudo.....	72
Figura 43: Necessidades energéticas das diferentes soluções construtivas analisadas na segunda fase de simulação no edifício localizado na cidade do Porto.....	74
Figura 44: Resultados obtidos da terceira fase de simulações do edifício de estudo localizado na zona de Bragança.....	77

Figura 45: Necessidades energéticas das simulações efetuados na terceira fase num edifício de estudo localizado na cidade de Montalegre.....	79
Figura 46: Resultados obtidos da terceira fase de simulações do edifício de estudo localizado na cidade do Porto	81
Figura 47: Resultados obtidos da terceira fase de simulações do edifício de estudo localizado na cidade de Vila Real.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Requisitos dos materiais de mudança de fase	10
Tabela 2: Temperaturas de mudança de fase e valores de capacidade térmica, de alguns PCM parafínicos	14
Tabela 3: Temperatura de fusão e Entalpia de fusão de alguns PCMs orgânicos.....	15
Tabela 4: Temperatura de fusão e entalpia de fusão de alguns PCM's Inorgânicos	16
Tabela 5: Entalpia de fusão e temperatura de fusão de algumas misturas eutéticas	17
Tabela 6: Breve comparação dos três tipos de materiais de mudança de fase com as suas vantagens e desvantagens.....	18
Tabela 7: Vantagens e desvantagens do macro e microencapsulamento	21
Tabela 8: Estudos focados na análise de sistemas passivos de armazenamento de energia em edifícios com incorporação de materiais de mudança de fase	26
Tabela 9: Estudos focados na análise de sistemas ativos de armazenamento de energia em edifícios com incorporação de materiais de mudança de fase	29
Tabela 10: Localizações e zonas climáticas dos casos de estudo	33
Tabela 11: Comparação das características dos programas de simulação	36
Tabela 12: Orientação e área dos vãos envidraçados do edifício simulado	42
Tabela 13: Perfis de funcionamento dos equipamentos e da iluminação.....	43
Tabela 14: Potência definida para os equipamentos e iluminação.....	44
Tabela 15: Caracterização das soluções construtivas do edifício de referência simulado	45
Tabela 16: Propriedades do reboco	47
Tabela 17: Propriedades do tijolo furado	48
Tabela 18: Propriedades da betonilha	48
Tabela 19: Propriedades do bloco de aligeiramento	48
Tabela 20: Propriedades do ladrilho.....	48
Tabela 21: Propriedades da placa de gesso cartonado	48
Tabela 22: Propriedades da porta em madeira maciça.....	48
Tabela 23: Propriedades da laje maciça de betão armado.....	49
Tabela 24: Propriedades da betonilha	49
Tabela 25: Propriedades da caixa-de-ar na cobertura	49
Tabela 26: Propriedades da caixa-de-ar na parede exterior	49
Tabela 27: Propriedades da chapa metálica	49
Tabela 28: Propriedades do vidro simples	49

Tabela 29: Propriedades do estore	50
Tabela 30: Propriedades dos PCMs selecionados para o estudo.....	52
Tabela 31: Temperatura e entalpia de fusão RT 15	52
Tabela 32: Temperatura e entalpia de fusão RT 18 HC.....	53
Tabela 33: Temperatura e entalpia de fusão RT 21	53
Tabela 34: Temperatura e entalpia de fusão RT 22 HC.....	54
Tabela 35: Temperatura e entalpia de fusão RT 24	54
Tabela 36: Temperatura e entalpia de fusão RT 25	55
Tabela 37: Temperatura e entalpia de fusão RT 26	55
Tabela 38: Temperatura e entalpia de fusão RT 28 HC.....	56
Tabela 39: Redução das necessidades energéticas do edifício com os PCMs que obtiveram melhores desempenhos em relação ao edifício de referência sem PCMs	60
Tabela 40: Redução das necessidades energéticas do edifício localizado no Porto (climatização durante o período de ocupação) com os PCMs que obtiveram melhores desempenhos em relação ao edifício de referência sem PCMs.....	63
Tabela 41: Redução das necessidades energéticas do edifício com PCMs (PCMs que obtiveram melhor desempenho) comparado com o edifício sem PCMs no edifício localizado na cidade de Bragança.....	65
Tabela 42: Redução das necessidades energéticas do edifício com PCMs (PCMs que obtiverem melhor desempenho) comparado com o edifício sem PCMs no edifício localizado na cidade de Montalegre	68
Tabela 43: Os PCMs que melhor se comportam para as quatro zonas em estudo na primeira fase de simulações.....	71
Tabela 44: Redução das necessidades energéticas do edifício com os melhores PCMs comparado com o edifício de referência nas quatro zonas de estudo	72
Tabela 45: Redução ou aumento das necessidades energéticas das diferentes soluções construtivas em relação ao edifício de referência sem PCMs.....	74
Tabela 46: Solução construtiva da envolvente do edifício estudada na terceira fase de simulações.....	76
Tabela 47: Redução das necessidades energéticas das simulações efetuadas em relação ao edifício de referência sem PCMs	77
Tabela 48: Redução das necessidades energéticas das simulações efetuadas em relação ao edifício de referência sem PCMs	79

Tabela 49: Redução das necessidades energéticas das simulações efetuadas em relação ao edifício de referência sem PCMs na terceira fase de simulações num edifício localizado na cidade do Porto.....	81
Tabela 50: Redução das necessidades energéticas das simulações efetuadas na terceira fase em relação ao edifício de referência sem PCMs no edifício de estudo localizado em Vila Real	83
Tabela 51: Redução das necessidades energéticas do edifício com a solução otimizada com PCMs comparado com o edifício de referência nas quatro zonas de estudo	85
Tabela 52: Análise Económica.....	92
Tabela 53: Análise económica do edifício de estudo com PCMs na parede exterior localizada a sul e na cobertura.....	93
Tabela 54: Análise económica do edifício localizado na cidade do Porto sem PCMs na parede exterior localizada a Norte	93
Tabela 55: Diferença dos custos dos diferentes estudos em relação ao edifício de referência sem PCMs	93

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

PCM	Material de Mudança de Fase
PCMs	Materiais de Mudança de Fase
IPCC	<i>Intergovernmental Pannel for Climate Change</i>
DGEG	Direção Geral da Energia e Geologia
GEE	Gases de Efeito de Estufa
CO ₂	Dióxido de Carbono
EU	União Europeia
EPBD	<i>European Parliament Building Directive</i>
EC	<i>European Commission</i>
U	Coeficiente de transmissão térmica
DSC	<i>Differential scanning calorimetry</i>
LCA	<i>Life Cycle Analysis</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
N _{vc}	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento
N _{ic}	Necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento
N _{tc}	Necessidades nominais anuais globais de energia primária
Θ _{omin95}	Temperatura operativa que é excedida em pelo menos 95% das horas da estação de aquecimento
Θ _{omáx95}	Temperatura operativa que não é excedida em pelo menos 95% das horas da estação de arrefecimento

1. ENQUADRAMENTO

1.1 Âmbito

A energia é uma fonte fundamental para o desenvolvimento das sociedades, pela qual o ser humano se tornou dependente. Caso não existissem recursos energéticos seria impossível para o ser humano desfrutar o estilo de vida que tem vindo a desenvolver ao longo do tempo.

O setor dos edifícios contribui para 30% das emissões anuais de Gases de Efeito Estufa e consome cerca de 40% da energia (EU 2010). Contudo, os edifícios existentes representam também um potencial de poupança energética muito grande, uma vez que o seu desempenho se encontra frequentemente abaixo dos níveis de eficiência possíveis. O consumo de energia nos edifícios pode ser reduzido entre 30% a 80% através de tecnologias comercialmente disponíveis (UNEP 2016).

Cada vez mais há que ter em conta o aumento da escassez de fontes de energia em Portugal, sendo grande parte da energia em falta importada. Em 2010, segundo a DGEG (Direção Geral de Energia e Geologia), a dependência de Portugal em termos de importação de energia foi de 77% (ADENE 2012).

A eficiência energética é definida como a otimização do consumo de energia e baseia-se na implementação de medidas e estratégias de forma a combater os desperdícios de energia ao longo de todo o processo de transformação, acompanhando todo o seu processo de produção e distribuição de energia. Para inverter as tendências dos consumos energéticos excessivos e inconscientes, existe um grande caminho a percorrer pela humanidade, sendo cada atitude individual, um passo importante para a mudança global.

O consumo de energia nas habitações está maioritariamente associado ao aquecimento e arrefecimento das mesmas, de forma a obter o maior conforto térmico dos ocupantes. Uma solução para reduzir estes consumos é a implementação de tecnologias e materiais de mudança de fase para armazenamento de energia térmica de forma a obter o maior rendimento económico e conforto térmico.

O armazenamento de energia térmica é um método de conservação temporária de energia para utilização futura. Em edifícios habitacionais esta energia pode ser utilizada para climatização de espaços de forma passiva ou em sistemas ativos. Pode atender assim a muitos setores como o comercial, o industrial e o habitacional. O armazenamento de energia térmica pode ser efetuado através de aquecimento ou arrefecimento de uma substância (armazenamento de

calor sensível) ou através do processo de mudança de fase (armazenamento de calor latente) (Costa 2014).

No armazenamento de energia por calor latente, utiliza-se o material de mudança de fase que absorve e armazena energia calorífica ambiente, quando este transita do estado sólido para o estado líquido, o que só acontece quando a temperatura que o rodeia é superior ao ponto de fusão do material. Em seguida, este liberta a energia anteriormente armazenada quando transita do estado líquido para o estado sólido, ou seja, quando a temperatura que o rodeia é inferior ao ponto de solidificação do PCM (Materiais de Mudança de Fase) (Cunha et al. 2012).

Através da mudança de fase de calor latente, os PCMs controlam as temperaturas num intervalo de tempo específico. Uma vez que a temperatura de mudança de fase está próxima da temperatura de conforto desejada, a energia usada para mudar de fase levará a um ambiente interior mais estável e confortável. O uso de PCMs também permite reduzir os períodos máximos de arrefecimento e aquecimento e, conseqüentemente, os picos de consumo de energia (Edsjø & Petter 2015).

O armazenamento de energia por calor latente tem sido visto como uma técnica promissora, do ponto de vista económico e da eficiência energética. Esta técnica utiliza materiais de mudança de fase, demonstrando vantagens como um comportamento de temperatura constante durante a mudança de fase que se deve à sua elevada densidade de armazenamento. Dessa forma, em comparação com a transferência de calor sensível, o calor latente permite uma taxa de transferência de calor mais elevado (Merlin et al. 2016).

Diversos estudos (Monteiro et al. 2005; Monteiro et al. 2007; Silva et al. 2008; Silva 2009; Waqas et al. 2016) têm sido realizados no sentido de desenvolver tecnologias com incorporação de materiais de mudança de fase em situações de armazenamento ativo ou passivo. As situações de armazenamento ativo de energia estão associadas ao uso de elementos separados termicamente do edifício, não funcionando passivamente, como é o caso dos coletores solares térmicos (Tyagi & Buddhi 2007).

O número de estudos sobre esta temática tem aumentando ao longo dos anos devido aos seus benefícios em sistemas de energia (Monteiro et al. 2005; Monteiro et al. 2007; Silva et al. 2008; Silva 2009; Waqas et al. 2016). O presente estudo irá se focar no armazenamento de energia térmica por calor latente, em tecnologias passivas através de materiais de mudança de fase.

1.2 Objetivos

O objetivo geral da dissertação passa pelo estudo de materiais de mudança de fase e análise da sua viabilidade económica quando aplicados no Norte de Portugal.

Para atingir o principal objetivo da dissertação ao longo da sua realização será necessário alcançar certos objetivos específicos, tais como:

- Desenvolvimento de uma base de dados constituída com diversos estudos focados em materiais de mudança de fase. Com esta base de dados será fácil compreender o estado atual do conhecimento, bem como ter acesso às principais características deste tipo de tecnologias.
- Determinação do desempenho energético de um edifício unifamiliar, representativo dos edifícios deste tipo existentes no Norte do país.
- Determinação do desempenho energético e económico do caso de estudo com a implementação de tecnologias com incorporação de materiais de mudança de fase.
- Determinação dos custos associados à aplicação de tecnologias construtivas com materiais de mudança de fase em Portugal.
- Verificação da viabilidade económica da implementação de materiais de mudança de fase em edifícios unifamiliares localizados no Norte de Portugal.

1.3 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos e bibliografia.

No capítulo um é apresentada uma introdução ao tema, objetivos do trabalho e estrutura da dissertação.

No capítulo dois é abordada uma análise bibliográfica sobre o tema de estudo, ou seja, é descrita uma fundamentação teórica do trabalho que justificam e suportam o trabalho desenvolvido posteriormente.

No capítulo três é abordada a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, ou seja, os processos realizados, assim como a simulação efetuada, o caso de estudo analisado e os materiais utilizados.

No capítulo quatro são apresentados os resultados obtidos do caso de estudo e no capítulo cinco são apresentadas as conclusões obtidas da dissertação e propostas para trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Eficiência Energética

A procura progressiva de energia a nível mundial é um assunto crescentemente importante no que se refere às alterações climáticas e ao fornecimento energético (Cunha et al. 2015). O mundo consome elevadas quantidades de combustíveis fósseis impulsionando as mudanças climáticas e reduzindo as reservas de combustíveis fósseis mais rapidamente (Cunha et al. 2015). Um método para beneficiar o uso de energia globalmente é aumentar a eficiência energética dos edifícios (Cunha et al. 2015).

O setor da construção europeu é responsável por cerca de 40% do consumo de energia (EU 2010). Uma solução possível para fazer face à crescente procura de energia a nível mundial e reduzir os impactos ambientais negativos é a utilização de tecnologias de energia renovável (Edsjø & Petter 2015).

A população e o ambiente foram afetados pelo crescimento económico dos países nos últimos anos que provocou um aumento do consumo de energia (Cunha, Aguiar, et al. 2016). Atualmente a eficiência energética é um dos mais importantes objetivos da gestão energética regional, nacional e internacional (Soares et al. 2013). A União Europeia propõe uma estratégia energética para 2020, que recomenda a redução de 20% no consumo de energia primária e das emissões de CO₂ e recomenda o aumento de 20% no consumo energético proveniente de fontes renováveis (EC 2017a).

O Mercado mundial de energia é dominado pelos combustíveis fósseis, cerca de 81% (Ali 2014). Contudo, os combustíveis estão a apresentar custos elevados devido à sua escassez, e a sua utilização está correlacionada com a emissão de gases nocivos para o ambiente. Nos países desenvolvidos os edifícios são um dos setores com maior consumo de energia (Cunha et al. 2016).

A produção e utilização de energia é um dos principais contribuintes para a grave crise ambiental do mundo. Na EU-27, 80% das emissões totais de Gases de Efeito de Estufa (GEE) são relacionadas com a energia (EEA 2011).

Em 2007, o Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC) afirmou que grande parte do crescimento das emissões de carbono está relacionada com as operações dos edifícios (IPCC 2007).

A energia é uma questão importante em muitos países devido à sua alta dependência de importações de combustíveis fósseis. Além disso, em 2013 mais de metade (53,2%) do

consumo interno bruto de energia da UE-28 provinha de fontes importadas (Eurostat 2014). Uma forma de reduzir os problemas da energia na Europa é a redução dos consumos de energia, que pode ser alcançada através da utilização de medidas energeticamente eficientes (Parameshwaran et al. 2012; EC 2011; EC 2006).

A União Europeia tem metas para o aumento da eficiência energética para 2020, 2030 e 2050. Os seus objetivos apenas poderão ser alcançados se as ações efetivas forem implementadas nos edifícios novos e principalmente nos edifícios já existente.

As metas da União Europeia para 2020 são (EC 2017a):

- Redução de 20% do consumo de energia;
- Redução de 20% das emissões de carbono;
- Aumento de 20% da utilização de energias renováveis.

As metas da União Europeia para 2030 foram fixadas em (EC 2017b):

- Redução de 27% no consumo de energia;
- Redução de 40% das emissões de carbono (em relação a 1990)
- Aumento de 27% da utilização de energias renováveis.

A meta da União Europeia para 2050 é a redução em 90% das emissões de carbono (comparativamente aos níveis de 1990) (EC 2017c).

Para se fazer frente a estas questões e cumprir os objetivos do clima e energia Europeus para 2020 (EC 2015), 2030 (EC 2014) e 2050 (European Climate Foundation 2010) devem ser implementadas alterações no setor da construção.

A Diretiva 2002/91/EC relativa ao desempenho energético dos edifícios (EPBD), e a sua reformulação, a Diretiva 2010/31/EU, são atualmente as políticas mais importantes (EU 2010; EU 2002) relativas à eficiência energética no setor dos edifícios. Estas diretivas visam melhorar o desempenho energético dos edifícios (Araújo et al. 2016). Nos edifícios novos como na reabilitação devem ser implementadas diversas medidas de eficiência energética para satisfazer os requisitos destas diretivas (Araújo et al. 2016).

O armazenamento de energia térmica é um método eficiente para aplicar na envolvente dos edifícios, de modo a melhorar a eficiência energética dos edifícios. Este método irá reduzir os impactos ambientais relacionados com o consumo de energia (Pasupathy et al. 2008).

A utilização de materiais de mudança de fase na envolvente dos edifícios é realizada com o intuito de aproveitar a energia solar passiva, com o crescimento da capacidade de armazenamento de calor conferida, pelos PCMs (Sá 2012). O armazenamento de calor com

materiais de mudança de fase é uma estratégia com alto desempenho energético para o desenvolvimento de projetos de construção (Cunha et al. 2016).

2.2 Armazenamento de calor

Os sistemas de armazenamento de energia térmica, podem armazenar calor ou frio para serem usados mais tarde, em condições variáveis, como temperatura, lugar ou energia (Furbo 2015).

O armazenamento de energia térmica pode ser realizado usando armazenamento de calor sensível ou armazenamento de calor latente (Kuznik et al. 2011).

De seguida serão sucintamente apresentadas as formas de armazenamento de calor sensível e calor latente.

2.2.1 Armazenamento de Calor Sensível

O armazenamento de calor sensível atua sob a forma do aumento da temperatura do PCM em função da capacidade calorífica e da massa do material. Os materiais usualmente utilizados são água, rochas, betão e areia (Chandel & Agarwal 2017).

O armazenamento de calor sensível necessita de um grande volume de armazenamento para aumentar consideravelmente o tamanho (Chandel & Agarwal 2017).

O calor armazenado está relacionado com a quantidade de material, calor específico e temperatura. (Abdul et al. 2017).

2.2.2 Armazenamento de Calor Latente

O armazenamento de energia através de calor latente baseia-se na entalpia do material de mudança de fase sem alteração da temperatura (Chandel & Agarwal 2017). Através da mudança de fase por calor latente, os PCMs controlam as temperaturas num determinado intervalo específico (Edsjø & Petter 2015).

O calor latente de uma substância é a quantidade de calor essencial para a alteração de uma fase para outra. Para cada mudança de fase cada substância tem um calor específico e latente único para essa mesma substância (Costa 2014).

O material pode sofrer várias alterações de fase como por exemplo: de sólido-líquido, líquido-gás ou sólido-gás (Chandel & Agarwal 2017). Comparada à técnica de calor sensível a técnica de armazenamento de calor latente tem maior capacidade de armazenamento de energia por unidade de volume e durante o armazenamento de calor tem uma temperatura quase constante (Chandel & Agarwal 2017). Além disso, a técnica de armazenamento de calor latente adequa-

se a diferentes aplicações uma vez que existem diversos materiais com que mudam de fase a uma ampla gama de temperaturas (Chandel & Agarwal 2017).

A elevada alteração de volume que ocorre durante as alterações gás-sólido e gás-liquido é imprópria para o armazenamento de energia (Abdul et al. 2017). Contudo, o processo de armazenamento de calor é melhor quando há uma pequena alteração de volume durante a transformação de fase sólido-liquido e a absorção de calor latente e a temperatura constante (Abdul et al. 2017).

2.3 Materiais de mudança de fase

Os materiais de mudança de fase podem ser utilizados para armazenar energia ou controlar os balanços energéticos num intervalo de tempo específico. A utilização deste material para aquecimento e arrefecimento de edifícios deverá ter um bom desempenho (Souayfane et al. 2016). A mudança de fase de sólido para líquido ocorre quando há um aumento da temperatura, o PCM absorve o calor num processo endotérmico e muda de fase. Por sua vez, a mudança de fase de líquido para sólido surge quando a temperatura diminui e o PCM liberta calor num processo exotérmico e volta à sua fase sólida (Souayfane et al. 2016).

Uma vez que a temperatura de mudança de fase se deve situar próxima da temperatura desejável de conforto, a energia utilizada para alterar a fase do material levará a um clima interior mais estável e confortável. A utilização de PCMs também permite reduzir os períodos de arrefecimento e aquecimento de pico e consequentemente, os picos de gasto de energia (Edsjø & Petter 2015).

Numa fase inicial em que o PCM está no estado sólido a energia é absorvida através de calor sensível. Chegando à temperatura de fusão este passa a absorver energia através de calor latente, como se pode observar na Figura 1 (Garcia 2013). Quando o PCM atinge o limite de capacidade de armazenamento de calor latente este funde por completo e começa a armazenar energia apenas por calor sensível novamente. Devido às baixas variações de volume no processo as transições de fase sólido-líquido são as mais comuns (Garcia 2013).

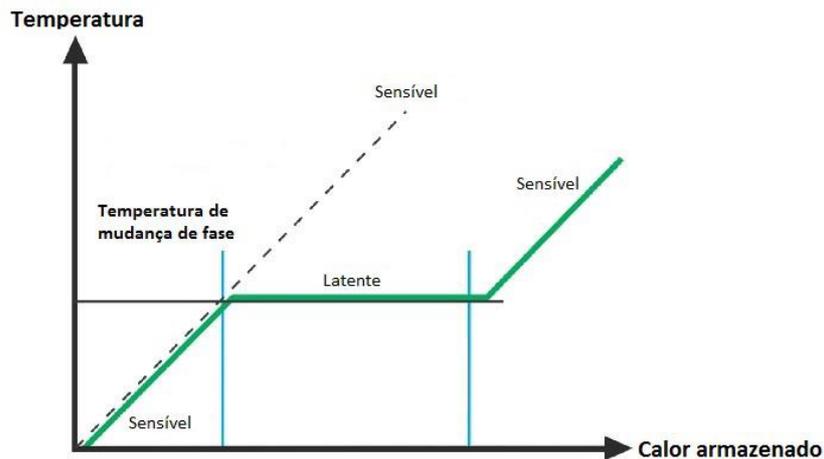


Figura 1: Comportamento dos PCMs em termos de calor sensível e latente armazenado (adaptado de RGEES 2017)

Quando um material solidifica ou condensa, liberta calor, e por outro lado quando funde ou vaporiza, absorve calor. Estas mudanças de fase são importantes para a acumulação de calor em PCMs, como se pode observar na Figura 2 (Costa 2014).

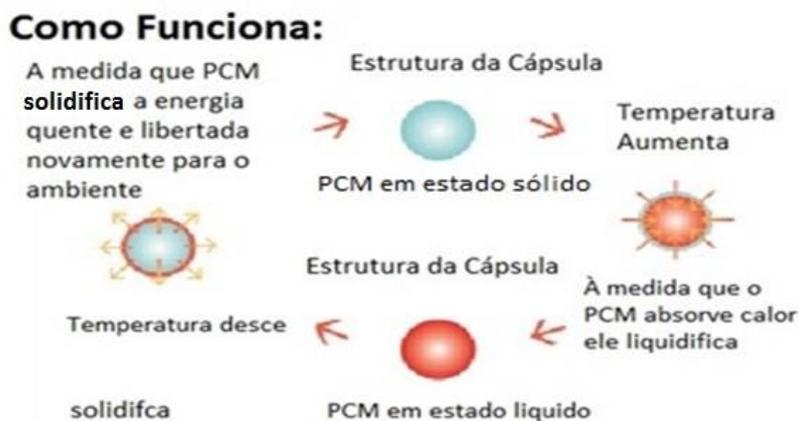


Figura 2: Processo de mudança de fase adaptado de (Homebuilding&Renovating 2016)

O ponto de mudança de fase de cada PCM corresponde, teoricamente, ao momento em que se dá a alteração de fase, mas na prática nos materiais de mudança de fase não eutéticos ocorre numa gama de temperaturas e não num ponto específico (Costa 2014).

A introdução de PCMs numa parede pode favorecer e melhorar o seu funcionamento (Costa 2014). O calor latente das alterações sólido-líquido é menor comparado com a mudança líquido-gás, contudo a alteração de volume é de apenas 10% ou menos, demonstrando serem economicamente atrativos para utilização em sistemas de armazenamento térmicos (Costa 2014).

A utilização de materiais de mudança de fase tem como principal objetivo o aumento do conforto térmico do indivíduo e a diminuição do consumo energético (Cerdeira 2015). Uma das formas de incorporar os PCMs na construção é a sua introdução nos materiais de construção porosos, como por exemplo o betão e o gesso, com o objetivo de mudar as características dos materiais (Cerdeira 2015). Os PCMs na construção podem ser incorporados em tetos, coberturas, pavimentos, sistemas de ventilação e nos materiais de construção (Cerdeira 2015).

Alguns materiais de mudança de fase não cumprem os parâmetros desejados para um meio de armazenamento apropriado. Quando o PCM é utilizado para armazenamento de energia térmica deve cumprir os requisitos termofísicos, cinéticos e químicos, como os apresentados na Tabela 1 (Souayfane et al. 2016).

Tabela 1: Requisitos dos materiais de mudança de fase (adaptado de Konstantinidis 2010)

Requisitos Termofísicos	Requisitos Cinéticos	Requisitos Químicos	Requisitos económicos e ambientais
<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de fusão apropriada no intervalo da temperatura operativa; - Alto calor de latente de fusão; - Alto calor específico; - Alta condutividade térmica de fases sólidas e líquidas; - Alta densidade; - Fusão congruente do PCM; - Ciclo estável; - Pequena pressão de vapor; - Pequenas mudanças de volume; - Pouco ou nenhum sub-arrefecimento durante a solidificação; - Sem segregação. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta taxa de nucleação para evitar sobre arrefecimento da fase líquida; - Alta taxa de cristalização para satisfazer as necessidades de recuperação de calor do sistema de armazenamento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Estabilidade química a longo prazo do PCM - Nenhuma degradação após os ciclos de solidificação ou fusão; - Ciclo de congelamento ou fusão reversível - Sem corrosão; - Materiais não inflamáveis, não tóxicos e não explosivos para a segurança. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo e qualidade/preço alto; - Não poluente; - Baixo impacto ambiental; - Boa reciclabilidade; - Pouca energia incorporada; - Facilidade de separação de outros materiais.

Nos edifícios com baixa inércia térmica, os materiais de mudança de fase são capazes de proporcionar um aumento na capacidade de armazenamento de calor. Os limites de temperatura variam dependendo dos materiais utilizados como material de mudança de fase (Edsjø & Petter 2015).

Os materiais de mudança de fase podem ser divididos em PCMs orgânicos, inorgânicos e eutécticos (Edsjø & Petter 2015), tal como pode ser observado na Figura 3.

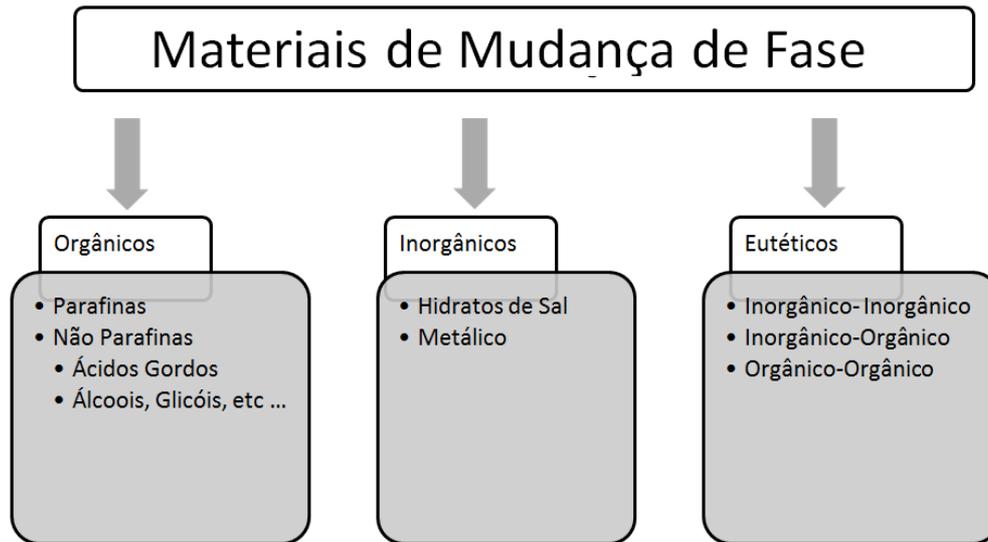


Figura 3: PCMs orgânicos, inorgânicos e Eutéticos (adaptado de Rathod & Banerjee 2013)

A diferença da entalpia de fusão e a temperatura de fusão para alguns materiais comuns usados como PCMs é exibida na Figura 4 (Edsjø & Petter 2015).

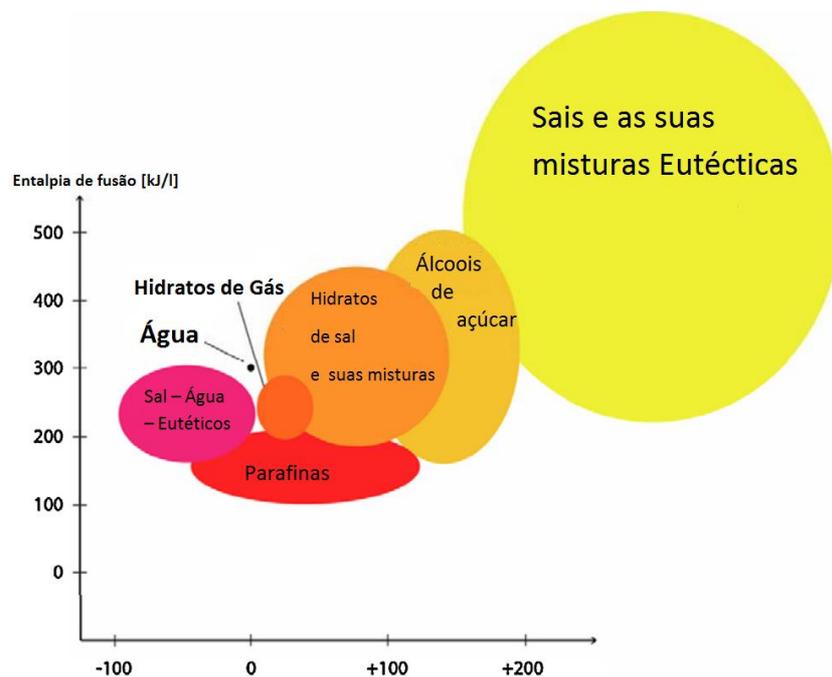


Figura 4: Diferença da entalpia de fusão e a temperatura de fusão para alguns materiais comuns usados como PCM (adaptado de Edsjø & Petter 2015)

Schröder e Gawron (1981) resumiram inúmeras características pretendidas que devem ser necessárias nos materiais de mudança de fase:

- Com o intuito de se obter o máximo dos PCMs, a temperatura de mudança de fase deve estar de acordo com o clima, a sua localização no edifício ou o tipo de sistema onde o PCM é usado. Portanto a temperatura de mudança de fase deve ser apropriadamente adaptada à aplicação;
- Alto calor de fusão por unidade de volume e peso unitário e alto calor específico. Estas características são desejáveis para aproveitar um maior efeito do armazenamento de calor latente com um volume pequeno de PCMs;
- Utilização de materiais abundantes e baratos. De modo a tornar a tecnologia mais atrativa e a possível utilização em grande escala, é essencial que os materiais a serem utilizados sejam abundantes e tenham uma boa relação custo-benefício;
- Inflamabilidade adequada às leis relativas à segurança contra incêndio;
- Elevada condutividade térmica. Através de uma alta condutividade térmica é possível que o calor se disperse ou deixe o material mais rapidamente, possibilitando a absorção e a libertação de calor a uma taxa mais elevada.
- Reduzida modificação de volume durante a solidificação. Uma grande variação de volume indicará que o material de encapsulação tem de possibilitar a expansão do PCM, reduzindo assim a quantidade de PCM que a encapsulação pode suportar;
- Elevada taxa do crescimento cristalino e pequeno grau de super arrefecimento. A temperatura de mudança de fase será alterada com o super arrefecimento. De modo a que a alteração de fase seja esperada o PCM deve ter uma temperatura de mudança de fase exata para possibilitar que um material seja escolhido corretamente;
- Cristalização reproduzível sem degradação;
- Não ser perigoso nem venenoso. No setor da construção para ser permitido a utilização de PCM não pode haver emissões de gases perigosos em caso de incêndio ou degradação durante o uso regular. Durante a produção do material também não deve haver libertações de emissões perigosas para o ambiente;
- Baixa taxa de corrosão e estabilidade química. Os materiais quimicamente estáveis permitirão uma vida útil dos PCMs maior.

2.4 Classificação dos PCMs

2.4.1 PCMs Orgânicos

Os materiais de mudança de fase orgânicos apresentam como principais características (Durães 2013):

- Fusão congruente;
- Estabilidade térmica e química;
- Na maior parte dos casos são estáveis quimicamente;
- Não são corrosivos nem tóxicos;
- Apresentam um elevado calor latente e de fusão;
- Não são afetados por sub-arrefecimento.

Estes materiais também apresentam certas desvantagens, tais como (Cardoso 2006):

- Durante o processo de combustão produzem fumos perigosos;
- Poderem ser inflamáveis;
- Ao longo do tempo podem ser alvo de oxidação térmica;
- Aumento de volume apreciável.

Contudo, com uma adequada alteração e seleção dos materiais é possível eliminar alguns destes inconvenientes (Silva 2009).

Os materiais de mudança de fase orgânicos são classificados como parafina ou não-parafina (Akeiber et al. 2016). As parafinas possuem elevada capacidade de armazenamento térmico, comparando com outros materiais de mudança de fase, estas durante o seu processo de fusão absorvem aproximadamente 200 kJ/kg de energia (Silva 2009). Devido à dificuldade de implementação das soluções sugeridas em materiais de construção a aplicação de parafinas em edifícios continua limitada (Garcia 2013).

As parafinas comerciais apresentam um calor latente moderado e as parafinas purificadas apresentam gamas de fusão curtas (Smith 2009).

De um modo geral os PCMs orgânicos visam melhorar o conforto térmico dos edifícios, estando compreendido entre 19 e 32°C o intervalo do seu ponto de fusão (Oliveira 2012).

Na Tabela 2 apresenta-se os PCMs parafínicos mais utilizados e economicamente mais viáveis.

Tabela 2: Temperaturas de mudança de fase e valores de capacidade térmica, de alguns PCM parafínicos (adaptado de Smith 2009)

PCM	Nº de átomos de carbono	Condutividade Térmica (W/m·K)	Temperatura de mudança de fase (°C)	Entalpia de mudança de fase (kJ/kg)
Hexadecano	16	0,151	18,5	237
Heptadecano	17	n.d.	22,5	213
Octadecano	18	0,151	28,2	244
Nonadecano	19	n.d.	32,1	222
Eicosano	20	n.d.	36,1	247
Heneicosano	21	n.d.	40,5	213
Cera parafínica	n.d.	n.d.	55,0	n.d.

Os PCMs orgânicos não-parafínicos abrangem uma extensa gama de materiais como glicóis, álcoois ou ácidos gordos (Garcia 2013). Os Ácidos gordos apresentam propriedades bastante idênticas às das parafinas, apresentando vantagens de mudarem de fase com maior facilidade e perante temperaturas de fusão inferiores (Oliveira 2012). A desvantagem deste material é o seu custo (cerca de três vezes superior ao das parafinas), e o facto de serem um material ligeiramente corrosivo (Oliveira 2012).

Alguns ácidos gordos, pelo facto de serem desenvolvidos a partir de uma combinação de outros ácidos gordos, possuem baixas temperaturas de fusão (20 e 30°C), (Oliveira 2012).

O ponto de fusão e solidificação comparado com as ceras parafínicas através de calor latente dos ésteres de ácidos gordos também é estável, comportamento este sem sub-arrefecimento (Tristão 2014). Em grande parte os PCM orgânicos apresentam baixa condutividade resultando assim numa taxa de transferência de calor baixa (Mendes et al. 2009).

Na Tabela 3 apresenta-se a temperatura de fusão e entalpia de fusão de alguns PCMs orgânicos.

Tabela 3: Temperatura de fusão e Entalpia de fusão de alguns PCMs orgânicos (adaptado de Tyagi & Buddhi 2007)

PCM Orgânicos	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de Fusão (kJ/kg)
Estereato de butilo	19	140
Palmitato de propilo	19	186
Dimetil sebacato	21	120
Octadecil 3 – mencentopropilato	21	143
Estearato de vinil	29	122
1-Dodecanol	26	200
(34% de ácido mirístico + 66% de ácido cáprico)	24	147,7
1-Tetradecanol	38	205
Parafina C ₁₆ -C ₁₈	20 – 22	152
Ácido cáprico-láurico	21	143
Sabacate de Dimetil	21	120
Poliglicol E 600	22	127,2
Parafina C ₁₃ -C ₂₄	22 – 24	189
Parafina C ₁₈ (45 a 55%)	28	244
Ácido cáprico	32	152,7

2.4.2 PCMs Inorgânicos

Os PCMs inorgânicos repartem-se em sais metálicos ou sais hidratados (Oliveira 2012). Os PCMs inorgânicos comparativamente aos PCMs orgânicos, apresentam as seguintes vantagens: elevada entalpia de fusão, não são inflamáveis, são mais baratos, de fácil acessibilidade e boa condutibilidade térmica. Contudo, são corrosivos, podem apresentar sub-arrefecimento, separação de fases, mais suscetíveis à decomposição, falha de estabilidade térmica, afetando as suas propriedades de mudança de fase (Cerdeira 2015; Durães 2013; Oliveira 2012).

Durante o ciclo é complicado manter a elevada densidade de armazenamento dos sais hidratados, porque os sais hidratados derretem e produzem sais com valores de densidade de armazenamento inferiores, tornando o método irreversível, o que, conseqüentemente, origina uma capacidade de armazenamento menor (Nunes 2011).

Na Tabela 4 representa-se a entalpia de fusão e temperatura de fusão de alguns PCM inorgânicos.

Tabela 4: Temperatura de fusão e entalpia de fusão de alguns PCM's Inorgânicos (adaptado de Tyagi & Buddhi 2007)

PCM Inorgânico	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de Fusão (kJ/kg)
KF4H ₂ O - Flureto de potássio tetrahidratado	18,5	231
Mn(NO ₃) ₂ . 6H ₂ O	25,8	125,9
CaCl ₂ 6H ₂ O - Cloreto de cálcio hexahidratado	29	190
Na ₂ SO ₄ 10H ₂ O - Sulfato de sódio decahidratado	32	251
LiNO ₃ 3H ₂ O - Nitrato de lítio trihidratado	30	296
Zn(NO ₃) ₂ 6H ₂ O - Nitrato de zinco hexahidratado	36,4	147

2.4.3 Misturas Eutéticas

As misturas eutéticas são misturas formadas por dois ou mais componentes, que se fundem e solidificam de modo congruente, originando uma mistura de cristais do componente durante a cristalização (Tristão 2014). Estas misturas fundamentam-se na combinação de dois ou mais compostos orgânicos, inorgânicos, ou ambos, representando assim temperaturas de transição mais aproximadas às necessidades do problema do que os compostos mostrariam por si só (Garcia 2013).

Comparando com os compostos orgânicos ou inorgânicos originais as misturas eutéticas, através da combinação de compostas, adquirem temperaturas de fusão mais aproximadas às necessidades dos edifícios (Oliveira 2012). O comportamento destas misturas é em geral bastante semelhante ao sal hidratado (Oliveira 2012).

A desvantagem principal das misturas eutéticas é o seu custo, quase duas a três vezes superior que os PCMs orgânicos e inorgânicos (Cerdeira 2015).

As vantagens das misturas eutéticas são (Oliveira 2012):

- Não são corrosivos nem tóxicos para a saúde;
- Por serem misturas com elevado calor latente (ou entalpia de fusão) por unidade de massa, possuem boa estabilidade química e uma baixa pressão de vapor à temperatura ambiente.

As misturas eutéticas habitualmente expõem temperaturas de fusão entre os 18°C e 51°C e de solidificação entre 16°C e 51°C e um calor latente na ordem dos 120 – 160 kJ/kg (Tristão 2014).

Estas misturas podem ser repartidas em 3 grupos: compostos

- Orgânicos – Orgânicos
- Inorgânicos – Inorgânicos
- Inorgânicos – Orgânicos

Na Tabela 5 é apresentado a entalpia de fusão e temperatura de fusão de algumas misturas eutécticas.

Tabela 5: Entalpia de fusão e temperatura de fusão de algumas misturas eutécticas (adaptado de Tyagi & Buddhi 2007)

Misturas Eutécticas	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de Fusão (kJ/kg)
CaCl ₂ ·6H ₂ O / MgCl ₂ ·6H ₂ O Cloreto de cálcio/ Cloreto de magnésio	25	127
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O/ Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O Nitrato de cálcio/ Nitrato de magnésio	30	136
Na(CH ₃ COO)·3H ₂ O/ CO(NH ₂) ₂	30	200
CH ₃ (CH ₂) ₈ COOH/ CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH Ácido cáprico-laurico	21	143
66,6% CaCl ₂ ·6H ₂ O + 33,3% MgCl ₂ ·6H ₂ O	25	127
48% CaCl ₂ + 4,3% NaCl + 0,4% KCl + 47,3% H ₂ O	26,8	188
47% Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O + 53% Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	30	136
60% Na(CH ₃ COO)·3H ₂ O + 40% CO(NH ₂) ₂	30	200,5

Na Tabela 6 é apresentada uma breve comparação dos três tipos de materiais de mudança de fase com as suas vantagens e desvantagens (Costa 2014; Edsjø & Petter 2015; Chandel & Agarwal 2017; Ali 2014; Mendes et al. 2009).

Tabela 6: Breve comparação dos três tipos de materiais de mudança de fase com as suas vantagens e desvantagens (adaptado de Costa 2014; Edsjø & Petter 2015; Chandel & Agarwal 2017; Ali 2014; Mendes et al. 2009)

PCM	Vantagens e Propriedades	Desvantagens
Orgânicos	<ul style="list-style-type: none"> -Não sofrem sobrearrefecimento; -Grande Taxa de cristalização; -Recicláveis; -Em geral corrosivos, no entanto os ácidos gordos são ligeiramente corrosivos; -Disponíveis numa ampla gama de temperaturas; -Sem segregação de fase -Quimicamente, fisicamente e termicamente estáveis; -Estável sobre um número de ciclos de gelo-degelo; -Boa compatibilidade com grande variedade de recipientes devido à natureza não-reactiva; - Baixa pressão de vapor; -Compatíveis com materiais de construção convencionais; -Alta temperatura de fusão; -Calor latente razoável de (120 J/g até 210J/g); -As parafinas têm um maior calor específico do que os hidratos de sal; -Barato, no entanto os ácidos gordos são 2 – 2,5 vezes mais caros do que a parafina técnica -Pequena mudança de volume durante a transição de fase; -Inócuo (nem tóxico nem irritante, no entanto as não parafinas mostram um nível variável de toxicidade); -Estáveis abaixo de 500°C, no entanto, as não-parafinas mostram instabilidade a altas temperaturas. 	<ul style="list-style-type: none"> -Baixa condutividade térmica; -Entalpia de mudança de fase baixa; -Inflamáveis; -Grandes mudanças de volume durante a fase de transição, excepto no caso de alguns ácidos gordos. Instabilidade em temperaturas mais elevadas; - Sem transição de fase nítida; -Não compatível com os recipientes de plástico; - Caro na forma pura; - Baixa entalpia de mudança de fase; - Inflamável; - Níveis variáveis de toxicidade. - Capacidade de armazenamento de calor latente de baixa volumetria.
Inorgânicos	<ul style="list-style-type: none"> -Entalpia de mudança de fase elevada; -Não inflamáveis; -Pequena variação de volume; -Custos moderados; -Alta condutividade térmica; -Alta capacidade de armazenamento de energia térmica; -Armazenamento volumétrico de calor latente (quase o dobro dos materiais orgânicos); -Fácil disponibilidade; -Baixa pressão de vapor; -Pontos de fusão nítidos durante fases de transição espontâneas; -Maior condutividade térmica que o PCM orgânico; -Elevada capacidade de armazenamento latente de calor volumétrico; -Mudança de fase nítida; -Compatível com recipientes de plástico; -Baixo impacto ambiental; -Pode ser reciclado. 	<ul style="list-style-type: none"> -Sobrearrefecimento; -Corrosão -Separação de fases; -Falta de estabilidade térmica; -Demonstra sobre-arrefecimento e sub-arrefecimento; -Mostram segregação de fase; -Corrosivo para os metais; -Alta mudança de volume; -Fusão congruente; -Irritante; -Têm alta pressão de vapor (induzem a perda de água e causam mudança progressiva no comportamento térmico durante o processo de ciclagem térmica); -Apresentam estabilidade química variável; -Podem mostrar degradação a longo prazo por oxidação, hidrólise, decomposição térmica e outras reações.
Eutécticos	<ul style="list-style-type: none"> -Gama de pontos de fusão estreita; -Baixa densidade de armazenamento -Pontos de fusão e ebulição nítidos; -Maior densidade volumétrica de armazenamento do que o PCM orgânico; -Propriedades podem ser adaptadas para atender requisitos específicos. 	<ul style="list-style-type: none"> -Disponibilidade limitada; -Custo elevado -Não há estudos suficientes sobre as propriedades termofísicas para variadas combinações;

2.5 Técnicas de incorporação dos materiais de mudança de fase nos materiais de construção

As técnicas de incorporação dos materiais de mudança de fase nos materiais de construção serão expostas nos subcapítulos seguintes.

2.5.1 Incorporação direta

Na incorporação de PCM em materiais de construção, a incorporação direta é o método mais simples. Este método baseia-se em espalhar o PCM (em estado líquido ou em pó) sob o próprio material, sendo este absorvido pelo mesmo (Garcia 2013).

Para utilizar este método com o betão é importante garantir que o PCM não interfira com o processo de hidratação, porque caso contrário, afeta a ligação entre o agregado e o cimento. Ou seja, afeta as propriedades mecânicas do betão e a durabilidade do produto final (Navarro et al. 2016). Como não existe uma barreira entre o PCM e o betão, quando o PCM é adicionado diretamente à mistura de betão, existe um maior risco de o PCM ter um efeito adverso sobre as propriedades deste material (Navarro et al. 2016).

2.5.2 Imersão

A imersão é um dos métodos mais tradicionais na inclusão de PCM em materiais de construção, consistindo este método em mergulhar o material em PCM fundido, fazendo com que o PCM por ação capilar seja absorvido através dos poros do material (Garcia 2013).

Na maior parte dos casos o processo de imersão demora algumas horas (Navarro et al. 2016). Na técnica de imersão os materiais de construção porosos (madeira, paredes de gesso, agregado poroso, blocos de betão, etc.) são imersos num recipiente que é preenchido com PCM no estado líquido. O PCM é absorvido por capilaridade. O tempo necessário para a absorção do PCM depende de três critérios: a capacidade de absorção do elemento construtivo, a temperatura do PCM, e a viscosidade do PCM. O processo de imersão demora algumas horas (Navarro et al. 2016).

Este método demonstra algumas desvantagens como por exemplo: problemas de incompatibilidade com alguns materiais de construção, e também problemas de fuga do material que podem emergir principalmente depois de submetidos a um elevado número de ciclos térmicos (Navarro et al. 2016).

2.5.3 Impregnação a Vácuo

A metodologia de impregnação a vácuo envolve, em primeiro lugar a evacuação do ar a partir de agregados porosos, usando uma bomba de vácuo (Navarro et al. 2016). No estado líquido sob vácuo os agregados porosos são embebidos num PCM. A impregnação a vácuo de PCM para um material granular foi investigada por (Zhang et al. 2003), e pode ser aplicada em materiais de construção, tais como o betão. A Figura 5 apresenta um esquema de instalação de impregnação a vácuo.

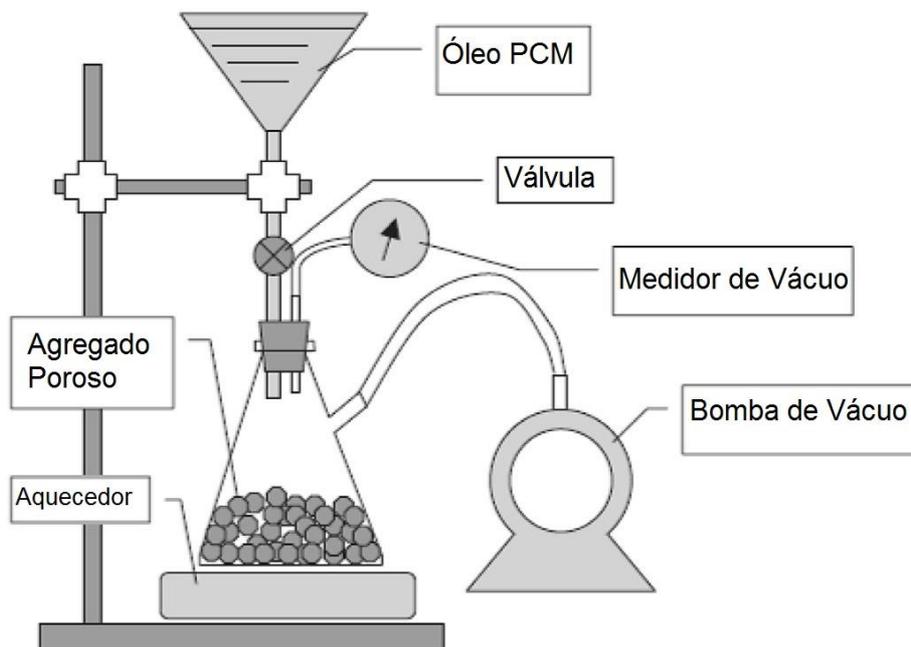


Figura 5: Esquema de instalação de impregnação a vácuo (adaptado de Zhang et al. 2003)

Barreneche et al (2013) fez um estudo com várias amostras de gesso comparando diferentes métodos de incorporação de PCM (microencapsulação, incorporação direta e impregnação). Verificou em todas as amostras exceto nas impregnadas, uma diminuição da condutividade térmica (Barreneche et al. 2013). Este facto deve-se à substituição do ar pelo PCM no estado líquido. Contudo, esta técnica diminui a porosidade da amostra (Barreneche et al. 2013).

O método de impregnação a vácuo é considerado como sendo um método eficaz de incorporação (Navarro et al. 2016). Contudo, a principal desvantagem da impregnação é a incompatibilidade com os materiais de construção (Sá 2012).

2.5.4 Encapsulamento

O PCM pode ser incorporado nos materiais através de várias formas de encapsulamento. A incorporação de PCMs na construção depende muito da sua forma de encapsulamento, sendo estes aplicados nos diversos elementos construtivos através de cápsulas (microcápsulas ou macrocápsulas), consoante o necessário (Kendrick & Walliman 2007).

O encapsulamento dos materiais de mudança de fase consiste em incluir pequenas partículas de modo a evitar o contacto direto com outros materiais, principalmente, os materiais utilizados na construção civil, impedindo a interação entre eles (Sá 2012). Estas partículas são de um composto líquido ou sólido, denominado de núcleo, envolvidos por um material sólido, normalmente um polímero designado de cápsula (Cerdeira 2015).

As duas formas principais de armazenamento de materiais de mudança de fase são: microencapsulamento e macroencapsulamento (Oliveira 2012).

Na Tabela 7 apresenta as vantagens e desvantagens das técnicas de macro e microencapsulamento.

Tabela 7: Vantagens e desvantagens do macro e microencapsulamento (adaptado de Chandel & Agarwal 2017)

	Vantagens	Desvantagens
Microencapsulamento	<ul style="list-style-type: none">- Bom controlo de mudança de volume quando ocorre uma mudança de fase;- Facilmente incorporável em materiais de construção convencionais;-A confiabilidade térmica é consideravelmente melhorada;-Melhora a transferência de calor condutora entre PCM e o material circundante;-Evita o fuga do PCM atuando como uma barreira;-A estabilidade química é melhorada.	<ul style="list-style-type: none">-Pode afetar a resistência do material;-Conduzir a efeitos de super-arrefecimento;-A convecção natural é interrompida afetando fenómenos de solidificação;-Processo Caro.
Macroencapsulamento	<ul style="list-style-type: none">-Pode servir diretamente como condutor de calor;-Os efeitos das mudanças de volume externas são mitigados;-Material melhorado compatível com material circundante;-Melhora a manipulação de PCM durante a produção;-Evitam-se mudanças a sua composição através do contacto com o meio ambiente.	<ul style="list-style-type: none">-Solidificação nas arestas/cantos;- Má condutividade térmica / de características de transferência de calor.

Macroencapsulamento

A forma mais comum de encapsulamento de PCMs é o macroencapsulamento, sendo este o encapsulamento de PCM em cápsulas normalmente maiores que 1 cm de diâmetro (Oliveira 2012;Tristão 2014).

A sua aplicação pode ser efetuada em camadas de revestimento ou através da incorporação em materiais de construção (Durães 2013). Portanto os PCMs podem ser introduzidos em tubos, bolsas dispostas em matriz, em placas ou painéis (Garcia 2013), como representado na Figura 6.

Devido aos custos associados é consideravelmente restrito o uso de PCM por meio de macroencapsulamento, todavia várias empresas têm desenvolvido várias formas de encapsular os materiais de mudança de fase (Oliveira 2012).

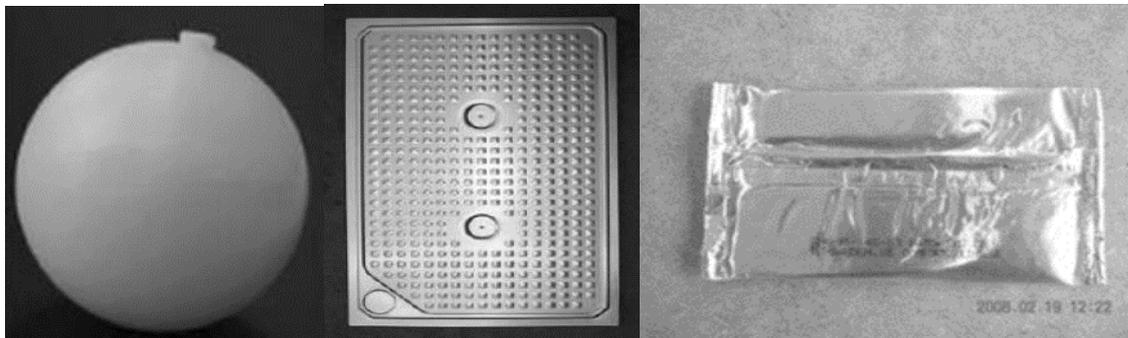


Figura 6: Macrocápsulas plásticas com forma esférica, com forma de painel revestida a alumínio e com forma de bolsa revestida a plástico combinado geralmente com uma camada metal (Mehling 2008)

A produção de macrocápsulas pode ser efetuada através de materiais com folhas de alumínio ou polímeros (Sá 2012). Estas são produzidas individualmente e em seguida integradas nos materiais de construção (Sá 2012). Também podem funcionar diretamente como permutadores de calor (Nunes 2011). O inconveniente principal da utilização do macroencapsulamento é a adaptação dos sistemas de construção na presença deste tipo de materiais (Nunes 2011).

Devido à baixa condutividade térmica da grande parte dos materiais de mudança de fase, vários estudos demonstraram que o macroencapsulamento com grande volume de contenção não se trata de uma solução viável (Tristão 2014). Devido à reduzida condutividade, há uma maior propensão à cristalização junto às paredes da cápsula, impedindo assim a transferência de energia térmica armazenada pelo PCM (Tristão 2014).

Para além de reter o PCM quando este se expõe no seu estado líquido, o macroencapsulamento apresenta outras vantagens, tais como (Oliveira 2012):

- Melhora a compatibilidade do material com a envolvente;
- Facilita a manipulação do PCM no seu processo de produção;
- Diminui as mudanças de volume exterior, tratando-se de um aspeto positivo para a sua aplicação.

Microencapsulamento

O microencapsulamento é uma técnica que utiliza cápsulas com um tamanho micrométrico (1µm entre 1000 µm) para revestimento dos materiais de PCM com uma camada muito fina de um material polimérico (natural ou sintético) (Chandel & Agarwal 2017; Ali 2014).

A técnica de microencapsulamento aumenta a área de superfície de transferência de calor e é utilizada para resolver problemas como as alterações volumétricas, a reatividade ao meio ambiente, resistência e a compatibilidade com o material de construção (Chandel & Agarwal 2017).

A técnica de microencapsulamento de materiais de mudança de fase tem sido utilizada para armazenar energia térmica nos edifícios (Abdul et al. 2017). As partículas de PCM neste método são envolvidas numa película molecular fina, selada e de “elevado peso molecular”, que ajuda a reter a forma e impede a fuga de PCM durante o processo de transição de fase (Abdul et al. 2017). Os materiais de mudança de fase microencapsulados são mais fáceis de integrar e mais baratos (Abdul et al. 2017).

A transferência de calor é facilitada pela grande área oferecida pelas superfícies de paredes e pavimentos (Navarro et al. 2016). O microencapsulamento é o método mais utilizado para incorporar PCMs em materiais de construção (Navarro et al. 2016). As microcápsulas podem ser acrescentadas diretamente, durante o processo de mistura do material de construção, como por exemplo, o betão ou o gesso (Navarro et al. 2016).

O microencapsulamento possibilita o favorecimento de um composto de PCM numa extensa área, desse modo apresenta a vantagem de uma taxa de transferência de calor por unidade de volume. Outras vantagens deste método são (Navarro et al. 2016):

- Resistem à mudança de volume durante a mudança de fase devido ao facto de as suas cápsulas evitarem fugas.
- Estabilidade química melhorada e confiabilidade térmica com a divisão de fases durante a modificação sendo estas limitadas a distâncias microscópicas.

A cápsula dentro da matriz do betão têm de ser fisicamente e quimicamente estável, precisando de ser dura e sustentável para evitar danos durante o processo de mistura e fundição do betão (Navarro et al. 2016).

O microencapsulamento de PCM no betão é caracterizado por algumas desvantagens, como por exemplo, a perda de resistência mecânica do betão (Abdul et al. 2017).

O tamanho e o encapsulamento do material influenciam o desempenho térmico dos PCMs adquiridos (Abdul et al. 2017).

No microencapsulamento são usados vários métodos, como por exemplo: condensação, emulsão, suspensão e a coacervação (Abdul et al. 2017). As técnicas de microencapsulamento são especializadas como técnicas físicas e químicas, sendo estas técnicas utilizadas em várias áreas. Contudo a técnica mais usada para a fabricação da microcápsula de PCM é a encapsulação química (Chandel & Agarwal 2017). As técnicas de microencapsulação físicas comparadas com as técnicas químicas são mais fáceis de produzir em massa. As capsulas produzidas por esta técnica, apesar de não terem propriedades perfeitas, possuem tamanhos uniformes. Contudo, não é possível produzir partículas de tamanho mais pequeno que algumas centenas de *microns* (Chandel & Agarwal 2017). Ao contrário das técnicas físicas as técnicas químicas são mais usadas e vantajosas, dado que estas são capazes de promover propriedades desejadas com a estrutura de partícula bem definida. Contudo esta técnica é mais cara e mais complexa do que a técnica física.

As vantagens da microencapsulação são as seguintes (Ali 2014):

- Com a construção de uma barreira, impede-se a fuga de PCM durante a fase de transição, desenvolvendo as suas hipóteses de incorporação em diversos materiais de construção;
- Aumenta a taxa de transferência de calor através da sua maior área de superfície por unidade de volume;
- Capacidade de resistir à alteração de volume durante a fase de transição;
- Estabilidade química melhorada.

Na microencapsulação também existem alguns problemas, tais como (Ali 2014):

- A rigidez da cápsula impossibilita a convecção natural, logo reduz a taxa de transferência de calor em relação a outro tipo de encapsulamento.
- As características mecânicas dos materiais de construção podem ser afetadas através da microencapsulação. Contudo, Cabeza et al. (2007) demonstrou que alguns betões microencapsulados continham uma exigência satisfatória para fins estruturais gerais.
- O elevado custo de investimento condiciona a sua viabilidade comercial.

2.6 Tecnologias para armazenamento de energia térmica

2.6.1 Sistemas Passivos

Os sistemas passivos têm como objetivo cooperar no aquecimento ou arrefecimento dos edifícios diminuindo assim o consumo de energia com sistemas de climatização (Durães 2013). Nestes sistemas a energia é captada pelos materiais que integram o edifício e flui por meios naturais por radiação e convecção.

Na Tabela 8 serão mencionados estudos que pretenderam analisar a viabilidade da implementação de tecnologias construtivas com PCMs e estudos que se focaram na análise da percentagem de PCMs a incorporar em soluções construtivas em sistemas passivos de armazenamento de energia.

2.6.2 Sistemas Ativos

Os sistemas ativos têm como objetivo aumentar a eficiência dos sistemas de climatização e consecutivamente reduzir o consumo de energia (Durães 2013). Nestes sistemas a energia é captada ou transportada por equipamentos que utilizam energia auxiliar (Durães 2013). No âmbito desta temática têm sido desenvolvidos vários estudos (Evola et al. 2014; Hed & Bellander 2006; Waqas et al. 2016).

A utilização dos sistemas passivos com incorporação de PCMs num edifício nem sempre se adequa bem a climas extremos (Iten et al. 2016). Nestas situações os métodos ativos podem ser adotados para permitir poupanças energéticas (Iten et al. 2016).

Na presente Tabela 9 são representados estudos que pretenderam analisar a viabilidade da implementação de tecnologias construtivas com PCMs em sistemas ativos de armazenamento de energia.

Tabela 8: Estudos focados na análise de sistemas passivos de armazenamento de energia em edifícios com incorporação de materiais de mudança de fase (continua)

Referência	Objetivos do Estudo	Metodologia	Conclusões
Monteiro et al. (2007; 2005)	Estudo de uma nova tecnologia para ser utilizada nos espaços interiores das construções, no domínio da técnica de aplicação de argamassas.	Experimental	A aplicação de uma percentagem de 25% de PCM na camada de acabamento final utilizando a tecnologia de sistema de reboco multicamada, mantém as propriedades mecânicas das argamassas em níveis admissíveis, é um fator benéfico do ponto de vista térmico e apresenta viabilidade económica.
Pasupathy (et al. 2008)	Estudaram os efeitos de uma camada dupla de PCM, para gestão térmica durante todo o ano em Chennai, Índia. A experiência foi realizada com um painel de telhado/teto com PCM em comparação com uma sala de referência sem o painel de PCM.	Experimental	A experiência mostrou que o painel com o PCM no teto condicionou os balanços da temperatura do ar interior e que o sistema poderia funcionar durante todas as estações do ano, quando o painel superior apresentava uma temperatura de fusão de 6-7° C maior do que a temperatura ambiente no início da manhã do mês de pico de verão. O painel inferior teve uma temperatura de fusão na temperatura interna sugerida.
Silva et al. (2009; 2008)	Estudo da incorporação de PCM microencapsulado em pastas de gesso com desempenho térmico melhorado para revestimento interior de paredes e tetos - Avaliação do comportamento mecânico e térmico do material em comparação com pastas de gesso convencionais.	Experimental	Em células de teste, foi verificada uma redução de temperatura máxima em cerca de 5° e um aumento da temperatura mínima de cerca de 1,5°C. A técnica de encapsulamento mais viável aparenta ser o microencapsulamento. A utilização de PCM nos edifícios apresenta vantagens tanto na humidade relativa como a nível das temperaturas interiores.
Alkan et al. (2009)	O objetivo do estudo foi desenvolvimento e aplicação de um compósito de PCM para armazenamento de energia térmica.	Experimental	Através da análise de DSC (<i>Differential scanning calorimetry</i>), as temperaturas de fusão de cristalização do PCM corresponderam a 41,0 ° C e 40,6 ° C, enquanto o calor latente de fusão e cristalização correspondeu a 54,4 e 48,7 J/ g, respetivamente. As microcápsulas com melhores resultados continham 28% em peso de PCM. Através dos resultados obtidos, concluíram que o compósito de PCM tem um potencial aceitável para aplicativos de armazenamento de energia térmica.

Tabela 8: Estudos focados na análise de sistemas passivos de armazenamento de energia em edifícios com incorporação de materiais de mudança de fase (continua)

Referência	Objetivos do Estudo	Metodologia	Conclusões
Hunger et al. (2009)	Estudar as propriedades e o comportamento de misturas de betão auto-compactado com 1%, 3% e 5% de PCM microencapsulado em massa de betão. -O objectivo do estudo foi reduzir o pico de temperatura de hidratação, tendo para tal sido utilizada uma alta dosagem de cimento (450 Kg/m ³).	Experimental	Para aplicações futuras, os investigadores recomendam as cápsulas mais resistentes para PCMs microencapsulados, de modo a garantir que as cápsulas podem suportar o elevado ambiente alcalino e o impacto mecânico durante a mistura.
Oliveira (2012)	Estudo do PCM que melhor se adequa ao clima da cidade do Porto. Estudo dos consumos energéticos num edifício unifamiliar com o PCM de melhor desempenho.	Simulação dinâmica	A solução com melhor desempenho em termos de custo-benefício traduziu-se na aplicação de uma camada, na parede e no teto do edifício de PCM Delta-Cool® 24. Nas condições analisadas consegue-se uma poupança energética no Inverno, para os dias mais frios, mas em contrapartida é observado um gasto energético mais elevado no Verão, em relação às mesmas situações sem PCM.
Cunha et al. (2012; 2013)	Caraterização de argamassas aditivadas com dois materiais de mudança de fase diferentes. Estudo das propriedades específicas de diferentes PCMs.	Experimental	A argamassa com incorporação de 60% de cal aérea, 40% de gesso e 20% de PCM, se revelou a mais interessante para ambos os PCMs, tendo mostrado um excelente equilíbrio entre as suas caraterísticas mecânicas e retração.
Durães (2013)	Estudo do tipo, quantidade e o local de aplicação do PCM com mais benefícios energéticos para o clima de Lisboa.	Simulação dinâmica	O PCM que apresenta melhor desempenho é o Delta Cool® 24 (macroencapsulado) aplicado na caixa-de-ar das paredes e cobertura. A aplicação desta solução apenas se mostrou benéfica no Verão. As necessidades energéticas de aquecimento aumentaram, pois parte da energia fornecida pelo sistema de climatização foi absorvida pelo PCM. Isto conduziu a um aumento dos custos de climatização. O investimento inicial para um edifício localizado em Lisboa não pôde ser recuperado uma vez que as necessidades energéticas anuais aumentaram.

Tabela 8: Estudos focados na análise de sistemas passivos de armazenamento de energia em edifícios com incorporação de materiais de mudança de fase (conclusão)

Referência	Objetivos do Estudo	Metodologia	Conclusões
Karim et al. (2014)	Experiência em pequena escala para avaliar o desempenho térmico de um pavimento de betão preenchido com PCM. O objetivo principal era determinar se o pavimento com PCM melhorar o conforto interior sem usar um sistema de ar condicionado.	Experimental	O PCM conseguiu armazenar completamente a energia térmica após aproximadamente 8h, e poderia armazenar 70% da energia térmica após 6h. Concluíram que usando este tipo de material no pavimento numa construção leve melhora o conforto térmico dos ocupantes, ao mudar os ganhos de calor até a noite.
Goia et al. (2014)	Análise de um vão envidraçado com incorporação de PCM. O teste foi realizado numa parede orientada a sul durante todo ano, num clima subcontinental comparado com um vidro duplo convencional.	Experimental	A experiência mostrou que os envidraçados com PCM reduzem em mais de 50% da entrada de calor no verão. A experiência realçou a importância da remoção do calor durante a noite, otimizando ao funcionamento dos PCMs, ou seja, arrefecendo durante a noite. No inverno, não existiram tantas perdas de calor para o exterior, no entanto esta tecnologia não é eficaz para obter ganhos solares.
Cerdeira (2015)	Estudo de um sistema solar passivo aplicado em fachadas com parede de trombe. Análise do efeito da incorporação de um PCM à base de Parafina e outro à base de Octadecano.	Experimental	Nos ensaios de aderência e de compressão, nas argamassas com adição de PCM, a resistência reduz 50 % comparativamente com argamassas cimentícias tradicionais. O sistema ventilado é mais vantajoso, porque permite um maior conforto térmico; Os modelos com parede de trombe em granito e com parede de trombe com PCM apresentam uma condutividade térmica mais baixa que os restantes modelos, o que demonstra que o granito e o PCM – Parafina não permitem dissipação da energia no interior dos edifícios.
Navarro et al. (2016)	Pesquisa em PCM incorporados em betão ou gesso utilizando materiais microencapsulado de materiais de mudança de fase.	Experimental	Durante o processo de mistura as microcápsulas são fáceis de incorporar no material de construção. Uma grande superfície de troca de calor é proporcionada com a distribuição das pequenas cápsulas de PCM. É possível criar um material composto de PCM/betão que atinge resistências à compressão dentro do intervalo apropriado para a utilização em estruturas de edifícios (característica de 25 N/mm^2 – 35 N/mm^2).

Tabela 9: Estudos focados na análise de sistemas ativos de armazenamento de energia em edifícios com incorporação de materiais de mudança de fase (continua)

Referência	Estudo	Metodologia	Conclusão
Hed & Bellander (2006)	Estudaram o arrefecimento passivo em edifícios através da implementação de materiais de mudança de fase em que estes se encontram em contacto direto com o ar.	Simulação dinâmica.	Com o uso de materiais de mudança de fase integrados num edifício em placas encapsuladas, localizado no teto, concluíram que o coeficiente de transmissão térmica entre o ar e o PCM aumenta significativamente quando a superfície é rugosa comparada a uma superfície polida (sendo válido para a grossura de 0,02m). O coeficiente de transmissão térmica para uma velocidade do ar de 4 m/s varia entre 13-30 W/m ² .°C.
Arkar (2008)	Estudou o potencial de um dispositivo de arrefecimento natural incorporando PCM num sistema de ventilação mecânica	Experimental	Concluiu que para uma taxa de três renovações de ar durante o período noturno, a temperatura de fusão ótima era de 2 °C acima da média das temperaturas ambiente dos três meses de Verão (Junho a Agosto), ou aproximadamente igual à temperatura ambiente média do mês mais quente. A razão ótima entre a massa de PCM e o fluxo de ar que passa através do sistema foi determinada em 1-1,15 Kg/m ³ /h.
Álvarez et al. (2013)	O uso da ventilação de arrefecimento à noite, além de materiais de mudança de fase, é uma boa estratégia para reduzir as necessidades de arrefecimento dos edifícios. No entanto, existem desvantagens na forma como as coisas têm sido desenvolvidas até ao presente. De modo a superar estas desvantagens os autores apresentaram soluções inovadoras.		Em comparação com as soluções já existentes, as soluções inovadoras: aumentam a área de contacto entre o PCM e o ar por um fator de aproximadamente 3,6; aumenta o coeficiente de convecção de forma significativa; e têm um melhor fator de utilização devido à inclusão de sistemas de controlo ativos que permitem que o frio armazenado seja efetivamente utilizado quando necessário. O projeto MECLIDE visa superar as desvantagens com o desenvolvimento de soluções inovadoras, com base em: colocar o PCM no núcleo de camadas de ar sob ventilação mecânica o que permite um aumento significativo da transferência de calor dos coeficientes por convecção e o uso de estratégias de controlo para ajustar o arrefecimento necessidades do edifício. O uso de formas de encapsulamento (placas/alhetas, cilindro e esfera) que aumentam os coeficientes de transferência de calor por convecção e otimizam o uso de quantidades significativas de PCM consistentes com a capacidade de armazenamento necessária nos edifícios em determinadas regiões.

Tabela 9: Estudos focados na análise de sistemas ativos de armazenamento de energia em edifícios com incorporação de materiais de mudança de fase (conclusão)

Referência	Estudo	Metodologia	Conclusão
Evola et al. (2014)	Através de um caso de estudo, investigaram uma melhoria/ otimização do conforto térmico dos edifícios, durante a estação de Verão, e identificaram a distribuição de temperaturas ao longo do sistema de ventilação. Neste caso foi utilizado um PCM encapsuladas em contacto direto com as paredes divisórias.	Simulação Numérica	Concluíram que o sistema permitia obter uma redução da temperatura operativa média de um compartimento em Julho em cerca de 0,4 °C. Na maior parte do tempo as condições de conforto foram controladas, e as sensações de desconforto menos intensas.
Gracia et al. (2014)	Avaliação e estudo do ciclo de vida (LCA) de uma fachada ventilada com PCM na sua câmara-de-ar. -Em Puigverd de Lleida (Espanha) foram construídos experimentalmente dois cubículos, com e sem o sistema de fachada ventilada. -As diferenças de consumos de energia dos sistemas AVAC foram registadas e utilizadas para determinar as poupanças ambientais durante a fase de operação de cada edifício.	Experimental	A utilização deste sistema levou a uma redução significativa do consumo de energia elétrica do sistema de climatização tanto para aquecimento como para arrefecimento. Os resultados do LCA mostraram que, considerando uma vida útil de 50 anos, a utilização desta fachada ventilada, reduz em 7,7% o impacto ambiental global de todo o edifício. O retorno ambiental deste sistema ativo é significativamente mais baixo que os outros que utilizam PCM. O retorno ambiental do sistema é de 30 anos, que pode ser reduzido em 6 anos, se em vez de aço for utilizada madeira na estrutura.
Waqas et al. (2016)	Estudaram o arrefecimento passivo em edifícios através da implementação de materiais de mudança de fase em que estes se encontram em contacto direto com o ar. Investigaram o uso de uma unidade de armazenamento de energia no sistema de ventilação dos edifícios, em climas quentes e frios. Experimentalmente foi investigada a influência da temperatura e circulação do ar nas tubagens de acumulação de frio com PCMs.	Experimental.	Através de resultados experimentais concluíram que o PCM pode ser usado para manter a temperatura do ar quente entre certos limites durante o dia, através da libertação do ar armazenado no PCM durante a noite.
Saffari et al. (2016)	Avaliaram o efeito do PCM com diferentes espessuras e pontos de fusão incorporados num equipamento de AVAC. Na experiencia, foram usados os painéis colocados dentro das paredes e do teto. O objetivo do estudo foi verificar se o PCM poderia reduzir o consumo de energia consumida nos equipamentos AVAC.	Experimental	Concluíram que o PCM com temperatura de ponto de fusão de 27 ° C atingiu as maiores poupanças anuais de energia, aproximadamente 10-15% em todas as categorias de conforto térmico. Foram registadas maiores poupanças de energia e menores períodos de recuperação (abaixo de três anos) para casos com uma camada de PCM de 10mm.

3. METODOLOGIA

Para atingir os objetivos pretendidos foram utilizados vários métodos de investigação seguidamente apresentados. O estudo foi dividido em duas fases principais de acordo com a estrutura metodológica aplicada.

Na fase inicial da dissertação foi aplicada uma metodologia descritiva uma vez que se pretendeu identificar, registar e analisar as principais características de tecnologias com materiais de mudança de fase desenvolvidas no âmbito de diversos estudos científicos. Nesta fase os resultados pretendidos foram alcançados através da realização de uma pesquisa bibliográfica focada na análise de artigos científicos, dissertações e livros.

Na segunda fase do estudo, tendo em conta o objetivo de analisar a viabilidade económica da implementação de tecnologias com materiais de mudança de fase em Portugal, foram aplicados métodos quantitativos com recurso à análise de um caso de estudo. A utilização de um caso de estudo justifica-se pela necessidade de analisar a viabilidade económica de implementar tecnologias com materiais de mudança de fase em contexto real.

A análise de viabilidade económica foi efetuada através da determinação e comparação do desempenho energético e dos custos de ciclo de vida do edifício selecionado como caso de estudo com e sem a implementação de materiais de mudança de fase.

O desempenho energético foi determinado através da análise, usando programa de simulação dinâmica, de um edifício de geometria simples situado no Norte de Portugal. A utilização de uma geometria simples tem como objetivo diminuir eventuais perdas térmicas inerentes a edifícios com geometrias mais complexas, otimizar os ganhos solares no interior do edifício e reduzir a complexidade e o tempo de simulação.

No que respeita ao desempenho económico este foi determinado através de uma abordagem de ciclo de vida, recorrendo-se sempre que necessário a uma pesquisa de mercado para determinação dos custos.

3.1 Simulação

3.1.1 Procedimento

A eficiência energética de um edifício define-se pela otimização de energia, ou seja, utilizar menos energia obtendo os mesmos benefícios. A temperatura no interior dos edifícios é influenciada por vários aspetos:

- Fontes de calor internas;
- Condições climatéricas (por exemplo a radiação solar e temperatura exterior);
- Taxa de ventilação;
- Equipamentos de climatização (sistemas de aquecimento e arrefecimento);
- Estrutura do edifício e as propriedades dos materiais utilizados nos sistemas construtivos.

A localização do edifício também é um aspeto a ter em conta na eficiência energética e a sua integração no meio implica o conhecimento das condições microclimáticas dessa região.

Neste estudo foram utilizados programas de simulação dinâmica. Recorreu-se ao programa de simulação dinâmica *EnergyPlus* como motor de cálculo e ao *DesignBuilder* como programa de interface gráfica. Com a utilização destes programas é possível otimizar projetos de edifícios e obter uma maior eficiência energética dos mesmos.

As necessidades de energia do edifício foram calculadas usando o programa de simulação dinâmica *EnergyPlus*. Este programa apresenta vários algoritmos para análise do balanço térmico. Neste estudo foi utilizado um algoritmo baseado em diferenças finitas. Alguns autores (Tabares et al. 2012; Tabares & Nrel 2012), validaram a utilização deste *software* no que refere à análise de tecnologias com incorporação de PCMs usando o algoritmo de equilíbrio térmico baseado em diferenças finitas. Estes autores usaram uma abordagem semelhante à preconizada pela ASHRAE Standard 140 (ASHRAE 2004), que consiste na verificação analítica, teste comparativo e validação empírica. De acordo com esses estudos, este modelo pode ser usado com resultados anuais e mensais aceitáveis (Tabares et al. 2012).

Através da elaboração prática desta dissertação determinou-se o PCM mais satisfatório para uso numa habitação típica no Norte de Portugal. Estabeleceu-se em que quantidade e localização dentro do edifício é que estes materiais conduzem a uma otimização do consumo energético.

O estudo foi realizado para quatro cidades do Norte do país: Bragança, Montalegre, Porto e Vila Real. Estas 4 cidades foram selecionadas com o objetivo de abranger localizações com diferentes condições climáticas de Verão e de Inverno, como se pode observar na Figura 7 e na Tabela 10.

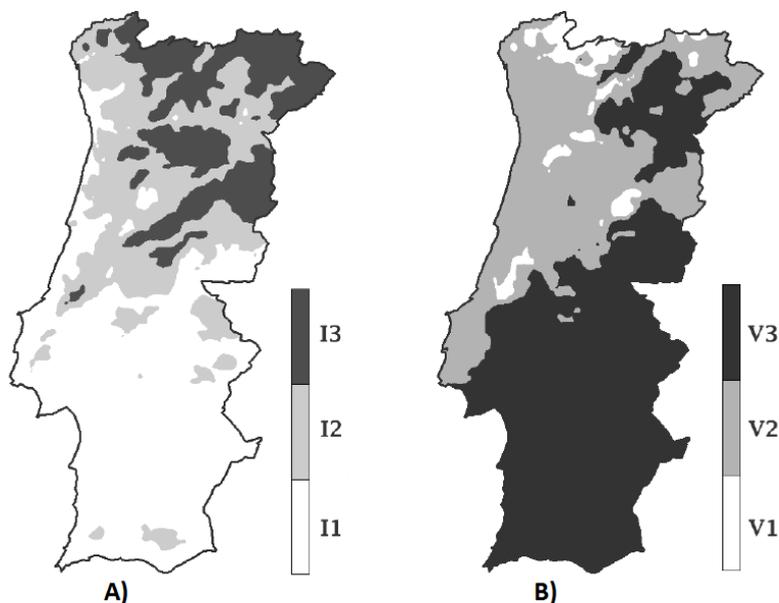


Figura 7: A) Zonas climáticas de Inverno; B) Zonas climáticas de Verão (Portugal 2013)

Tabela 10: Localizações e zonas climáticas dos casos de estudo (Portugal 2013)

Localização	Altitude (m)	Zona climática Verão	Zona climática Inverno
Bragança	680	V2	I3
Montalegre	993	V1	I3
Porto	100	V2	I1
Vila Real	579	V2	I2

Uma vez que as condições climáticas de cada cidade são diferentes, procurou-se entender de que forma se altera o desempenho dos diferentes PCMs. Em suma, foi investigada uma simulação representativa da realidade climática do Norte de Portugal.

Neste estudo foi analisado um edifício de geometria simples tendo como objetivo diminuir a complexidade e o tempo de simulação. Esta opção permitiu efetuar uma análise comparativa mais rigorosa, de modo a otimizar os ganhos solares no interior do edifício e diminuir eventuais perdas térmicas inerentes a edifícios com geometrias mais complexas. Deste modo, foi possível perceber-se qual o efeito da inclusão do PCM no edifício simulado, através de uma análise comparativa entre os vários tipos de PCM e a identificação do tipo, do local e do modo de aplicação de PCM para os climas em estudo.

Esta investigação possibilitou avaliar de que forma este tipo de materiais pode contribuir para a diminuição das necessidades energéticas de um edifício quando construído numa destas cidades.

Numa primeira fase efetuaram-se, para a cidade do Porto, simulações durante um ano para um edifício climatizado em dois horários distintos: apenas nas horas em o edifício se encontra ocupado e durante todo o ano.

Os modelos de simulação analisados foram os seguintes:

- Edifício de referência (A camada de PCM não é tida em conta e considerou-se que o edifício se encontra climatizado na estação de aquecimento e arrefecimento);
- Edifício de referência com PCM nas paredes exteriores;
- Edifício de referência com PCM na cobertura;
- Edifício de referência com PCM nas paredes exteriores e na cobertura;

Após a realização deste tipo de simulações efetuaram-se as restantes simulações considerando os sistemas de climatização ligados em permanência, ou seja, com a climatização sempre ativa, por ser uma situação que demonstra melhor as potencialidades do PCM.

Apesar disso, considerou-se a possibilidade de o cenário em que o sistema de climatização se encontra ativo apenas quando o edifício se encontra ocupado, pois esta caracteriza melhor a realidade Portuguesa. Tendo isto em conta as simulações realizadas para a cidade do Porto foram efetuadas também para esta situação na primeira fase de simulações.

Após a realização das simulações mencionadas, foi efetuada para cada cidade, uma nova simulação. Nesta simulação foram considerados os PCMs que obtiveram menores necessidades nominais anuais de energia útil nas paredes exteriores e cobertura das simulações anteriores. Ou seja, foi elaborada uma simulação para cada cidade com um PCM na parede e na cobertura distintos.

Numa segunda fase estudou-se qual a solução construtiva ou o suporte que melhor se comporta com os materiais de mudança de fase. Neste caso, apenas se estudou a cidade do Porto, considerando-se que a forma de suporte se comportaria ou teria resultados idênticos em todas as cidades. Com esta análise pretendeu-se estudar a influência da condutibilidade térmica do elemento de suporte da camada de PCM, no desempenho térmico da solução.

As hipóteses de suporte analisadas foram:

- PCM em contacto direto com o ambiente interior;
- Parede exterior e cobertura revestida com chapa metálica entre o PCM e o ambiente interior;
- Parede exterior e cobertura revestida com chapa metálica (com caixa-de-ar);
- Adição de uma caixa-de-ar com 0,03 m entre o tijolo furado e o PCM nas paredes exteriores

Na terceira fase estudaram-se os PCMs que melhor se comportaram na primeira fase de simulações, com a melhor solução construtiva obtida na segunda fase de simulação, para as quatro cidades, no edifício de simulação. Ainda nesta fase, tendo em consideração o elevado custo dos materiais de mudança de fase, foi efetuada uma tentativa de otimizar a quantidade de PCM aplicada. Estudaram-se duas hipóteses para perceber se a redução de PCMs permitiria obter uma relação custo/ benefício satisfatória.

Para tal recorreu-se ao estudo de dois cenários distintos:

- Incorporar PCMs apenas nas paredes exteriores localizadas a Sul e na cobertura;
- Não incorporar PCMs nas paredes exteriores localizadas a Norte.

Através dos resultados obtidos nesta fase de simulação foi possível prever os consumos energéticos de um edifício localizado em Bragança, Montalegre, Porto e Vila Real, com a inclusão do PCM com o melhor comportamento térmico, percebendo-se se é ou não vantajosa a inclusão de materiais de mudança de fase no edifício, para o clima Português, e qual a poupança energética daí resultante.

3.1.2 Programa de Simulação Dinâmica

Os programas de simulação do comportamento térmico e energético dos edifícios têm surgido devido à preocupação com processos que conduzam a consumos energéticos reduzidos.

A simulação energética prevê as transferências de energia e de radiação solar fundamentais para o consumo de energia de um edifício, comportamento térmico e comportamento térmico interior.

O *EnergyPlus* foi desenvolvido e concebido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (*U.S. Department of Energy*). Este *software* é provavelmente o programa mais eficiente de simulação dinâmica de edifícios (Soares et al. 2013; Bentz & Turpin 2007;

Castell et al. 2009). A desvantagem deste *software* é não ter uma interface gráfica interativa, o que pode implicar o uso de outros programas para a modelação gráfica.

O *EnergyPlus* é um *software* apoiado em dois programas de simulação existentes reconhecidos (*BLAST* e *DOE-2*) e dispõem de bastante material de apoio e programas auxiliares que possibilitam modelar facilmente os edifícios a simular, proporcionando assim ao utilizador um método de simulação simples (Crawley et al. 2008).

Na Tabela 11 comparam-se as potencialidades dos três *softwares* (*BLAST*, *DOE* e o *EnergyPlus*) (Muruganatham 2010).

Tabela 11: Comparação das características dos programas de simulação (adaptado de Muruganatham, K. 2010)

Caraterísticas gerais	Software		
	<i>DOE-2</i>	<i>BLAST</i>	<i>EnergyPlus</i>
Soluções simultâneas			
Integração de equipamentos/sistemas/plantas	Sim	Não	Sim
Solução conseguida por interações	Não	Não	Sim
Acoplamento rígido	Não	Não	Sim
Aproximação de resultados por múltiplas medições			
Número de medições definidas pelo utilizador	Não	Não	Sim
Variação do número de medições	Não	Não	Sim
Dados de entrada (“Inputs”)			
Possibilidade de modificação pontual de dados em necessidade reformulação integral	Sim	Não	Sim
Dados de saída (“Outputs”)			
Relatórios “ <i>Stantdard</i> ”	Sim	Sim	Sim
Relatórios definidos pelo utilizador	Sim	Não	Sim
Dados de entrada (superfícies exteriores e áreas) visíveis (2D ou 3D)	Não	Não	Sim

O *EnergyPlus* possibilita desenvolver estudos de forma a melhorar a eficiência energética de um edifício existente, ou de um edifício em fase de projecto. Esta ferramenta de simulação tem sido alvo de estudo e consiste na base de trabalho de várias investigações desenvolvidas (Melo & Lamberts 2009; EnergyPlus Development Team 2009; Scarduelli & Westphal; Lamberts 2005).

O *EnergyPlus* é um sistema primário de simulação energética, tendo documentos de texto simples como ficheiros de entrada e saída (Weinl et al. 2005).

O *EnergyPlus* apresenta-se sob a forma de dois aplicativos principais: *EP-Launch* e *IDF Editor*. Estes aplicativos simplificam a elaboração e inclusão de ficheiros com as informações

da geometria dos referentes sistemas a simular e de ficheiros climáticos, da mesma maneira que simplifica a obtenção dos dados de saída (Weinl et al. 2005).

Esta ferramenta usa ficheiros climáticos com a definição detalhada de propriedades relativas ao comportamento do meio ambiente local, principalmente a temperatura exterior, radiação, humidade, orientação solar, entre outros (Sá 2015).

A Figura 8 apresenta a funcionalidade *EP-Launch* do *EnergyPlus* que permite a seleção de ficheiros relativos à realização da simulação. Como por exemplo: a edição do ficheiro de simulação, o ficheiro climático, a visualização do edifício projetado, entre outros.

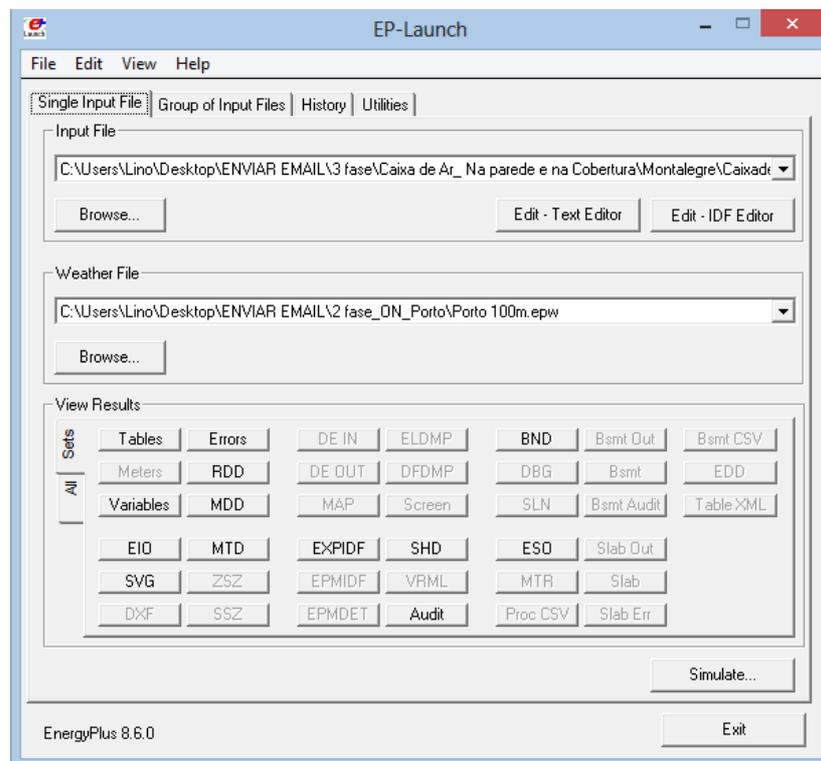


Figura 8: Interface visual da funcionalidade EP-Launch

Na Figura 9 apresenta-se o *Edit- IDF Editor* do *EnergyPlus*. Este é o comando principal do *software* onde são introduzidos os dados necessários para a simulação energética do edifício.

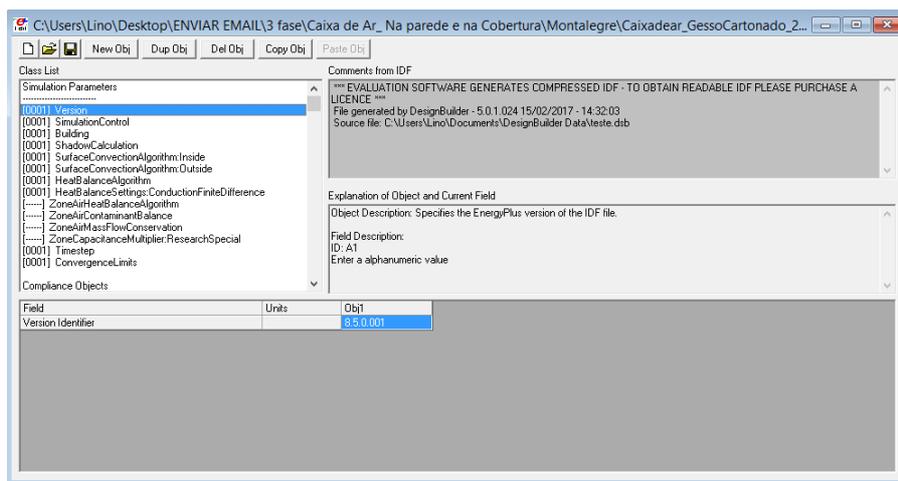


Figura 9: Interface visual do IDF Editor

A metodologia de uma simulação energética realizada no *EnergyPlus*, realiza-se com base em três fases (Sá 2015):

- A primeira fase é a criação de um modelo no programa, adicionando os vários dados que especificam o edifício, como é o caso das suas dimensões, constituição e geometria;
- A simulação, analisando o modelo inserido pelo utilizador, tendo em consideração um ficheiro de dados climáticos designado pelo mesmo;
- Na última fase obtém-se os resultados, realiza-se uma análise dos mesmos e conclusões, realizando, se for o caso, verificações de sensibilidade das diversas variáveis relativas ao edifício.

Tetlow et al. (2011) estudaram a simulação de materiais de mudança de fase microencapsulado no isolamento das paredes interiores em edifícios antigos no Reino Unido, apresentando o *EnergyPlus* como a ferramenta com a melhor capacidade de simular elementos com PCM.

Apoiando-se na comparação com dados experimentais, Shretsha et al. (2011), analisaram o modelo de impregnação de PCM em materiais de isolamento do *EnergyPlus* e obtiveram um erro de 9% nas simulações realizadas.

A geometria do caso de estudo foi inserida no *software DesignBuilder*. Este *software* oferece uma plataforma de modelação de edifícios em 3D de rápida e fácil utilização.

Este *software* permite efetuar a simulação dinâmica através do motor de cálculo do *EnergyPlus*. Contudo, tendo em consideração que é uma ferramenta paga, foi apenas utilizada

no período experimental gratuito para a inserção das características geométricas do edifício em estudo.

O processo utilizado no *DesignBuilder* para a criação do modelo de simulação foi a seguinte:

- Adicionar novo edifício;
- Traçar o contorno do edifício;
- Introdução das partições, ou seja, as paredes interiores do edifício;
- Introdução das portas e envidraçados;
- Exportação para o *EnergyPlus*

A interface visual do *DesignBuilder* é apresentada na Figura 10.

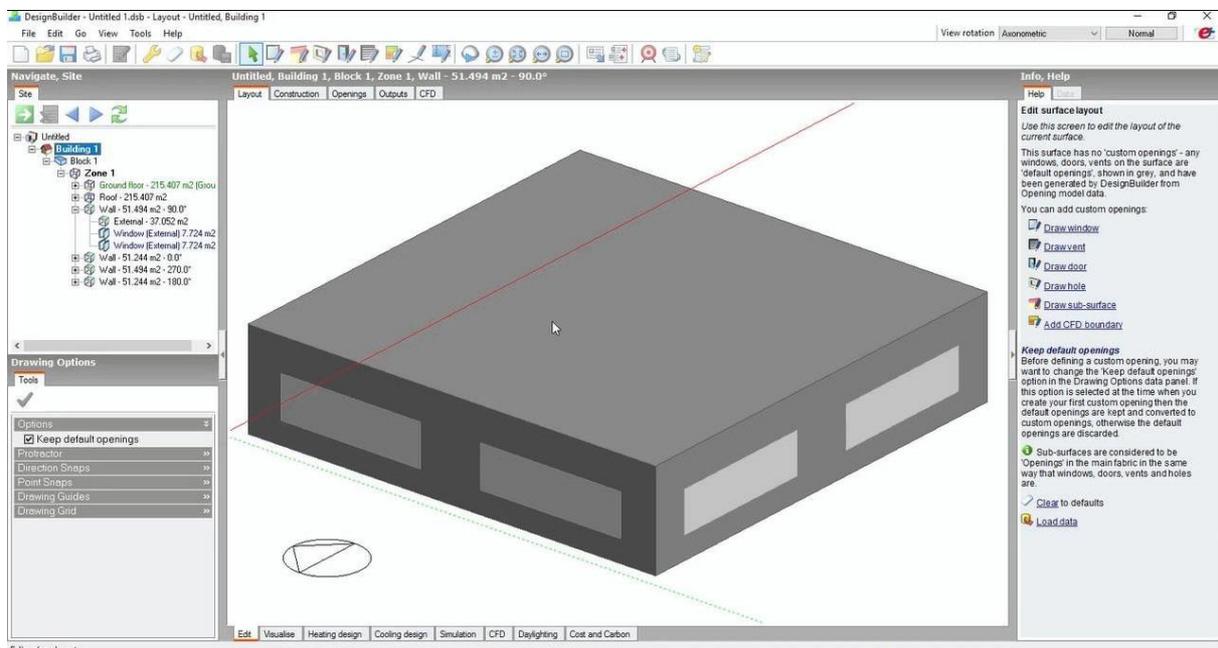


Figura 10: A interface visual do DesignBuilder

3.2 Caso de estudo

O edifício analisado foi o mesmo em todas as fases do estudo, apenas alterando a solução construtiva ou modo de suporte e os PCMs em estudo. De modo a realizar simulações para um tipo de edifício comum efetuaram-se simulações para um edifício de habitação unifamiliar, localizado no Norte de Portugal.

Portugal tem cerca de 3 500 000 edifícios e o Norte de Portugal é a zona geográfica com o maior número de edifícios (cerca de 1 200 000 edifícios e 1 800 000 habitações) (INE 2012).

Os edifícios unifamiliares são um dos tipos mais comuns de construções em Portugal, sendo a grande maioria dos edifícios assim construídos (90,7%) (INE 2012).

A escolha do caso de estudo teve em consideração simular um edifício representativo da realidade construtiva do Norte de Portugal. No entanto, tentou-se que a geometria do edifício fosse o mais simples possível para facilitar a simulação dinâmica.

As soluções construtivas correspondem às soluções construtivas típicas existentes em Portugal entre 1960 e 1990 (período de construção ao qual corresponde o maior número de edifícios existentes em Portugal) (INE 2012). O edifício simulado contém uma área total de 110 m², 3 metros de altura e possui de uma pala horizontal na fachada orientada a Sul (em todo o seu comprimento de 11 metros). A pala possui uma largura de 1m e tem como objetivo prevenir o sobreaquecimento na Estação de Arrefecimento. O edifício apresenta um total de 7 zonas distintas:

- Cozinha: 12 m²
- Sala de Estar: 28 m²
- Quarto 1: 16 m²
- Quarto 2: 20 m²
- Vestíbulo: 17 m²
- IS1 – Instalações Sanitárias 1: 8 m²
- IS2 – Instalações Sanitárias 2: 9 m²

A geometria do edifício de habitação unifamiliar simulado representa-se nas Figuras 11 a 14.

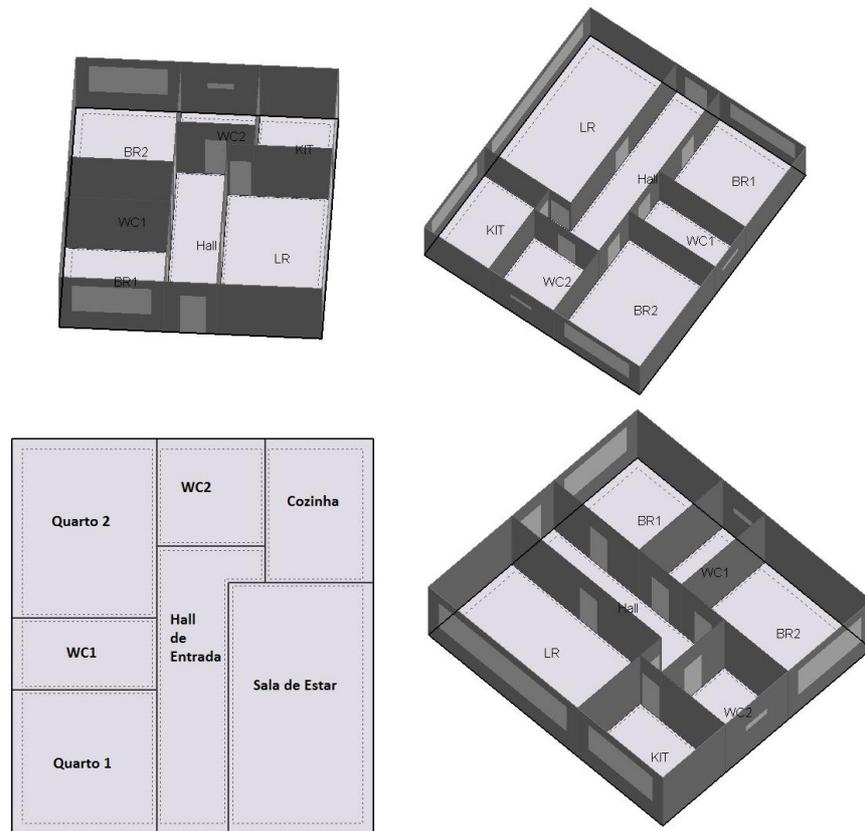


Figura 11: Representação da planta do edifício simulado obtido no *DesignBuilder*

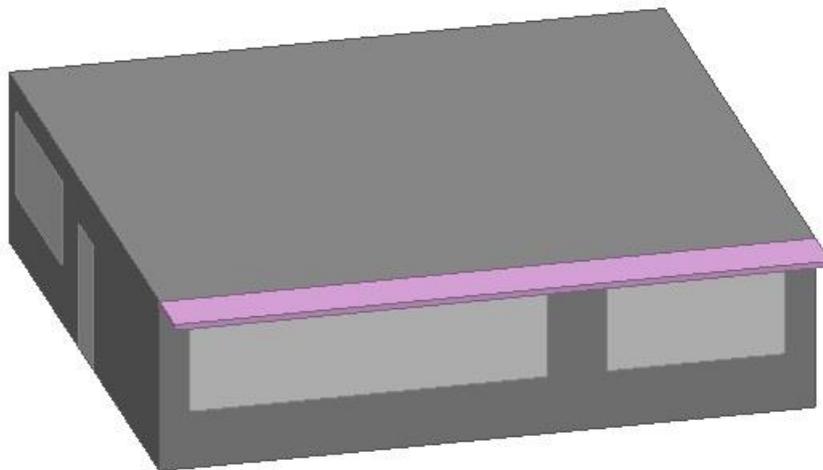


Figura 12: Vista da fachada Sul e Oeste do edifício simulado

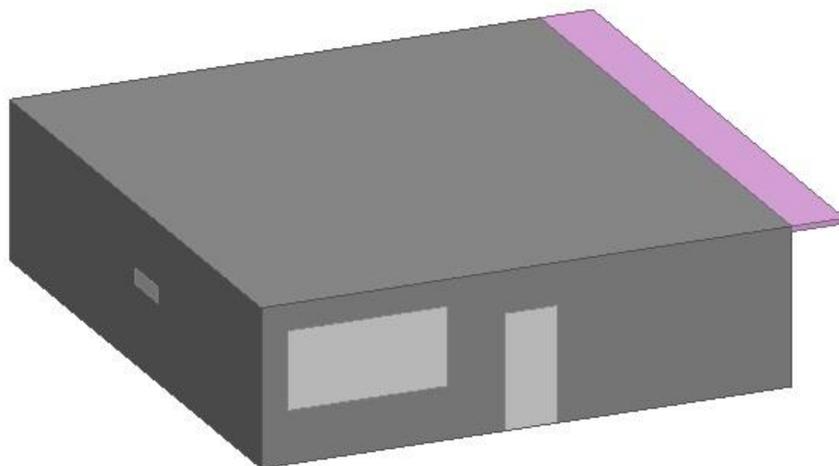


Figura 13: Vista da fachada Norte e Oeste do edifício simulado



Figura 14: Vista da Fachada Sul e Este do edifício simulado

Os envidraçados são de vidro simples de 6 mm de espessura com dispositivos de proteção solar (estores), já as percentagens de envidraçados nas fachadas a Sul e a Norte são de 40,91% e 0,91%, respetivamente. Na Tabela 12 são apresentados os vãos envidraçados.

Tabela 12: Orientação e área dos vãos envidraçados do edifício simulado

Compartimento	Orientação	Área do Envidraçado (m²)
Quarto 2	Este	4,5
IS2	Este	0,3
Cozinha	Sul	4,5
Sala de Estar	Sul	9
IS1	Norte	0,3
Quarto 1	Oeste	4,5

Os perfis de funcionamento dos dispositivos de protecção solar considerados foram:

- Estação de aquecimento (Inverno): Com o intuito de se maximizar os ganhos solares obtidos durante o dia de modo a diminuir as necessidades de arrefecimento, considerou-se os estores fechados à noite e abertos durante o dia.
- Estação de arrefecimento (Verão): Definiu-se os estores abertos em 30% durante o dia (8h-20h) e fechados durante a noite, de modo a evitar o sobreaquecimento do espaço interior.

No que se refere à ocupação do edifício, foi definida uma ocupação de três pessoas tendo em consideração que se trata de um edifício de tipologia T2. Durante um ano foi considerado a seguinte ocupação das pessoas no edifício:

- Dias úteis (Segunda a Sexta-feira): As pessoas encontram-se no edifício, exceto das 8 às 19 horas.
- Fim-de-semana (Sábado e Domingo): As pessoas encontram-se 24 horas no edifício.

A ocupação dos indivíduos nas respectivas divisões do edifício durante um ano foi considerada em média, a seguinte:

- 15% do tempo de ocupação nas IS e no Vestíbulo;
- 85% do tempo de ocupação nos quartos, cozinha e sala.

Os equipamentos e a iluminação foram estabelecidos durante um ano, com os perfis de funcionamento apresentado na Tabela 13.

Tabela 13: Perfis de funcionamento dos equipamentos e da iluminação

	Equipamentos	Iluminação
Até às 7 horas	0,1	0,05
Até às 8 horas	0,3	0,3
Até às 19 horas	0,1	0
Até às 20 horas	0,6	0,6
Até às 23 horas	0,8	0,8
Até às 24 horas	0,4	0,4

A potência dos equipamentos elétricos e de iluminação utilizada nas simulações é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14: Potência definida para os equipamentos e iluminação

	Iluminação (W)	Equipamentos elétricos (W)
Quarto 2	30	80
IS2	13	50
Cozinha	18	100
Vestíbulo	20	40
Sala de Estar	47	150
IS1	12	50
Quarto 1	24	80

Considerou-se que o edifício simulado é ventilado em permanência por um caudal mínimo de ar através de ventilação natural. Definiu-se assim para o edifício em estudo um número de renovações do ar por hora (Rph) igual a 1, com o intuito de otimizar o conforto ambiental e a qualidade do ar interior.

No edifício simulado foi considerado um sistema de climatização para arrefecimento e aquecimento, com 100% de eficiência, mantendo as temperaturas num intervalo de conforto para os ocupantes.

A energia essencial para manter o edifício a temperaturas definidas pelos utilizadores com sistemas de climatização podem ser programadas em “*Thermostat*” no *EnergyPlus*. Estas temperaturas indicam quando o sistema de climatização é activado, ou seja, a temperatura acima da qual o arrefecimento é activado e a temperatura abaixo da qual o aquecimento é activado.

O sistema de climatização foi estabelecido para manter a temperatura interior durante o período de ocupação habitual num intervalo de temperatura de conforto. O sistema foi definido para na estação de arrefecimento arrefecer quando a temperatura interior for superior a 25°C e, na estação de aquecimento aquecer quando a temperatura interior for superior a 18°C, tal como definido no Decreto-Lei 118/2013 (Portugal 2013b).

3.3 Soluções Construtivas

Na Tabela 15 são apresentadas as soluções construtivas definidas do edifício simulado para os seguintes elementos construtivos:

- Paredes Exteriores;
- Paredes Interiores;
- Vãos envidraçados;
- Pavimento;
- Cobertura.

Tabela 15: Caracterização das soluções construtivas do edifício de referência simulado

	Materiais	Espessuras (m)
Paredes Exteriores	Reboco (Exterior)	0,02
	Tijolo Furado	0,22
	Gesso Cartonado (Interior)	0,012
Pavimento	Laje Maciça de Betão Armado (Exterior)	0,2
	Betonilha	0,02
	Ladrilho (Interior)	0,02
Cobertura	Betonilha (Exterior)	0,04
	Bloco de Aligeiramento	0,15
	Caixa-de-ar	0,04
	Gesso Cartonado (Interior)	0,012
Paredes Interiores	Reboco	0,02
	Tijolo Furado	0,22
	Reboco	0,02
Vão Envidraçado	Estore	0,005
	Vidro	0,006

A seleção das soluções construtivas teve a finalidade de aproximar o comportamento térmico das soluções construtivas do edifício à realidade, portanto foram escolhidas soluções de acordo com os métodos mais usuais em Portugal nos edifícios construídos entre 1960 e 1990 (época construtiva à qual correspondem a maioria dos edifícios existentes no país (INE 2012)). Nas paredes exteriores optou-se por gesso cartonado pelo interior, porque tendo em conta o estado da arte esta solução é normalmente uma boa solução de suporte para soluções que incorporem PCMs macroencapsulados.

Os vãos envidraçados serão compostos por um vidro simples de 6mm de espessura com dispositivos de protecção solar (estores). As portas exteriores e interiores serão constituídas por um painel de madeira maciça com 0,04m de espessura.

A camada de PCM encontra-se localizada entre o tijolo e o gesso cartonado nas paredes exteriores. Na cobertura os PCMs encontram-se inseridos na caixa-de-ar, sobre o gesso cartonado.

Na fase de simulação onde se estudaram as diferentes soluções de suporte foram consideradas quatro hipóteses:

- Eliminação do gesso cartonado (sabendo que esta solução não é viável foi analisada apenas para análise teórica dos resultados);
- Substituição do gesso cartonado por uma chapa metálica de 1 mm e adição de uma caixa-de-ar com 0,03 m entre o tijolo furado e o PCM nas paredes exteriores;
- Adição de uma caixa-de-ar com 0,03 m entre o tijolo furado e o PCM nas paredes exteriores;

As soluções construtivas consideradas no edifício de simulação encontram-se representadas nas Figuras 15 a 18, com os elementos que as compõem.

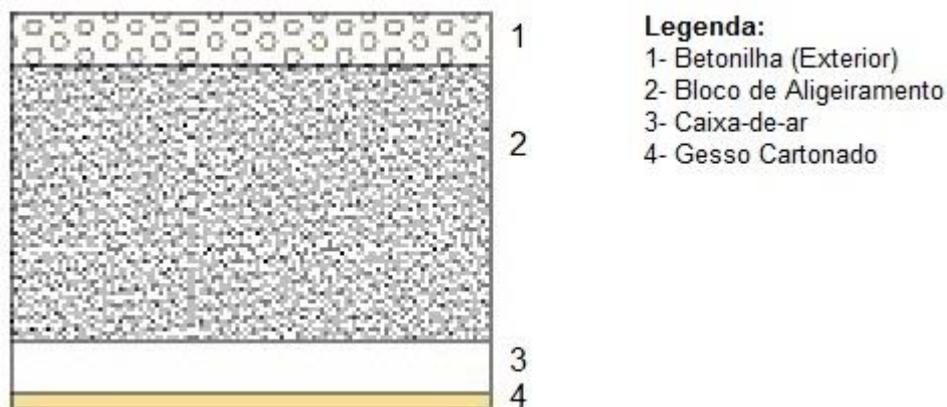


Figura 15: Pormenor construtivo da cobertura

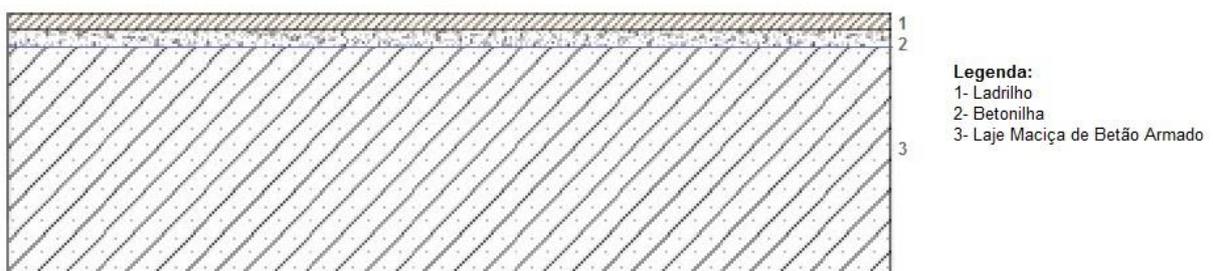


Figura 16: Pormenor construtivo do pavimento



Figura 17: Pormenor construtivo das paredes exteriores

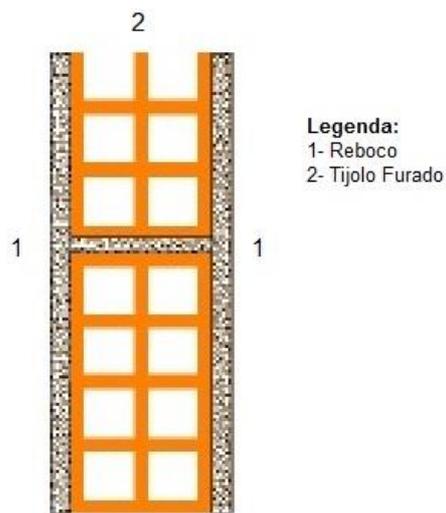


Figura 18: Pormenor construtivo das paredes interiores

3.3.1 Dados de entrada no software

Neste subcapítulo são apresentados as propriedades fundamentais para a introdução no programa de simulação, dos materiais das soluções construtivas analisadas. Nas Tabelas 16 a 29 são apresentadas essas propriedades.

Os valores apresentados nas Tabelas foram obtidos através de catálogos de materiais de construção e do ITE50 (Santos & Matías 2006).

Tabela 16: Propriedades do reboco

Reboco	
Rugosidade	Medianamente Rugoso
Espessura (m)	0,02
Condutividade Térmica (W/m.°C)	1,8
Densidade (kg/m ³)	1800
Calor Especifico (J/kg.°C)	1000

Tabela 17: Propriedades do tijolo furado

Tijolo Furado de 22cm

Rugosidade	Muito Rugoso
Espessura (m)	0,22
Condutividade Térmica (W/m. °C)	0,38
Densidade (kg/m ³)	633
Calor Especifico (J/kg.°C)	920

Tabela 18: Propriedades da betonilha

Betonilha 4cm

Rugosidade	Medianamente Rugoso
Espessura (m)	0,04
Condutividade Térmica (W/m.°C)	1,3
Densidade (kg/m ³)	2000
Calor Especifico (J/kg.°C)	1000

Tabela 19: Propriedades do bloco de aligeiramento

Bloco de Aligeiramento

Rugosidade	Muito Rugoso
Espessura (m)	0,15
Condutividade Térmica (W/m. °C)	1,15
Densidade (kg/m ³)	1333
Calor Especifico (J/kg.°C)	1000

Tabela 20: Propriedades do ladrilho

Ladrilho

Rugosidade	Liso
Espessura (m)	0,02
Condutividade Térmica (W/m. °C)	0,6
Densidade (kg/m ³)	1500
Calor Especifico (J/kg.°C)	960

Tabela 21: Propriedades da placa de gesso cartonado

Placa de Gesso Cartonado

Rugosidade	Liso
Espessura (m)	0,012
Condutividade Térmica (W/m. °C)	0,24
Densidade (kg/m ³)	790
Calor Especifico (J/kg.°C)	1000

Tabela 22: Propriedades da porta em madeira maciça

Porta em Madeira Maciça

Rugosidade	Liso
Espessura (m)	0,04
Condutividade Térmica (W/m. °C)	0,12
Densidade (kg/m ³)	544
Calor Especifico (J/kg.°C)	1210

Tabela 23: Propriedades da laje maciça de betão armado

Laje Maciça de Betão Armado

Rugosidade	Medianamente Rugoso
Espessura (m)	0,20
Condutividade Térmica (W/m. °C)	2,5
Densidade (kg/m ³)	2400
Calor Especifico (J/kg.°C)	1000

Tabela 24: Propriedades da betonilha

Betonilha 2cm

Rugosidade	Medianamente Rugoso
Espessura (m)	0,02
Condutividade Térmica (W/m. °C)	1,3
Densidade (kg/m ³)	2000
Calor Especifico (J/kg.°C)	1000

Tabela 25: Propriedades da caixa-de-ar na cobertura

Caixa-de-ar Cobertura

Espessura (m)	0,04
Resistência Térmica (m ² .°C/W)	0,16

Tabela 26: Propriedades da caixa-de-ar na parede exterior

Caixa-de-ar Parede Exterior

Espessura (m)	0,03
Resistência Térmica (m ² .°C/W)	0,18

Tabela 27: Propriedades da chapa metálica

Chapa Metálica

Rugosidade	Muito lisa
Espessura (m)	0,001
Condutividade Térmica (W/m. °C)	45.28
Densidade (kg/m ³)	7824
Calor Especifico (J/kg.°C)	500

Tabela 28: Propriedades do vidro simples

Vidro 6mm

Dados óticos	Espectro médio
Espessura (m)	0,006
Transmitância solar	0,775
Transmitância solar à frente	0,071
Transmitância solar atrás	0,071
Transmitância Visível	0,881
Transmitância Visível à frente	0,08
Transmitância visível atrás	0,08
Transmitância por infravermelhos	0
Transmitância por infravermelhos à frente	0,84
Transmitância por infravermelhos atrás	0,84
Condutividade Térmica (W/m. °C)	0,9

Tabela 29: Propriedades do estore

Estore – Elemento de Sombreamento (Reflectância de média)	
Transmitância solar	0,4
Reflectância Solar	0,5
Transmitância visível	0,4
Reflectância Visível	0,5
Emissão térmica hemisférica	0,9
Transmitância térmica (W/°C)	0
Espessura (m)	0,005
Condutividade térmica (W/m. °C)	0,1
Distância ao vidro (m)	0,05

3.4 Materiais de Mudança de fase

Neste estudo, tencionou-se analisar a capacidade dos materiais de mudança de fase na redução das necessidades energéticas e se estes conduzem a benefícios no conforto térmico dos ocupantes do edifício projectado, de forma passiva e sustentável.

A seleção de um material de mudança de fase, depende dos seguintes requisitos:

- O conhecimento da ficha técnica, dado que para a realização da simulação são necessários dados de informação do material e em muitos casos os materiais de mudança de fase não dispõem desses dados;
- A forma como os PCMs existem no mercado e a possibilidade de serem ou não aplicados em obra;
- A sua comercialização é um factor que condiciona a sua escolha uma vez que nem sempre ocorre;
- A temperatura de mudança de fase, o clima do local e as condições de conforto desejadas.

Através de vários estudos de materiais de mudança de fase entende-se que os PCMs com temperaturas de fusão mais baixos são mais eficazes nas estações de aquecimento, enquanto que os PCMs com temperaturas de fusão mais elevadas são mais eficientes nas estações de arrefecimento (Sá 2015).

Atendendo às condicionantes acima descritas, seleccionaram-se PCMs da empresa RUBITHERM[®] (Rubitherm 2017b). Estes destacam-se pela vasta informação que possuem, nos catálogos, para o processo de simulação e também pela grande variedade de PCMs com diferentes temperaturas de fusão, sendo estes apropriados à realidade climática dos edifícios localizados nas cidades Portuguesas.

No processo de simulação optou-se por PCMs macroencapsulados, pela facilidade de aplicação em obra e de simulação.

Os materiais de mudança de fase da RUBITHERM[®] da categoria RT são materiais orgânicos. Estes usam o seu processo de fusão de sólido para líquido (e vice-versa), com a intenção de armazenar e libertar elevadas quantidades de calor num intervalo de temperatura aproximadamente constante (Rubitherm 2017a).

Os PCMs da RUBITHERM[®] devido à sua pureza e composição específica apresentam uma notável capacidade de calor latente em intervalos de temperatura limitados e também são quimicamente inertes e têm uma vida útil ilimitada. Estes materiais proporcionam um meio muito eficaz para armazenar calor, mesmo quando os volumes são limitados e há baixas diferenças de temperatura de operação, estes materiais conseguem ser aplicáveis (Rubitherm 2017a).

Os materiais de mudança de fase da RUBITHERM[®] desta categoria apresentam as seguintes propriedades:

- Sem nenhum efeito de sobre-arrefecimento e quimicamente inerte;
- Produto de longa duração, com desempenho estável através dos ciclos de mudança de fase;
- Temperaturas de fusão entre os - 4°C e 100°C;
- Elevada capacidade de armazenamento de energia térmica;
- O armazenamento e libertação de calor ocorrem a temperaturas relativamente constantes.

Os materiais de mudança de fase da RUBITHERM[®] escolhidos da categoria RT foram seleccionados tendo em consideração as temperaturas médias das diferentes estações, temperaturas máximas e mínimas das diferentes cidades de estudo. Os PCMs seleccionados são os que se encontram apresentados na Tabela 30.

Tabela 30: Propriedades dos PCMs selecionados para o estudo

	RT 15	RT 18 HC	RT 21	RT 22 HC	RT 24	RT 25	RT 26	RT 28 HC
Ponto de fusão (°C)	15	18	21	22	24	25	26	28
Capacidade de armazenamento de calor (kJ/kg)	155	260	155	190	160	170	180	250
Rugosidade	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso	Liso
Espessura (m)	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Condutividade Térmica (W/m.°C)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Densidade sólida (Kg/l)	0,88	0,88	0,88	0,76	0,88	0,88	0,88	0,88
Densidade Líquida (Kg/l)	0,77	0,77	0,77	0,7	0,77	0,76	0,75	0,77
Densidade (kg/m ³)	825	825	825	730	825	820	815	825
Calor específico (J/kg.K)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

O valor da densidade foi obtido pela média da densidade líquida e sólida, convertendo ainda para (kg/m³), para dado de entrada no programa de simulação.

Para um correto processo de simulação, o *EnergyPlus* exige a introdução de 16 valores para a temperatura e correspondentes valores da entalpia de fusão. Estes valores permitem caracterizar o intervalo de fusão do material de mudança de fase.

Estes dados foram obtidos através da ficha técnica do fabricante. Nas Tabelas 31 a 38 apresentam-se os 16 valores para a temperatura e correspondentes valores de entalpia de fusão para cada PCM em estudo. Nos gráficos das Figuras 19 a 26 apresentem-se os gráficos que correlacionam a temperatura com a entalpia de fusão do respetivo material.

Tabela 31: Temperatura e entalpia de fusão RT 15

Dados EnergyPlus	
T (°C)	Entalpia (J/ kg)
-18	0
8	62000
9	72500
10	84500
11	97500
12	111500
13	126000
14	140000
15	154500
16	171000
17	180500
18	183500
19	186000
20	188000
21	190000
22	192000

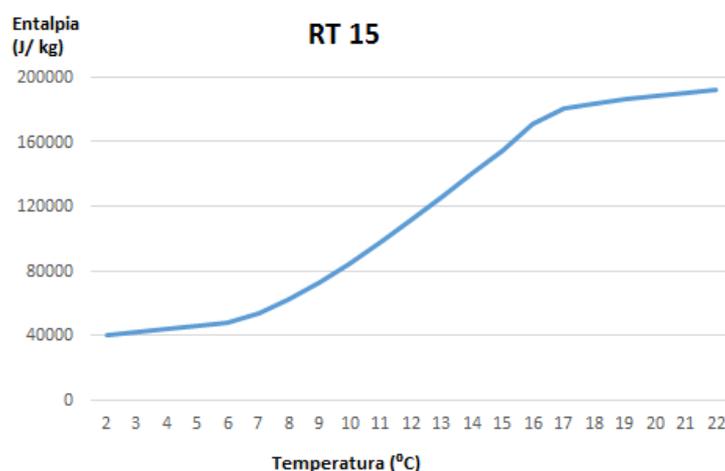


Figura 19: Curva da entalpia de fusão RT 15

Tabela 32: Temperatura e entalpia de fusão RT 18 HC

Dados EnergyPlus	
T (°C)	Entalpia (J/ kg)
-6	0
12	35500
13	39500
14	44000
15	53000
16	67500
17	118000
18	259500
19	279500
20	283500
21	285500
22	288000
23	290500
24	293000
25	295500
26	298500

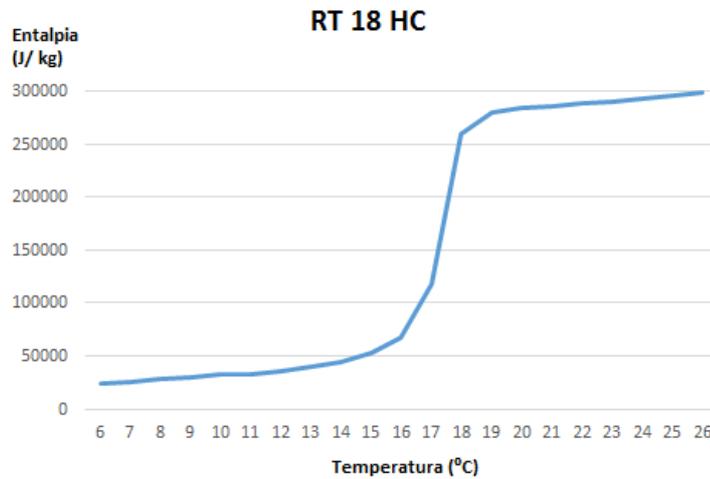


Figura 20: Curva da entalpia de fusão RT 18HC

Tabela 33: Temperatura e entalpia de fusão RT 21

Dados EnergyPlus	
T (°C)	Entalpia (J/ kg)
-14	0
14	63500
15	70500
16	79000
17	87500
18	98500
19	112000
20	128500
21	154000
22	192500
23	199500
24	202500
25	204500
26	207000
27	210000
28	212500

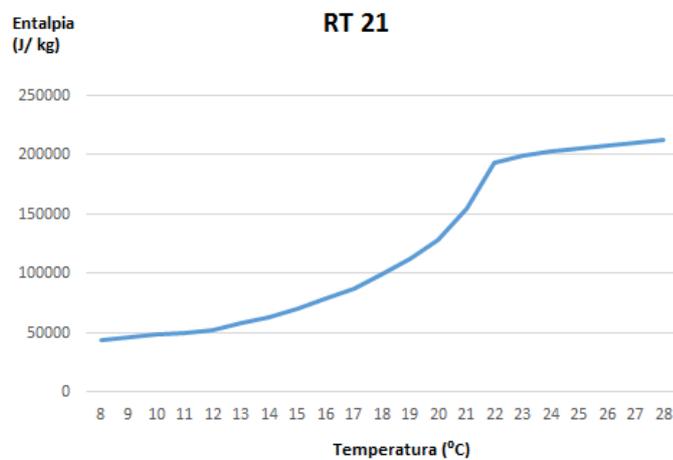


Figura 21: Curva da entalpia de fusão RT 21

Tabela 34: Temperatura e entalpia de fusão RT 22 HC

Dados EnergyPlus	
T (°C)	Entalpia (J/ kg)
-5	0
15	45000
16	50500
17	59000
18	70000
19	85500
20	108000
21	141000
22	189500
23	222500
24	227000
25	229000
26	231500
27	234000
28	236000
29	238500

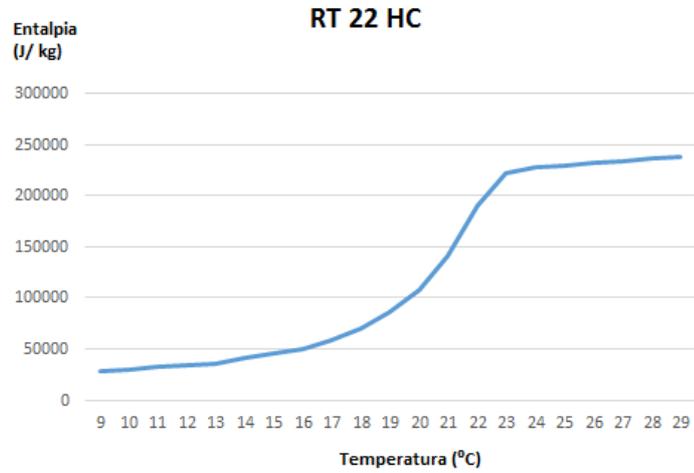


Figura 22: Curva da entalpia de fusão RT 22HC

Tabela 35: Temperatura e entalpia de fusão RT 24

Dados EnergyPlus	
T (°C)	Entalpia (J/ kg)
7	0
17	31000
18	40500
19	51000
20	64500
21	82500
22	103000
23	132500
24	161500
25	167000
26	172000
27	174000
28	176000
29	178000
30	179500
31	181500

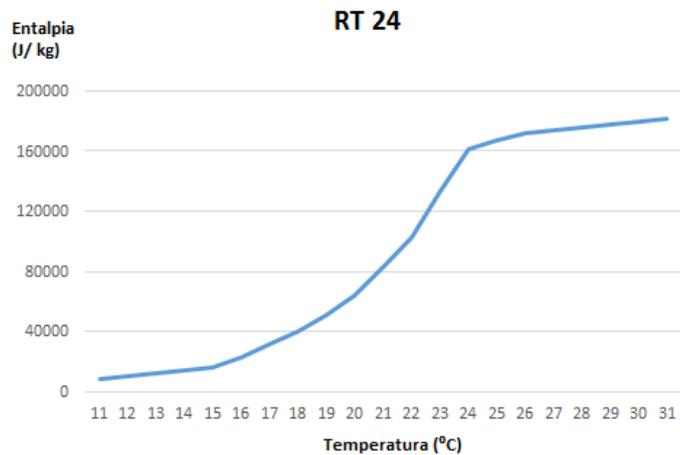


Figura 23: Curva da entalpia de fusão RT 24

Tabela 36: Temperatura e entalpia de fusão RT 25

Dados EnergyPlus	
T (°C)	Entalpia (J/ kg)
7	0
19	32500
20	40500
21	51000
22	65000
23	80500
24	111500
25	171000
26	180000
27	184500
28	186500
29	187500
30	190500
31	192000
32	194000
33	196000

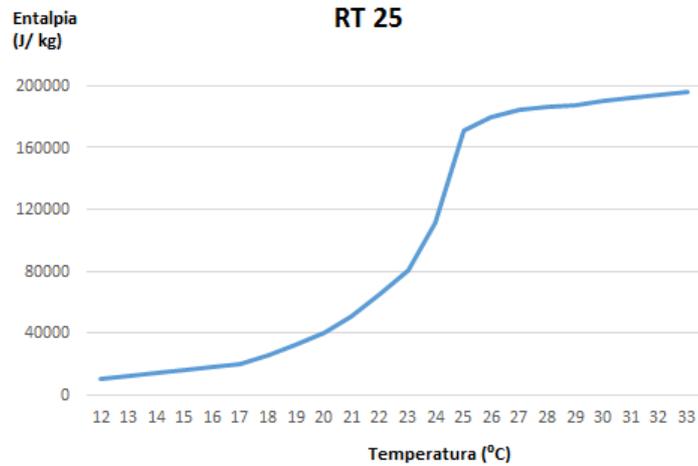


Figura 24: Curva da entalpia de fusão RT 25

Tabela 37: Temperatura e entalpia de fusão RT 26

Dados EnergyPlus	
T (°C)	Entalpia (J/ kg)
14	0
20	22500
21	30000
22	37500
23	48000
24	65000
25	96500
26	181000
27	190000
28	193000
29	195000
30	196500
31	198500
32	200500
33	202500
34	204500

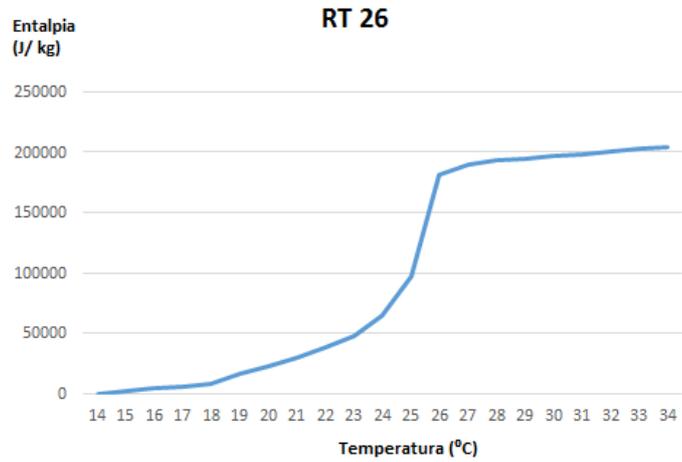


Figura 25: Curva da entalpia de fusão RT 26

Tabela 38: Temperatura e entalpia de fusão RT 28 HC

Dados EnergyPlus	
T (°C)	Entalpia (J/ kg)
5	0
22	34000
23	36000
24	40500
25	46000
26	57500
27	108000
28	250000
29	267500
30	269500
31	272000
32	274000
33	276500
34	279000
35	281500
36	284000

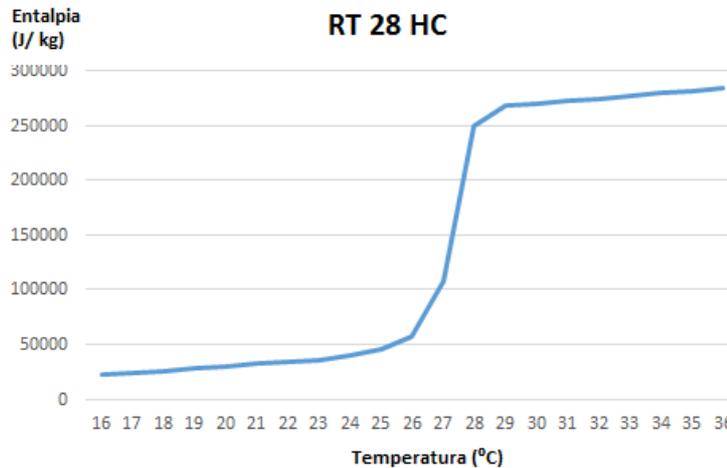


Figura 26: Curva da entalpia de fusão RT 28HC

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações realizadas nas diferentes fases de avaliação para o edifício em estudo nas quatro zonas do Norte de Portugal selecionados.

4.1 Primeira Fase

Tal como referido no capítulo anterior, na primeira fase foram realizadas simulações para conhecer o desempenho energético de um edifício de geometria simples para as quatro cidades de estudo. Estas simulações tiveram como objetivo perceber qual o efeito da inclusão do PCM, através de uma análise comparativa entre os vários tipos de PCM e a identificar o melhor tipo, local e modo de aplicação de PCM para os diferentes climas em estudo.

De forma representativa, numa primeira fase estudaram-se para a cidade do Porto, simulações durante um ano para um edifício climatizado em dois horários distintos: apenas na hora em que o edifício se encontra ocupado e outra quando a climatização está ativa durante todo o ano.

No que respeita às simulações para as restantes zonas foi adotado o cenário em que os sistemas de climatização se encontram permanentemente ativos.

4.1.1 Porto – Climatização permanentemente ativa

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados das simulações efetuadas para um edifício, localizado na cidade do Porto, climatizado durante todo o ano.

Nas Figuras de 27 a 29 são apresentadas as necessidades energéticas do caso de estudo com a aplicação de diferentes PCMs na cobertura, paredes exteriores e com PCMs na cobertura e paredes exteriores.

As linhas representadas nas Figuras 27 a 29, representam:

- A linha azul, representa as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento;
- A linha vermelha exhibe as necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento;
- As necessidades nominais anuais globais de energia primária, estão representadas na linha verde das figuras.

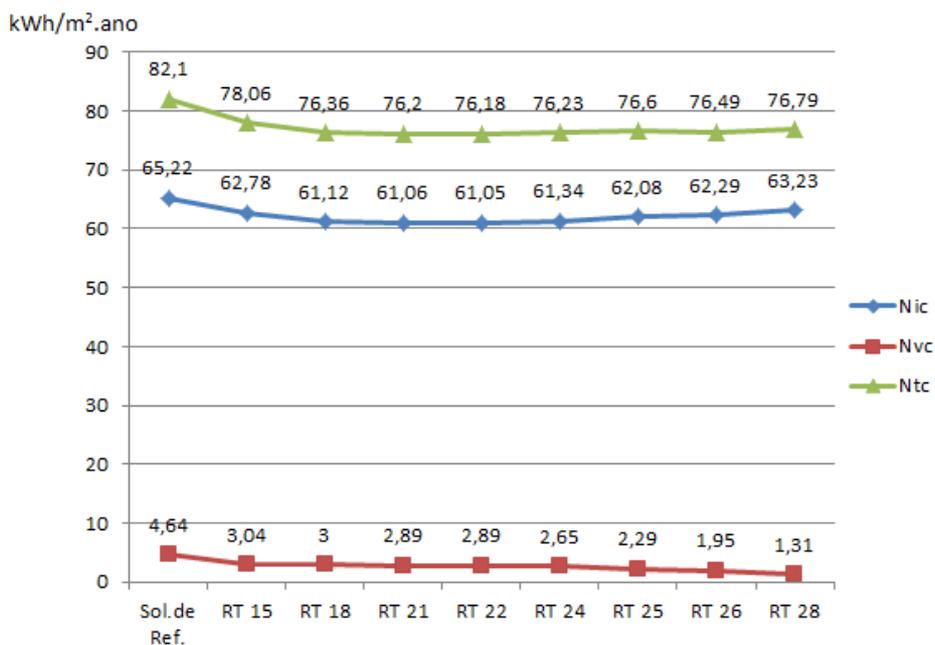


Figura 27: Necessidades energéticas do caso de estudo com a aplicação de PCMs na cobertura num edifício localizado na cidade do Porto

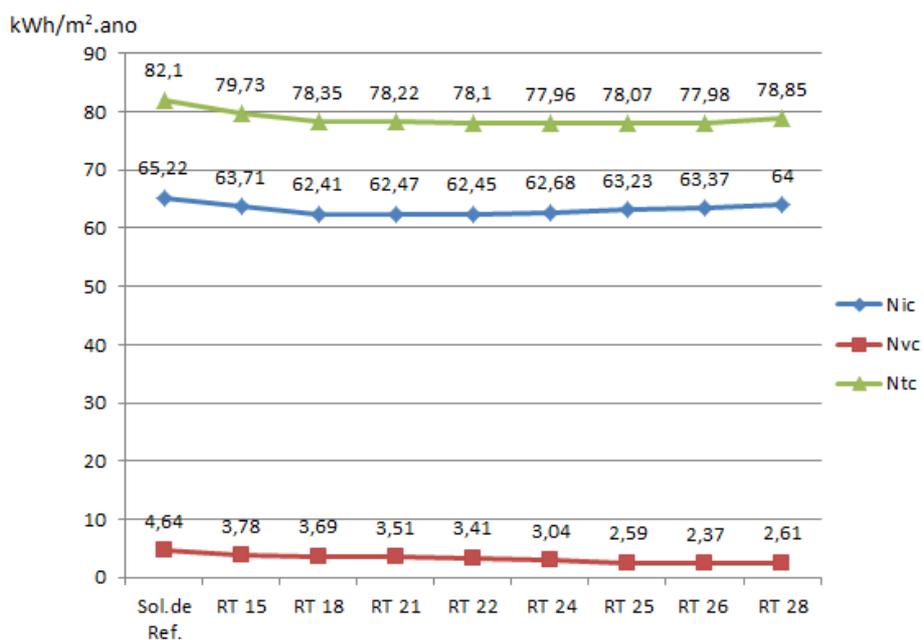


Figura 28: Necessidades energéticas de diferentes PCMs aplicados nas paredes exteriores do edifício em estudo localizado na cidade do Porto

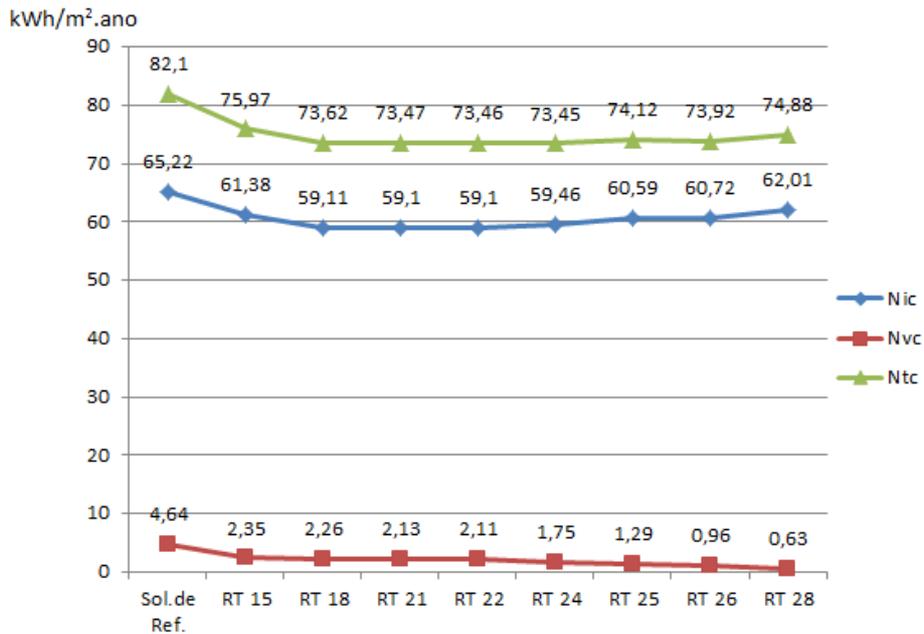


Figura 29: Necessidades energéticas do edifício em estudo situado na cidade do Porto, com PCMs na cobertura e nas paredes exteriores

Através dos dados apresentados nas Figuras 27 a 29 conclui-se que a implementação dos PCMs permite reduzir as necessidades energéticas do edifício de referência.

No edifício com PCMs apenas na cobertura o PCM que obteve melhores resultados nas necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento foi o PCM RT22, reduzindo 6,39% em relação ao edifício sem PCMs.

Quando comparado com os gráficos da Figura 27 e 28 (PCMs na cobertura e nas paredes exteriores) conclui-se que se obtém melhores resultados com os PCMs na cobertura do que nas paredes exteriores. Isto deve-se possivelmente ao facto de na cobertura existir uma área maior de PCMs do que nas paredes exteriores.

Nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento no edifício apenas com PCMs nas paredes exteriores o PCM que obteve melhores resultados foi o RT26, reduzindo cerca de 48,92% das necessidades energéticas de arrefecimento em relação ao edifício de referência sem PCMs.

De modo a compreender-se as potencialidades dos PCMs estudou-se a utilização deste material em toda a envolvente exterior opaca do edifício. Comparando o edifício em estudo com apenas PCMs numa zona, ou seja, nas paredes exteriores ou na cobertura, conclui-se que a colocação de PCMs na cobertura e na parede exterior é a solução mais vantajosa (do ponto de vista da diminuição das necessidades energéticas). É neste caso que se obtém uma maior redução das necessidades energéticas.

Nas necessidades nominais anuais globais de energia primária no edifício com PCMs na envolvente exterior opaca observou-se que o PCM que melhor se comporta é o RT24, reduzindo aproximadamente 10,54% das necessidades em relação à solução do edifício sem PCM.

De um modo geral os PCMs obtêm uma maior redução percentual nas necessidades de energia útil de arrefecimento em relação ao edifício de referência. Apesar de se verificarem grandes reduções percentuais nas necessidades de arrefecimento a poupança energética final correspondente não é elevada, porque o seu valor absoluto é baixo.

Na Tabela 39 apresenta a redução das necessidades energéticas do edifício com os PCMs que obtiveram melhores desempenhos em relação ao edifício de referência sem PCMs.

Tabela 39: Redução das necessidades energéticas do edifício com os PCMs que obtiveram melhores desempenhos em relação ao edifício de referência sem PCMs

	Redução das necessidades energéticas (%)		
	PCMs - paredes exteriores	PCM - cobertura	PCM - cobertura + paredes exteriores
Nic	4,31% (RT18)	6,39 % (RT22)	9,38% (RT21 e RT22)
Nvc	48,92% (RT26)	71,77 % (RT28)	86,42% (RT28)
Ntc	5,04% (RT24)	7,21 % (RT22)	10,54% (RT24)

Numa fase posterior serão testados os PCMs com melhor comportamento nas diferentes zonas. O critério utilizado para a seleção destes PCMs foi:

- O material que conduzisse a menores necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento seria colocado na cobertura
- O PCM que conduzisse a menores necessidades anuais de energia útil para arrefecimento seria aplicado nas paredes exteriores.

Desta forma obter-se-á uma solução otimizada com dois tipos de PCMs diferentes. Um será simulado nas paredes exteriores e outro na cobertura.

Como no Norte de Portugal, geralmente, as necessidades de aquecimento são superiores às de arrefecimento, optou-se por colocar os PCMs com melhor comportamento nesta estação na zona que tivesse maior área de implementação.

Em suma, os PCMs que melhor se comportam ou que obtêm melhores resultados num edifício localizado na zona do Porto foram: PCM RT 26 (arrefecimento) aplicado nas paredes exteriores e PCM RT 22 (aquecimento) aplicado na cobertura.

4.1.2 Porto – Climatização durante o período de ocupação

Neste subcapítulo foi estudado para a cidade do Porto um edifício climatizado apenas quando o edifício se encontra ocupado. Através deste estudo e do subcapítulo anterior consegue-se entender melhor como funciona o comportamento do edifício com diferentes períodos de climatização e com a implementação de PCMs.

As necessidades energéticas do caso de estudo com a aplicação de diferentes PCMs na cobertura, paredes exteriores e com PCMs aplicados nas duas zonas são representados nas Figuras 30 a 32.

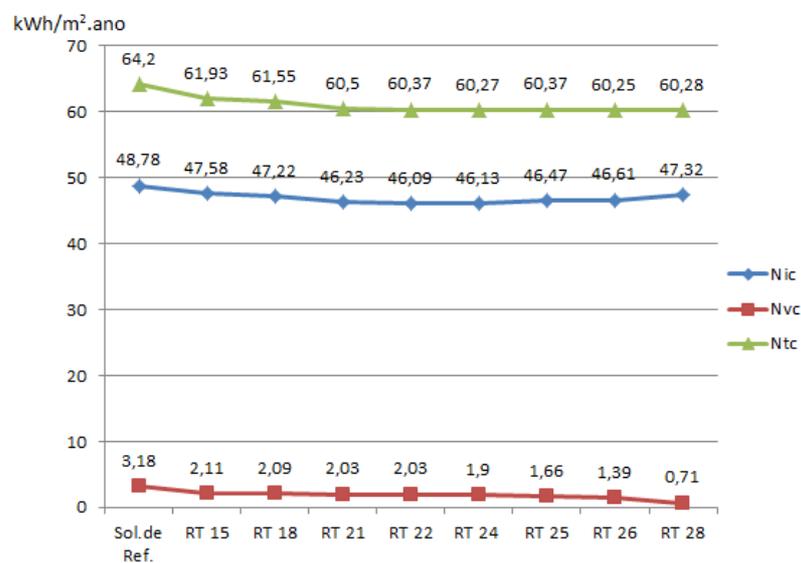


Figura 30: Necessidade energética do caso de estudo com a aplicação de diferentes PCMs na cobertura num edifício localizado na cidade do Porto

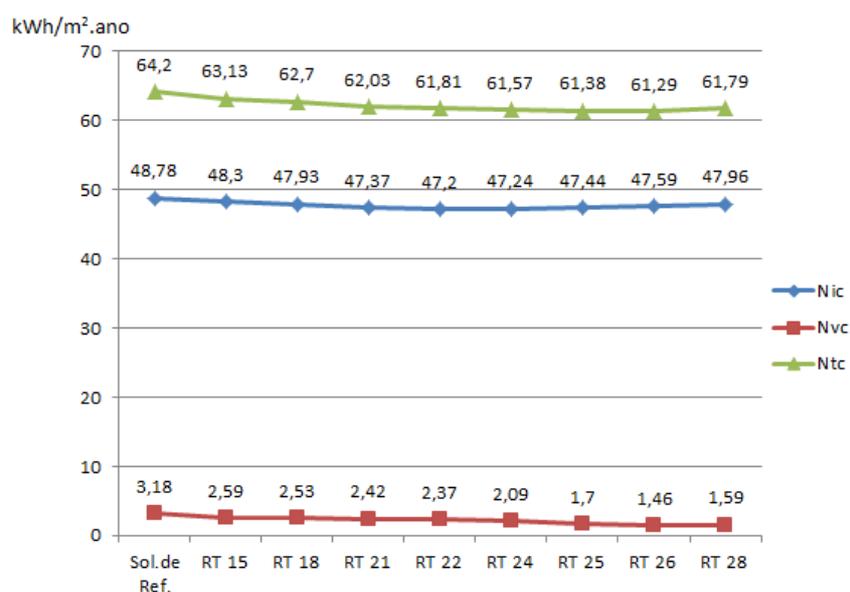


Figura 31: Necessidade energética do caso de estudo com a aplicação de diferentes PCMs nas paredes exteriores num edifício localizado na cidade do Porto

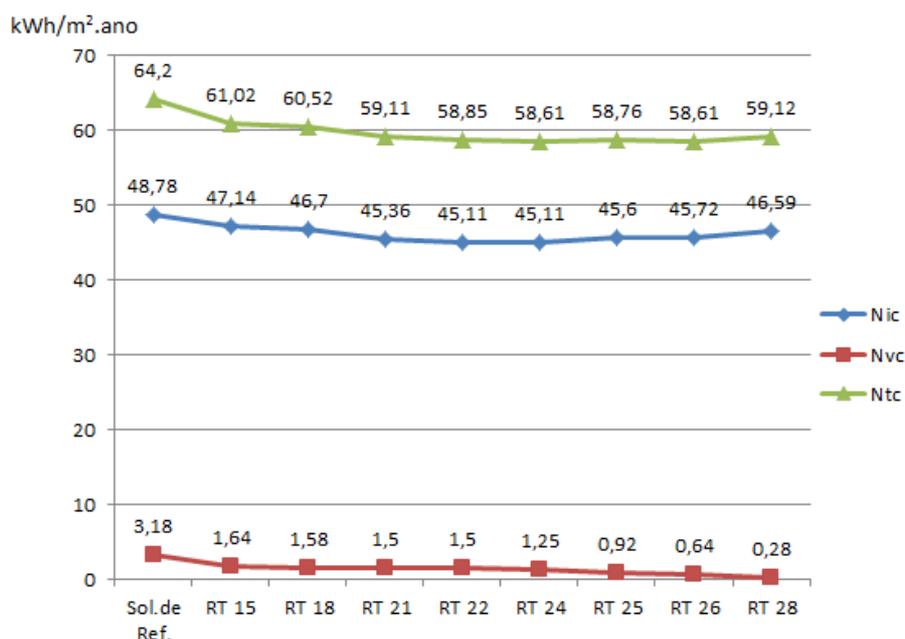


Figura 32: Necessidades energéticas do edifício em estudo situado na cidade do Porto com a aplicação de PCMs nas paredes exteriores e na cobertura

No edifício em estudo apenas com climatização durante a ocupação e localizado na cidade do Porto, com PCMs apenas na cobertura, o PCM que obteve os melhores resultados nas necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento foi o RT 22, reduzindo aproximadamente 5,52% das necessidades em relação ao edifício sem PCMs.

Com a análise da Figura 30 e 32, conclui-se que para a situação em estudo, obtiveram-se melhores resultados relativos às necessidades de arrefecimento quanto maior o ponto de fusão do PCM.

Os PCMs apresentam melhores resultados quando são aplicados na cobertura do que quando são aplicados nas paredes exteriores. Tal como referido anteriormente, este facto poderá estar relacionado com a diferença de área entre ambas as superfícies.

Nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento num edifício com PCMs incorporados na envolvente do edifício o PCM que obteve melhores resultados foi o RT 28, reduzindo 91,19% das necessidades em relação ao edifício sem PCMs, apresentando necessidades energéticas para arrefecimento quase nulas.

Verificou-se uma redução de 4,53% com o PCM RT26 das necessidades nominais anuais globais de energia primária de um edifício com PCMs localizados nas paredes exteriores comparado com um edifício sem PCMs.

A Tabela 40 apresenta a redução das necessidades energéticas do edifício localizado no Porto (climatização durante o período de ocupação) com os PCMs que obtiveram melhores desempenhos em relação ao edifício de referência sem PCMs.

Tabela 40: Redução das necessidades energéticas do edifício localizado no Porto (climatização durante o período de ocupação) com os PCMs que obtiveram melhores desempenhos em relação ao edifício de referência sem PCMs

	Redução das necessidades energéticas (%)		
	PCMs - paredes exteriores	PCM - cobertura	PCM - cobertura + paredes exteriores
Nic	3,24% (RT22)	5,52% (RT22)	7,52% (RT22 e RT24)
Nvc	54,09% (RT26)	77,67% (RT28)	91,19% (RT28)
Ntc	4,53% (RT26)	6,15% (RT26)	8,71% (RT26)

Os PCMs que permitiram obter melhores resultados no edifício em estudo apenas com climatização durante a ocupação e localizado na cidade do Porto são: PCM RT 26 aplicado nas paredes exteriores e PCM RT 22 aplicado na cobertura.

Após as simulações do edifício com climatização durante o período de ocupação e com climatização durante todas as horas do ano, concluiu-se que os PCMs que melhor se comportam nas duas situações são os mesmos.

As restantes simulações foram efetuadas considerando que a climatização ativa durante todas as horas do ano.

4.1.3 Bragança

As Figuras 33 a 35 demonstram as necessidades energéticas de diferentes PCMs aplicados na cobertura, paredes exteriores e aplicados nas duas zonas do edifício em estudo localizado na cidade de Bragança.

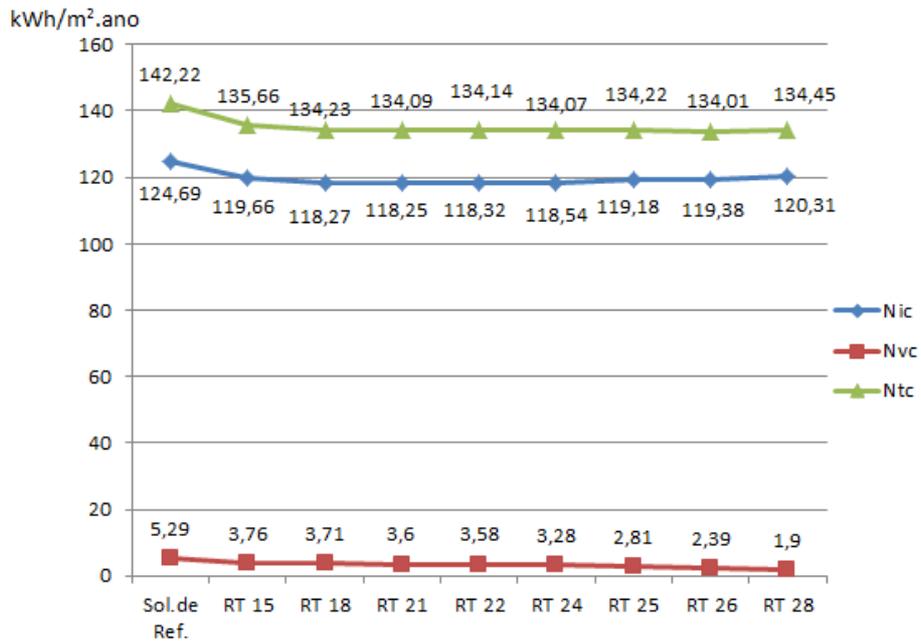


Figura 33: A necessidade energética do caso de estudo com a aplicação de diferentes PCMs na cobertura num edifício localizado na cidade de Bragança

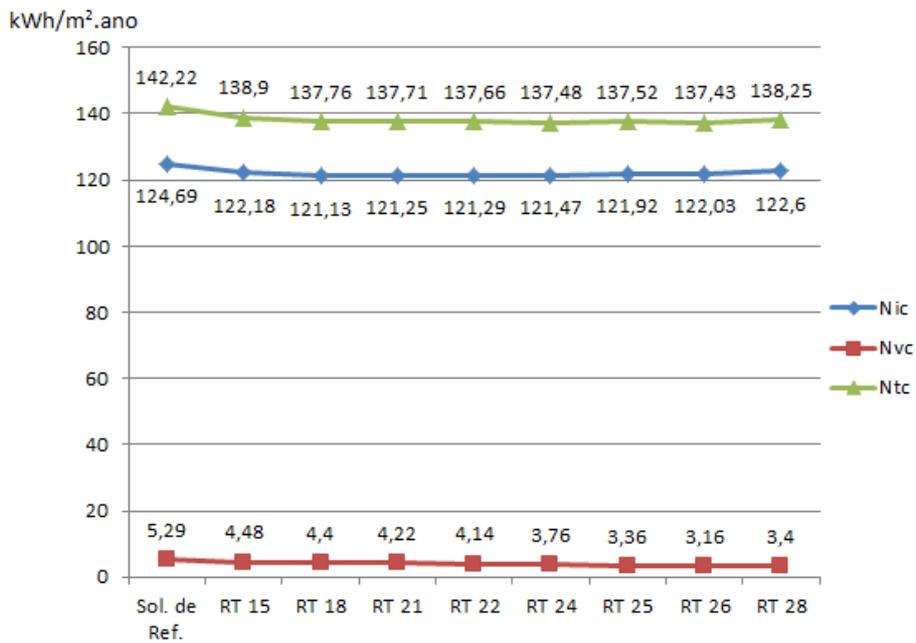


Figura 34: Necessidades energéticas de diferentes PCMs aplicados nas paredes exteriores do edifício em estudo localizado na cidade de Bragança

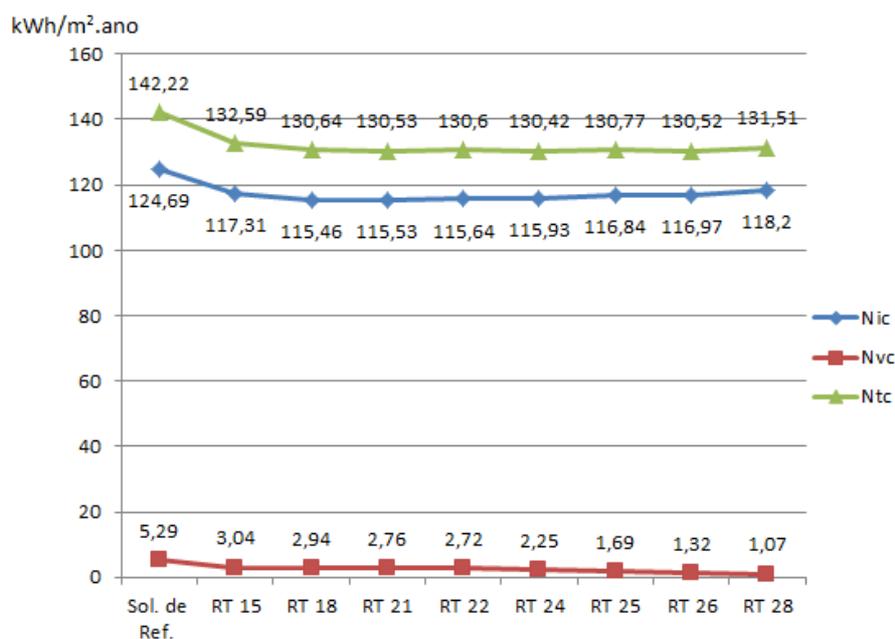


Figura 35: Necessidades energéticas do edifício em estudo situado na cidade de Bragança, com PCMs na cobertura e nas paredes exteriores

A Tabela 41 representa a redução das necessidades energéticas do edifício com PCMs (PCMs que obtiverem melhor desempenho) comparado com o edifício sem PCMs no edifício localizado na cidade de Bragança.

Tabela 41: Redução das necessidades energéticas do edifício com PCMs (PCMs que obtiveram melhor desempenho) comparado com o edifício sem PCMs no edifício localizado na cidade de Bragança

	Redução das necessidades energéticas								
	PCM- paredes exteriores			PCM- cobertura			PCM- cobertura +paredes exteriores		
	%	kWh/m ² .ano	PCM	%	kWh/m ² .ano	PCM	%	kWh/m ² .ano	PCM
Nic	2,86	3,56	RT18	5,16	6,44	RT21	7,40	9,23	RT18
Nvc	40,26	2,13	RT26	64,08	3,39	RT28	79,77	4,22	RT28
Ntc	3,37	4,79	RT26	5,77	8,21	RT26	8,30	11,80	RT24

Nas necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento o PCM que obteve melhores resultados num edifício com PCMs localizados na cobertura na cidade de Bragança foi o PCM RT 21, reduzindo 6,44 kWh/m².ano das necessidades em relação ao edifício sem PCMs.

Num edifício localizado na cidade de Bragança com PCMs aplicados nas paredes exteriores obteve-se uma redução de 2,13 kWh/m².ano nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento comparado com o edifício sem PCMs.

O edifício com PCMs obtém melhores resultados nas necessidades energéticas para arrefecimento do que para aquecimento. A diferença nas necessidades energéticas para arrefecimento entre o edifício com e sem PCM resultam da absorção de calor do PCM. Como este absorve energia durante o dia, diminui as temperaturas interiores, sendo necessário menos energia para arrefecimento.

Nas necessidades nominais anuais globais de energia primária observou-se que o PCM que melhor se comporta num edifício com PCMs nas paredes exteriores e na cobertura é o PCM RT 24, reduzindo 11,8 kWh/m².ano das necessidades em relação à solução do edifício sem PCM.

Através dos dados da Tabela 41 conclui-se que apesar do edifício obter uma maior redução percentual das necessidades de arrefecimento num edifício com aplicação de PCMs este não tem uma maior redução em valor absoluto (kWh/m².ano). Ou seja, apesar de ter uma maior redução percentual nessas necessidades esta não vai ser traduzida em grandes poupanças.

Numa fase posterior serão testados os melhores PCMs nas diferentes zonas, logo, os PCMs que melhor se comportam ou que obtêm melhores resultados num edifício localizado na cidade de Bragança são: PCM RT 26 aplicado nas paredes exteriores e PCM RT 21 aplicado na cobertura.

4.1.4 Montalegre

Nas Figuras 36 a 38 são apresentadas as necessidades energéticas do caso de estudo com a aplicação de diferentes PCMs na cobertura, paredes exteriores e com PCMs na cobertura e parede exterior num edifício localizado em Montalegre.

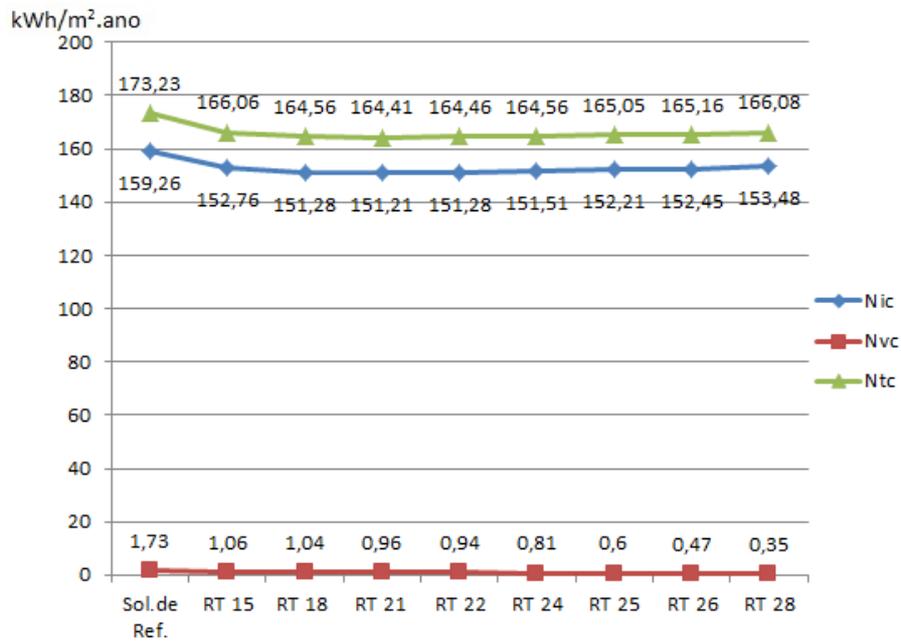


Figura 36: Necessidades energéticas de um edifício localizado em Montalegre com a implementação de diferentes PCMs na cobertura

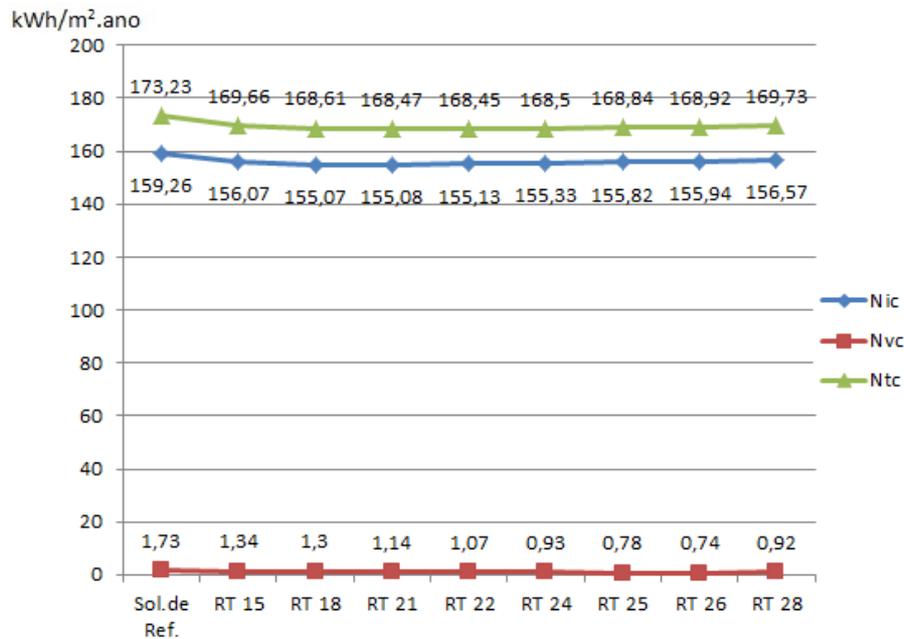


Figura 37: Necessidades energéticas de vários PCMs aplicados nas paredes exteriores do edifício em estudo localizado em Montalegre

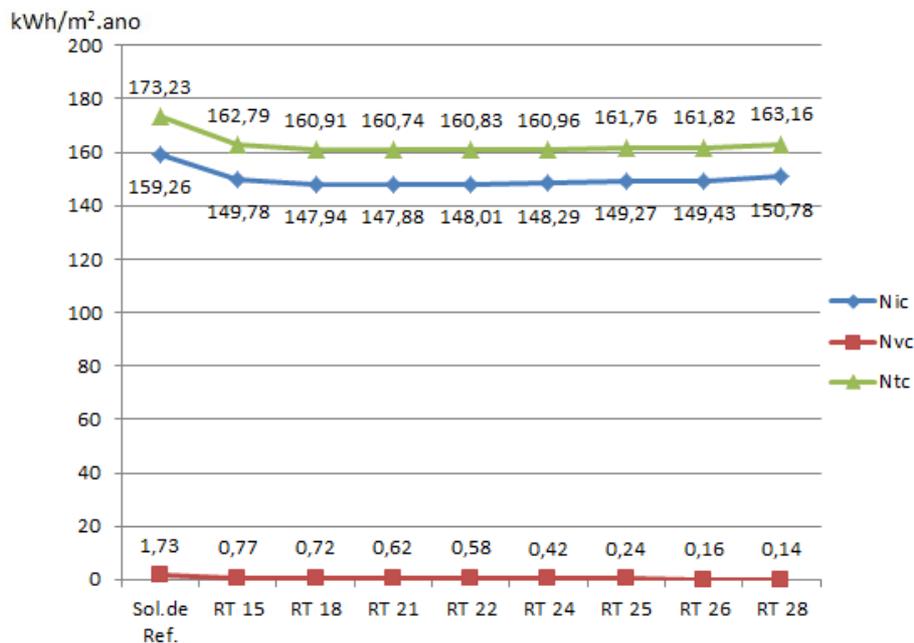


Figura 38: Necessidades energéticas do edifício em estudo localizado em Montalegre com PMCs nas paredes exteriores e cobertura

A Tabela 42 representa a redução das necessidades energéticas do edifício com PMCs (PCMs que obtiverem melhor desempenho) comparado com o edifício sem PMCs localizado na cidade de Montalegre.

Tabela 42: Redução das necessidades energéticas do edifício com PMCs (PCMs que obtiverem melhor desempenho) comparado com o edifício sem PMCs no edifício localizado na cidade de Montalegre

	Redução das necessidades energéticas								
	PCM - paredes exteriores			PCM - cobertura			PCM – cobertura + paredes exteriores		
	%	kWh/m ² .ano	PCM	%	kWh/m ² .ano	PCM	%	kWh/m ² .ano	PCM
Nic	2,63	4,19	RT 18	5,05	8,05	RT 21	7,15	11,38	RT 21
Nvc	57,23	0,99	RT 26	79,77	1,38	RT 28	91,91	1,59	RT 28
Ntc	2,76	4,78	RT 22	5,09	8,82	RT 21	7,21	12,49	RT 21

No edifício em estudo localizado na cidade de Montalegre com a aplicação de PMCs nas paredes exteriores obtém-se uma redução nas necessidades nominais anuais globais de energia primária de 2,76% em relação ao edifício de referência sem PMCs reduzindo 4,78 kWh/m².ano com aplicação do PCM RT 22.

Dos oito PMCs em estudo, o PCM que obteve melhor desempenho nas necessidades nominais anuais globais de energia primária num edifício com PMCs localizados na cobertura foi o PCM RT 21, diminuindo 5,09% as necessidades comparando com o edifício de referência sem PMCs, sendo uma redução de 8,82 kWh/m².ano.

Nas necessidades nominais anuais globais de energia primária num edifício em Montalegre com PCMs localizado nas paredes exteriores e na cobertura observou-se que o PCM que melhor se comporta é o RT 21, reduzindo 7,21% as necessidades nominais anuais globais de energia primária em relação à solução do edifício sem PCM, o que corresponde a uma redução de 12,49 kWh/m².ano.

Como já referido anteriormente, o PCM apresenta melhores potencialidades quando aplicado nas duas zonas do que quando este é aplicado apenas numa zona.

Os PCMs testados numa fase posterior serão os melhores PCMs das diferentes zonas (cobertura e parede exterior). Portanto, os PCMs que melhor se comportam ou que obtêm melhores resultados no edifício em estudo localizado na zona de Montalegre são: PCM RT 26 aplicado nas paredes exteriores e PCM RT 21 aplicado na cobertura.

4.1.5 Vila Real

Nas Figuras 39 a 41 são apresentadas as necessidades energéticas do edifício de estudo situado em Vila Real com PCMs nas paredes exteriores, cobertura e nas duas zonas.

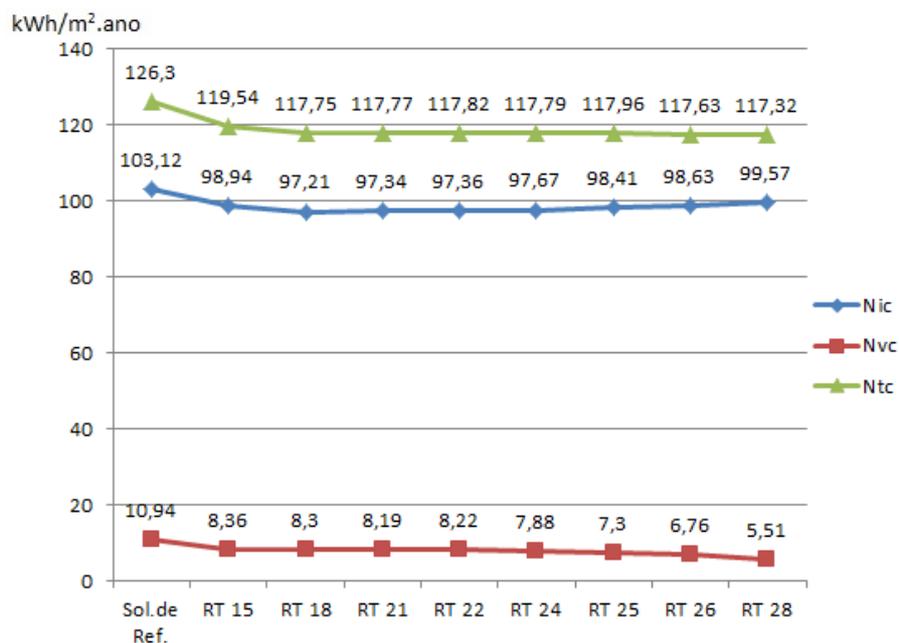


Figura 39: Necessidades energéticas do edifício em estudo com a aplicação de diferentes PCMs na cobertura num edifício localizado na cidade de Vila Real

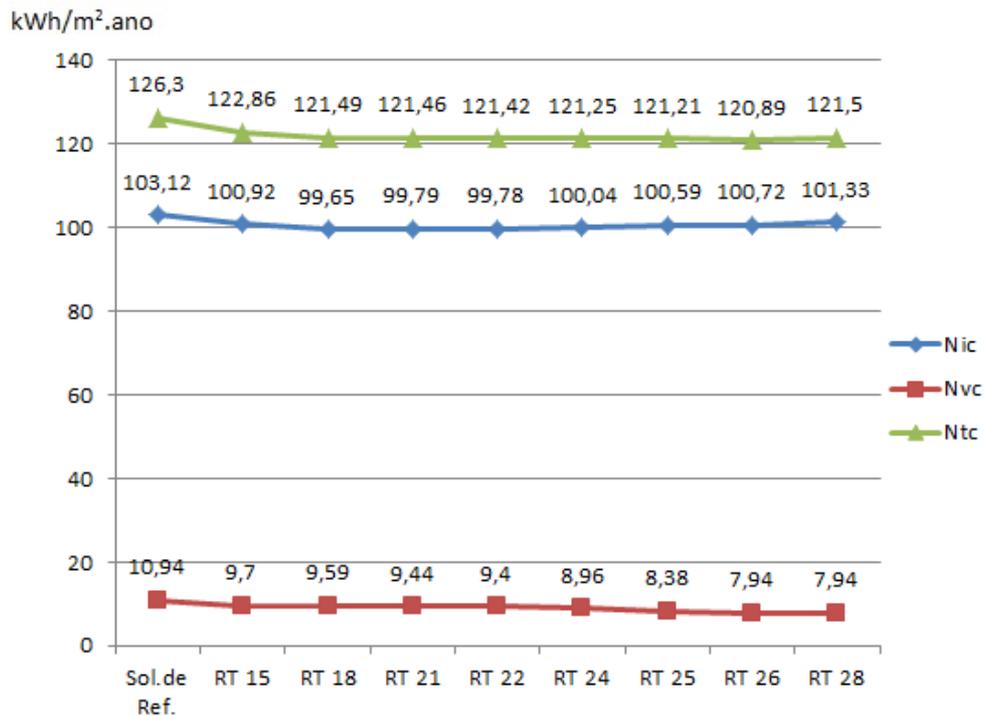


Figura 40: Necessidades energéticas do edifício em estudo com a aplicação de diferentes PCMs nas paredes exteriores num edifício localizado na cidade de Vila Real

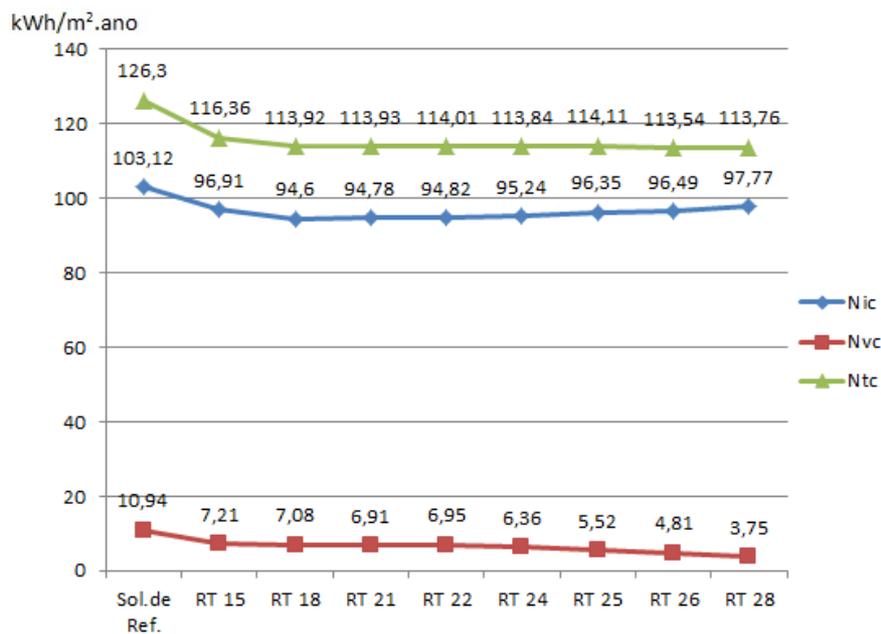


Figura 41: Necessidades energéticas do edifício em estudo situado na cidade de Bragança, com PCMs na cobertura e nas paredes exteriores

Através dos gráficos da primeira fase de simulação para todas as zonas, verifica-se que a tendência de diminuição ou aumento das necessidades de aquecimento é semelhante nas quatro zonas de estudo. Ou seja, a partir da solução de referência, as necessidades de aquecimento diminuem quando se aplica o PCM RT 15 e vão diminuindo até a um PCM que

está entre o PCM RT 15 e o PCM RT 22 começando posteriormente a aumentar novamente. A função que se obtém pela união dos pontos é uma espécie de parábola com a concavidade voltada para cima. Como seria de esperar o ponto de fusão do PCM com melhor comportamento está próximo da temperatura de conforto de Inverno dependendo sempre das temperaturas médias exteriores de zona.

Verificou-se também em todas as zonas de estudo que o PCM que obtém uma maior redução das necessidades de arrefecimento foi o RT26. Apesar de os PCMs que conduzem aos melhores resultados serem diferentes nas necessidades de aquecimento, o comportamento do edifício com a implementação dos PCMs é semelhante nas quatro zonas de estudo.

Tal como foi referido anteriormente conclui-se que a colocação de PCMs na cobertura e na parede exterior é a solução mais vantajosa, sendo neste caso onde se obtém uma maior redução das necessidades energéticas.

Os PCMs da solução otimizada de Vila Real utilizados numa fase posterior de simulação são: PCM RT 26 aplicado nas paredes exteriores e o PCM RT 18 aplicado na cobertura.

4.1.6 Soluções otimizadas

Após o estudo dos vários tipos de PCMs em diferentes zonas, identificaram-se quais os PCMs que melhor se comportam para cada zona. Os PCMs que melhor se comportam para as quatro zonas em estudo são os que se encontram na Tabela 43.

Tabela 43: Os PCMs que melhor se comportam para as quatro zonas em estudo na primeira fase de simulações

Localização	Paredes Exteriores	Cobertura
Bragança	RT 26	RT 21
Montalegre	RT 26	RT 21
Porto	RT 26	RT 22
Vila Real	RT 26	RT 18

Verifica-se que o PCM que obtém melhores resultados em todas as zonas nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento é o PCM RT 26. Enquanto nas necessidades nominais para aquecimento, os PCMs que obtiveram melhores resultados variam conforme a realidade.

Posteriormente estudou-se a aplicação destes materiais no edifício em estudo.

Na Figura 42 são apresentados os resultados obtidos através da aplicação dos PCMs que melhor se comportam nas quatro zonas em estudo.

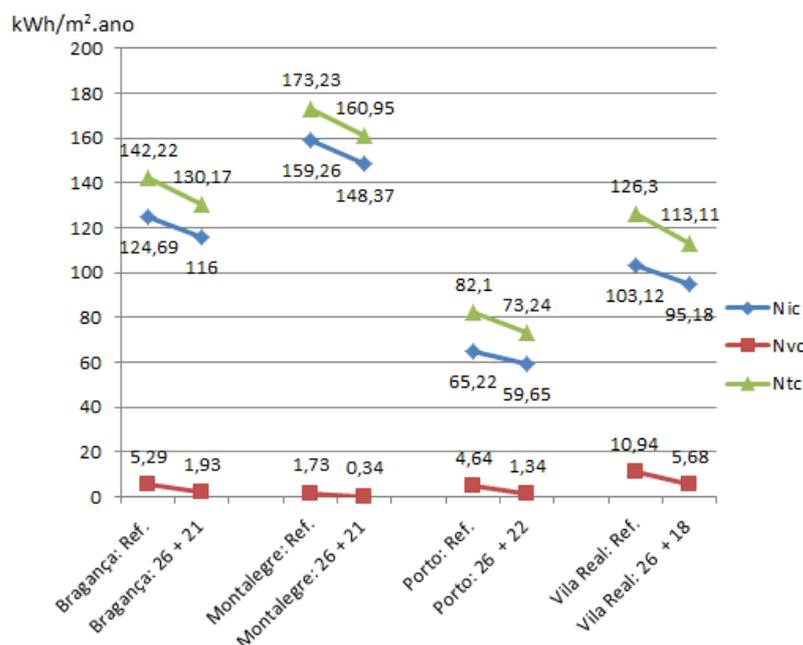


Figura 42: Resultados obtidos dos melhores PCM's nas quatro zonas em estudo

A Tabela 44 mostra a redução das necessidades energéticas do edifício com os PCM's com melhor desempenho comparado com o edifício de referência nas quatro zonas de estudo.

Tabela 44: Redução das necessidades energéticas do edifício com os melhores PCM's comparado com o edifício de referência nas quatro zonas de estudo

	Redução das necessidades energéticas					
	Nic		Nvc		Ntc	
	%	kWh/m ² .ano	%	kWh/m ² .ano	%	kWh/m ² .ano
Bragança	6,97	8,69	63,52	3,36	8,47	12,05
Montalegre	6,84	10,89	80,35	1,39	7,09	12,28
Porto	8,54	5,57	71,12	3,30	10,79	8,86
Vila Real	7,70	7,94	48,08	5,26	10,44	13,19

Através do gráfico da Figura 42 e da Tabela 44, conclui-se que a aplicação dos materiais de mudança de fase demonstra ter bom potencial de poupança energética nas diferentes zonas de aplicação.

A zona que obteve uma maior redução das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento foi Montalegre e o Porto foi a zona que obteve menores reduções. Isto deve-se ao facto de a temperatura média no Inverno na zona do Porto ser a mais alta temperatura e a zona de Montalegre ter a temperatura mais baixa em relação às zonas de estudo.

Com os dados obtidos conclui-se que Vila Real foi a zona que obteve uma maior redução das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento em relação as restantes. Por outro lado, a cidade do Montalegre é a zona que tem a pior redução das necessidades

nominais anuais de energia útil para arrefecimento. Isto deve-se ao facto de Vila Real ter uma temperatura média no verão mais alta que as restantes zonas e Montalegre ter a temperatura mais baixa.

Nas necessidades nominais anuais globais de energia primária a zona que obtém maiores poupanças energéticas, é a zona de Vila Real e a zona que teve resultados inferiores comparado com as restantes zonas foi a cidade do Porto.

4.2 Segunda Fase

Na segunda fase analisou-se a influência do elemento de suporte, ou seja, qual a solução construtiva que potencia os benefícios dos PCMs.

Nesta fase analisou-se o caso de estudo localizado no Porto com implementação da solução otimizada identificada anteriormente.

A Figura 43 apresenta os resultados das diferentes soluções construtivas com PCMs.

De modo a compreender a condutibilidade térmica do elemento de suporte da camada de PCM, no desempenho térmico da solução, tal como anteriormente exposto foram analisadas as seguintes soluções construtivas:

- PCM em contato direto (eliminação do gesso cartonado);
- Parede exterior e cobertura revestida com uma chapa metálica;
- Substituição do gesso cartonado por uma chapa metálica de 1 mm e adição de uma caixa-de-ar com 0,03 m entre o tijolo furado e o PCM nas paredes exteriores;
- Adição de uma caixa-de-ar com 0,03m entre o tijolo furado e o PCM nas paredes exteriores.

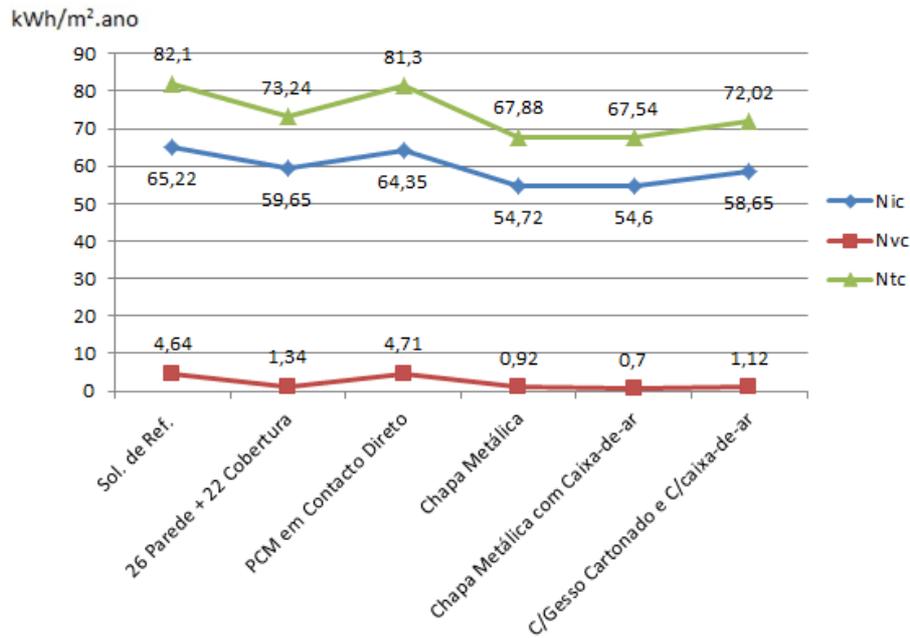


Figura 43: Necessidades energéticas das diferentes soluções construtivas analisadas na segunda fase de simulação no edifício localizado na cidade do Porto

A Tabela 45 apresenta a redução ou aumento das necessidades energéticas das diferentes soluções construtivas em relação ao edifício de referência sem PCMs.

Tabela 45: Redução ou aumento das necessidades energéticas das diferentes soluções construtivas em relação ao edifício de referência sem PCMs

	Redução ou aumento das necessidades energéticas					
	%	Nic kWh/m ² .ano	%	Nvc kWh/m ² .ano	%	Ntc kWh/m ² .ano
RT26 Parede + RT 22 Cobertura	- 8,54	- 5,57	- 71,12	- 3,30	- 10,79	- 8,86
PCM em contacto direto	-1,33	- 0,87	+ 1,51	+ 0,07	- 0,97	- 0,80
Chapa Metálica	- 16,10	- 10,50	- 80,17	- 3,72	- 17,32	- 14,22
Chapa Metálica + caixa-de-ar	- 16,28	- 10,62	- 84,91	- 3,94	- 17,73	- 14,56
Gesso cartonado + caixa-de-ar	- 10,07	- 6,57	- 75,86	- 3,52	- 12,28	- 10,08

A solução que permitiu obter melhores resultados foi a que tinha caixa-de-ar nas paredes exteriores e na cobertura revestidas com uma chapa metálica. A utilização desta solução reduziu as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento em 16,28% comparando com o edifício de referência sem PCMs. Nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento esta tecnologia reduziu 84,91% comparado com o edifício de referência sem PCMs. A utilização desta tecnologia permitiu reduzir 17,73% nas necessidades nominais anuais globais de energia primária, comparando com o edifício de referência sem PCM. Possivelmente, esta solução apresentou melhores resultados em relação às outras,

porque o uso de uma chapa metálica permite uma diminuição das necessidades energéticas devido à elevada condutibilidade térmica da chapa metálica e o uso de caixa-de-ar permite melhor o coeficiente de transmissão térmica (U) da solução construtiva.

A solução construtiva em que o PCM está em contacto direto é a que apresenta menores vantagens em relação à solução de referência com PCMs. A justificação para tal poderá estar no facto de ao retirar um elemento da solução (revestimento exterior) o U das soluções aumenta, o que faz com que os resultados piorem. O principal objetivo de se ter considerado esta solução era analisar se a presença de um elemento de suporte influencia o armazenamento de energia do PCM. Os resultados obtidos por simulação dinâmica demonstraram que não. Contudo, de modo a compreender melhor esta solução seria necessário realizar uma análise experimental.

A solução construtiva revestida com chapa metálica apresenta melhor desempenho energético em relação à solução de referência com PCMs, provavelmente devido à elevada condutibilidade térmica da chapa metálica.

Entre a solução com chapa metálica e a solução com chapa metálica e caixa-de-ar há uma melhoria devido ao facto de a caixa-de-ar permitir melhorar o U da solução construtiva. Esta melhoria também se verifica provavelmente pelos mesmos motivos entre a solução de referência com PCMs e a solução com caixa-de-ar.

Apesar da solução com caixa-de-ar nas paredes exteriores e na cobertura revestidas com chapa metálica ter obtido os melhores resultados não é a solução mais adequada para uma situação real, por não ser esteticamente/ arquitetonicamente apelativa. Por este motivo a solução que se irá utilizar na terceira fase será com as paredes exteriores e a cobertura com caixa-de-ar e gesso cartonado.

Assim, a solução que se irá utilizar na terceira fase de simulação é a solução com caixa-de-ar e gesso cartonado nas paredes exteriores e na cobertura.

Em suma, através desta análise foi possível tirar conclusões em relação a influência do suporte e a sua localização. Numa terceira fase será estudada para cada zona a solução construtiva apresentada na Tabela 46, aplicada na envolvente do edifício.

Tabela 46: Solução construtiva da envolvente do edifício estudada na terceira fase de simulações

	Materiais	Espessuras (m)
Paredes Exteriores	Reboco (Exterior)	0,02
	Tijolo Furado	0,22
	Caixa-de-ar	0,03
	PCM	0,015
	Gesso Cartonado (Interior)	0,012
Cobertura	Betonilha (Exterior)	0,04
	Bloco de Aligeiramento	0,15
	Caixa-de-ar	0,04
	PCM	0,015
	Gesso Cartonado (Interior)	0,012

4.3 Terceira Fase

Na terceira fase estudaram-se as soluções otimizadas para cada zona de estudo com a solução de suporte obtido na fase anterior.

Tendo em vista a análise económica que será posteriormente apresentada, foram também analisadas nesta fase as duas soluções seguintes:

- PCMs aplicados apenas na cobertura e na parede exterior orientada a Sul;
- PCMs aplicados apenas na cobertura e nas paredes exteriores orientadas a Sul, Este e Oeste.

4.3.1 Bragança

Na primeira fase de simulação conclui-se que os PCMs que obtêm melhores resultados num edifício localizado em Bragança são: o RT26 nas paredes exteriores e o RT21 na cobertura. Numa segunda fase estudou-se qual o melhor suporte com os PCMs. Nesta fase será estudado o melhor PCM obtido na primeira fase com a solução de suporte mais adequada. A Figura 44, apresenta os resultados obtidos das diferentes simulações.

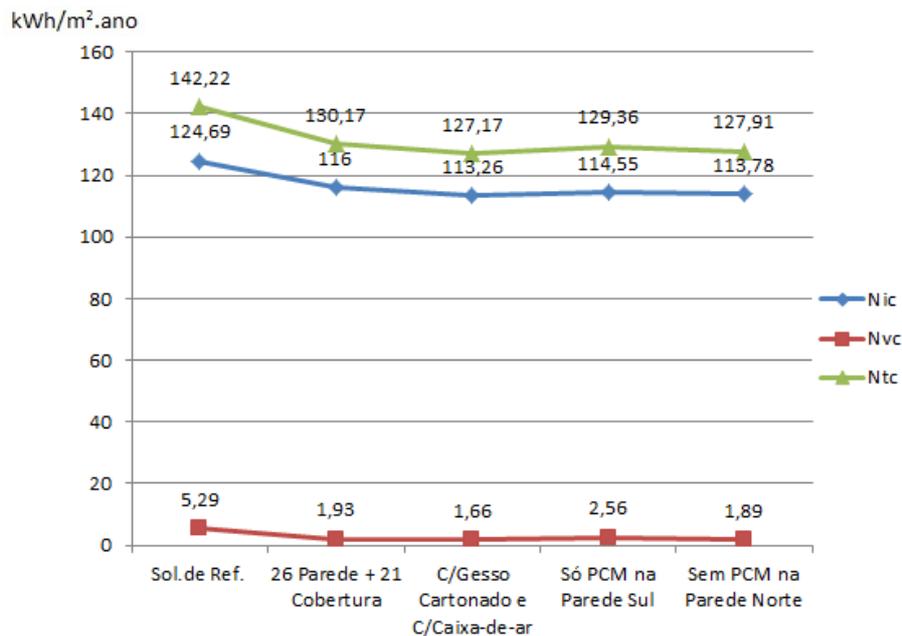


Figura 44: Resultados obtidos da terceira fase de simulações do edifício de estudo localizado na zona de Bragança

Com a análise da Figura 44, conclui-se que a solução otimizada com PCMs no edifício de estudo localizado em Bragança reduz as necessidades energéticas e mesmo o edifício com apenas PCMs na cobertura e na parede Sul apresentam vantagens.

A Tabela 47 apresenta a redução das necessidades energéticas das simulações efetuadas em relação ao edifício de referência sem PCMs.

Tabela 47: Redução das necessidades energéticas das simulações efetuadas em relação ao edifício de referência sem PCMs

	Redução das necessidades energéticas					
	%	Nic kWh/m ² .ano	%	Nvc kWh/m ² .ano	%	Ntc kWh/m ² .ano
RT26 Parede + RT 21 cobertura	6,97	8,69	63,52	3,36	8,47	12,05
Gesso cartonado + caixa-de-ar	9,17	11,43	68,62	3,63	10,58	15,05
PCM na parede Sul e na cobertura	8,13	10,14	51,61	2,73	9,04	12,86
Sem PCM na parede Norte	8,75	10,91	64,27	3,4	10,06	14,31

Através dos dados conclui-se que o edifício com a solução otimizada obtém uma redução de 11,43 kWh/m².ano nas necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento comparando com o edifício de referência sem PCMs.

Nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento observou-se que o edifício com a solução otimizada obteve uma redução de 68,62% das necessidades em relação ao edifício de referência sem PCMs.

O edifício com a solução otimizada comparando com o edifício de referência sem PCMs nas necessidades nominais anuais globais de energia primária obteve uma redução de 15,05 kWh/m².ano.

O edifício em estudo localizado na cidade de Bragança com a aplicação da solução otimizada obteve maiores poupanças energéticas nas necessidades energéticas de aquecimento do que nas de arrefecimento.

Observou-se também a adoção da solução de suporte identificada na fase 2 permite reduzir as necessidades energéticas em relação à solução com os melhores PCMSs sem esse suporte. Esta melhoria deve-se, possivelmente, ao facto de a caixa-de-ar permitir melhorar o U da solução construtiva.

A solução otimizada com PCMs apenas na parede exterior localizada a Sul e na cobertura, comparando com o edifício de referência sem PCMs, permitiu verificar o seguinte:

- Uma redução de 8,13% nas necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento;
- Nas necessidades nominais de energia útil para arrefecimento obteve uma redução aproximada de 51,61%;
- Uma redução de 9,04% nas necessidades nominais anuais globais de energia primária.

No que respeita à solução otimizada sem PCMs na parede exterior localizada a Norte, comparada com o edifício de referência sem PCMs, obteve-se as seguintes conclusões:

- Esta solução nas necessidades nominais anuais globais de energia útil para aquecimento obteve uma redução de 10,91 kWh/m².ano;
- Uma redução de 3,4 kWh/m².ano nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento;
- Nas necessidades nominais anuais globais de energia primária esta solução obteve uma redução de 14,31 kWh/m².ano.

Comparando os dados obtidos das necessidades energéticas das soluções usadas para otimizar PCMs conclui-se que a solução apenas sem PCMs na parede exterior localizada a Norte apresenta uma maior poupança energética do que a solução apenas com PCMs na parede exterior localizada a Sul e na cobertura. Isto deve-se ao facto de a solução sem PCMs na parede exterior localizada Norte ter uma maior área de PCMs.

4.3.2 Montalegre

Na Figura 45 apresentam-se os resultados obtidos na terceira fase de simulação para a cidade de Montalegre.

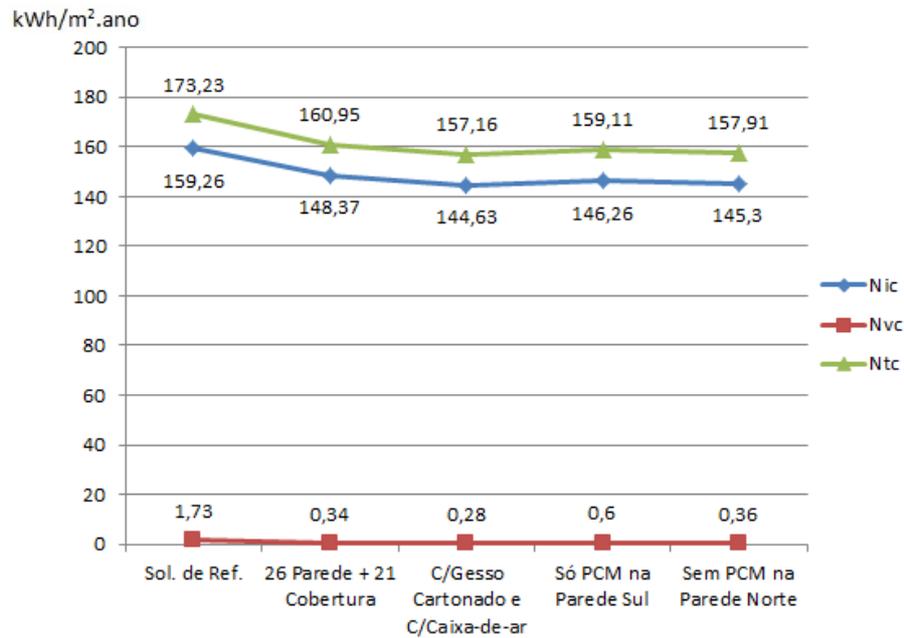


Figura 45: Necessidades energéticas das simulações efetuadas na terceira fase num edifício de estudo localizado na cidade de Montalegre

A Tabela 48 apresenta a redução das necessidades energéticas das simulações efetuadas em relação ao edifício de referência sem PCMs na terceira fase de simulações num edifício localizado na cidade de Montalegre.

Tabela 48: Redução das necessidades energéticas das simulações efetuadas em relação ao edifício de referência sem PCMs

	Redução das necessidades energéticas					
	Nhc		Nvc		Ntc	
	%	kWh/m².ano	%	kWh/m².ano	%	kWh/m².ano
RT26 Parede + RT 21 na cobertura	6,84	10,89	80,35	1,39	7,09	12,28
Com gesso cartonado + caixa-de-ar	9,19	14,63	83,82	1,45	9,28	16,07
PCM na parede Sul e na cobertura	8,16	13,00	65,32	1,13	8,15	14,12
Sem PCM na parede Norte	8,77	13,96	79,19	1,37	8,84	15,32

O edifício com a solução otimizada localizado na cidade de Montalegre comparado com o edifício de referência sem PCMs obteve as seguintes reduções das necessidades energéticas:

- 14,63 kWh/m².ano nas necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento;
- Nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento obteve uma redução de 1,45 kWh/m².ano;
- 16,07 kWh/m².ano nas necessidades nominais anuais globais de energia primária;

O edifício em estudo localizado na cidade de Montalegre com a aplicação da solução otimizadas obteve maiores poupanças energéticas nas necessidades energéticas de aquecimento do que nas necessidades energéticas de arrefecimento.

A solução construtiva escolhida na segunda fase de simulações com PCMs com apenas PCMs na parede exterior localizada a Sul e na cobertura, comparando com o edifício de referência sem PCMs, permitiu verificar o seguinte:

- Uma redução de 13 kWh/m².ano nas necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento;
- Nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento obteve uma redução de 1,13 kWh/m².ano;
- Uma redução de 14,12 kWh/m².ano nas necessidades nominais anuais globais de energia primária.

A solução otimizada sem PCMs na parede exterior localizada a Norte, comparada com o edifício de referência sem PCMs, obteve-se os seguintes conclusões:

- Esta solução nas necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento obteve uma redução de 13,96 kWh/m².ano;
- Uma redução de 1,37 kWh/m².ano nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento;
- Nas necessidades nominais anuais globais de energia primária obteve uma redução de 15,32 kWh/m².ano.

Comparando as soluções usadas para otimizar o uso de PCMs conclui-se que apesar de a solução sem PCMs na parede exterior localizada a Norte apresentar melhores resultados em relação à solução com PCMs apenas na parede exterior localizada a Sul e na cobertura, a solução com PCMs na parede exterior localizada a Sul e na cobertura apresenta mais vantagens. Uma vez que a vantagens das necessidades energéticas entre as soluções não é

muito elevada, em termos económicos esta solução poderá ser mais satisfatória, porque reduz uma elevada quantidade de PCMs.

4.3.3 Porto

Na Figura 46 apresentam-se os resultados obtidos para as diferentes simulações para a zona do Porto.

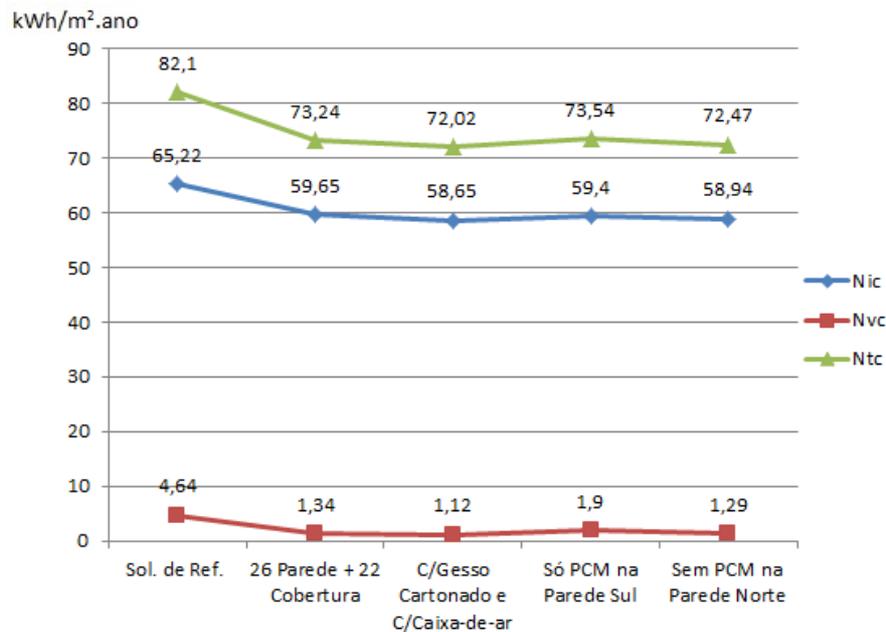


Figura 46: Resultados obtidos da terceira fase de simulações do edifício de estudo localizado na cidade do Porto

A redução das necessidades energéticas obtidas nas simulações efetuadas em relação ao edifício de referência sem PCMs na terceira fase de simulações num edifício localizado na cidade do Porto é apresentada na Tabela 49.

Tabela 49: Redução das necessidades energéticas das simulações efetuadas em relação ao edifício de referência sem PCMs na terceira fase de simulações num edifício localizado na cidade do Porto

	Redução das necessidades energéticas					
	Nic		Nvc		Ntc	
	%	kWh/m².ano	%	kWh/m².ano	%	kWh/m².ano
RT26 Parede + RT 22 cobertura	8,54	5,57	71,12	3,30	10,79	8,86
Gesso cartonado + caixa-de-ar	10,07	6,57	75,86	3,52	12,28	10,08
PCM na parede Sul e na cobertura	8,92	5,82	59,05	2,74	10,43	8,56
Sem PCM na parede Norte	9,63	6,28	72,20	3,35	11,73	9,63

O edifício com a solução escolhida na segunda fase de simulações com PCMs comparado com o edifício de referência sem PCMs nas necessidades nominais de energia útil para aquecimento obteve uma redução de 10,07% nas necessidades energéticas.

Nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento comparando o edifício com a solução otimizada com PCMs com o edifício de referência sem PCMs houve uma redução aproximada de 75,86%.

Observou-se que o edifício com a solução com PCMs com melhor desempenho energético obteve uma redução aproximada de 12,28%, comparado com o edifício de referência sem PCMs nas necessidades nominais anuais globais de energia primária.

No edifício em estudo localizado na cidade do Porto a solução construtiva com melhor desempenho com PCMs apenas na cobertura e na parede exterior localizada a Sul, comparada com o edifício de referência sem PCMs, verificaram-se as seguintes conclusões:

- Nas necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento esta solução permitiu obter uma redução de 8,92%;
- Esta solução nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento conduziu a uma redução de 59,05%;
- Uma redução aproximada de 10,43% nas necessidades nominais anuais globais de energia primária.

No edifício em estudo localizado na cidade do Porto com a solução construtiva otimizada sem PCMs na parede exterior localizada a Norte, comparada com o edifício de referência sem PCMs, foi possível observar que:

- Esta solução nas necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento obteve uma redução aproximada de 9,63%;
- Nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento esta solução obteve uma redução aproximada de 72,2% das necessidades energéticas;
- Esta solução nas necessidades nominais anuais globais de energia útil primária obteve uma redução aproximada de 11,73 %;

4.3.4 Vila Real

Na Figura 47 apresentam-se os resultados obtidos na terceira fase de simulações para a cidade de Vila Real.

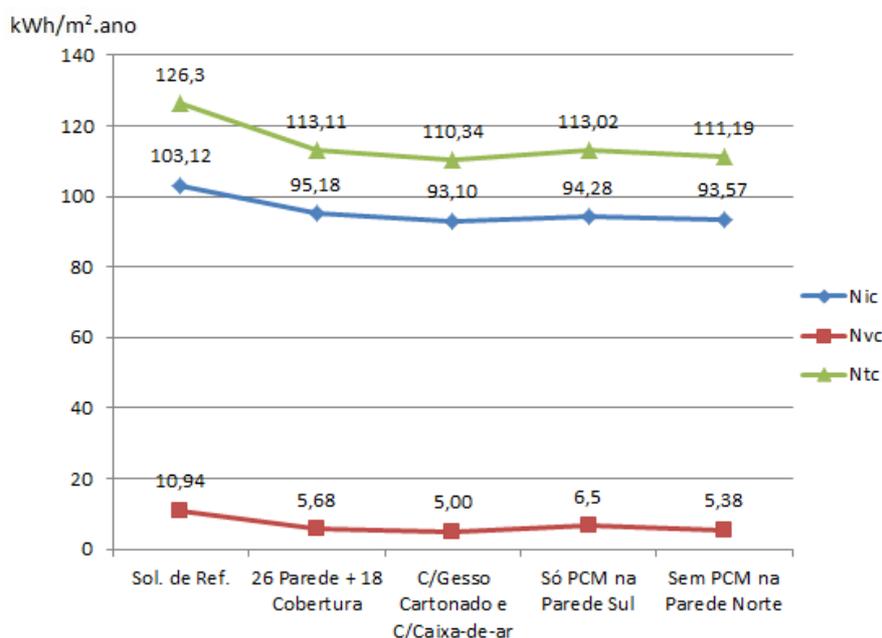


Figura 47: Resultados obtidos da terceira fase de simulações do edifício de estudo localizado na cidade de Vila Real

Na Tabela 50 apresenta-se a redução das necessidades energéticas das simulações efetuadas na terceira fase em relação ao edifício de referência sem PCMs no edifício de estudo localizado em Vila Real.

Tabela 50: Redução das necessidades energéticas das simulações efetuadas na terceira fase em relação ao edifício de referência sem PCMs no edifício de estudo localizado em Vila Real

	Redução das necessidades energéticas					
	Nic		Nvc		Ntc	
	%	kWh/m².ano	%	kWh/m².ano	%	kWh/m².ano
RT26 Parede + RT 18 cobertura	7,70	7,94	48,08	5,26	10,44	13,19
Gesso cartonado + caixa-de-ar	9,72	10,02	54,30	5,94	12,64	15,96
PCM na parede exterior Sul e na cobertura	8,57	8,84	40,59	4,44	10,51	13,28
Sem PCM na parede Norte	9,26	9,55	50,82	5,56	11,96	15,11

Observou-se em todas as zonas que a solução otimizada obteve melhor desempenho energético do que a solução de referência com PCMs, porque a aplicação de uma caixa-de-ar permite melhorar o U das soluções construtivas.

O edifício com a solução otimizada localizado na cidade de Vila Real comparado com o edifício de referência sem PCMs obteve as seguintes reduções das necessidades energéticas:

- 10,02 kWh/m².ano nas necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento;
- 5,94 kWh/m².ano nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento obteve uma redução de;
- 15,96 kWh/m².ano nas necessidades nominais anuais globais de energia primária;

A simulação da solução otimizada com PCMs apenas na parede exterior localizada a Sul e na cobertura, comparada com a análise do edifício de referência sem PCMs, permite verificar as seguintes conclusões:

- Nas necessidades nominais de energia útil para aquecimento obteve-se uma redução de 8,57%;
- Uma redução de 40,59% nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento;
- Uma redução de 10,51% nas necessidades nominais anuais globais de energia primária.

A solução otimizada sem PCMs na parede exterior localizada a Norte, comparada com o edifício de referência sem PCMs, obteve-se as seguintes conclusões:

- Esta solução nas necessidades nominais anuais globais de energia útil para aquecimento obteve uma redução de 9,55 kWh/m².ano;
- Uma redução de 5,56 kWh/m².ano nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento;
- Nas necessidades nominais anuais globais de energia primária esta solução obteve uma redução de 15,11 kWh/m².ano

No subcapítulo seguinte apresenta-se uma análise da viabilidade económica da otimização do uso de PCMs no edifício em estudo, na cidade do Porto.

Com as várias simulações efetuadas conseguiu-se perceber as várias potencialidades dos PCMs nas diferentes zonas de estudo e que a sua aplicação num edifício reduz as necessidades energéticas. Como o caso de estudo corresponde a um edifício localizado no Norte de Portugal, sem isolamento térmico, obteve-se uma maior redução percentual nas necessidades de arrefecimento, mas obteve-se maiores poupanças energéticas nas necessidades de aquecimento.

A Tabela 51 apresenta a redução das necessidades energéticas do edifício com a solução otimizada com PCMs comparado com o edifício de referência nas quatro zonas de estudo sem PCMs.

Tabela 51: Redução das necessidades energéticas do edifício com a solução otimizada com PCMs comparado com o edifício de referência nas quatro zonas de estudo

	Redução das necessidades energéticas					
	N _{ic}		N _{vc}		N _{tc}	
	%	kWh/m ² .ano	%	kWh/m ² .ano	%	kWh/m ² .ano
Bragança	9,17	11,43	68,62	3,63	10,58	15,05
Montalegre	9,19	14,63	83,82	1,45	9,28	16,07
Porto	10,07	6,57	75,86	3,52	12,28	10,08
Vila Real	9,72	10,02	54,3	5,94	12,64	15,96

Tal como na primeira fase de simulações, no subcapítulo “soluções otimizadas” a zona que obteve uma maior redução das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento foi a zona de Montalegre e a que obteve resultados inferiores foi a zona do Porto em relação às restantes zonas.

Nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento, as conclusões também são idênticas às mencionadas no subcapítulo anterior (“soluções otimizadas”). A cidade de Vila Real foi a zona que obteve uma maior redução das necessidades energéticas e Montalegre obteve menor redução em relação às restantes zonas.

Nas necessidades nominais anuais globais de energia útil primária a zona que obteve uma maior redução, ou seja, a zona que obteve maiores poupanças energéticas com a aplicação de PCMs foi a zona de Montalegre e a zona do Porto foi a zona que obteve resultados inferiores em relação às restantes zonas.

4.4 Conforto

No capítulo anterior verificou-se que a implementação de soluções com incorporação de materiais de mudança de fase permite diminuir as necessidades energéticas do edifício. Neste capítulo pretende-se analisar em que medida é que este tipo de soluções permite conferir um maior nível de conforto térmico para os utilizadores do edifício. Foi então efetuada uma análise do conforto térmico para a solução que apresentou melhores resultados de desempenho energético na zona do Porto.

A análise do conforto térmico foi realizada através do método de cálculo descrito na ferramenta de avaliação de sustentabilidade de edifícios - SBTool^{PT}-H (Mateus & Bragança

2009). O parâmetro utilizado para esta avaliação foi o P18 que permite analisar o nível de conforto térmico médio anual. Este parâmetro pertence à categoria de conforto e saúde dos utilizadores e à dimensão social.

O parâmetro do nível de conforto térmico médio anual tem como objetivo promover a presença de um ambiente térmico adequado durante as estações de aquecimento e arrefecimento.

Como o parâmetro P18 não se aplica nos casos em que existam sistemas de arrefecimento instalados. Por este motivo foi necessário efetuar adaptações tendo em conta a norma EN15251 (CEN 2007).

De seguida apresentam-se os resultados obtidos na análise do conforto térmico tendo em conta o processo de cálculo preconizado pelo SBTool^{PT}-H e as necessárias adaptações à norma EN15251 (Mateus & Bragança 2009).

Conforto térmico – Solução de referência

A. Determinação do nível de conforto térmico durante a estação de aquecimento

1. Temperatura operativa que é excedida em pelo menos 95% das horas da estação de aquecimento ($\Theta_{\text{omin}95}$).

$$\Theta_{\text{omin}95} = \boxed{16,69} \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. Temperatura operativa que é excedida em pelo menos 95% das horas da estação de aquecimento ($\Theta_{\text{omin}95}$):

Melhor Prática: $\Theta_{\text{omin}95^*} = \boxed{21,00} \text{ } ^\circ\text{C}$

Prática convencional: $\Theta_{\text{omin}95^*} = \boxed{18,00} \text{ } ^\circ\text{C}$

Solução: $\Theta_{\text{omin}95} = \boxed{16,69} \text{ } ^\circ\text{C}$

3. Cálculo do valor do Nível de Conforto Térmico Durante a Estação de Aquecimento (PCTI) de acordo com a seguinte equação:

$$\overline{P_{CTI}} = (\Theta_{omin95} - \Theta_{omin95}^*) / (\Theta_{omin95}^* - \Theta_{omin95}^*) = \boxed{-0,4355}$$

B. Determinação do nível de conforto térmico durante a estação de arrefecimento

1. Temperatura operativa que não é excedida em pelo menos 95% das horas da estação de arrefecimento ($\Theta_{omáx95}$).

$$\Theta_{omáx95} = \boxed{25,28} \text{ } ^\circ \text{C}$$

2. Temperatura operativa que não é excedida em pelo menos 95% das horas da estação de arrefecimento ($\Theta_{omáx95}$):

Melhor Prática: $\Theta_{omáx95}^* = \boxed{25,50} \text{ } ^\circ \text{C}$

Prática convencional: $\Theta_{omáx95}^* = \boxed{27,00} \text{ } ^\circ \text{C}$

Solução: $\Theta_{omáx95} = \boxed{25,28} \text{ } ^\circ \text{C}$

Como no verão o edifício é mecanicamente climatizado adaptou-se os valores da Tabela A.2 do Anexo A da norma EN15251.

3. Determinou-se o valor do Nível de Conforto Térmico Durante a Estação de Arrefecimento (PCTV) de acordo com a seguinte equação:

$$\overline{P_{CTV}} = (\Delta_{095} - \Delta_{095}^*) / (\Delta_{095}^* - \Delta_{095}^*) = \boxed{1,1442}$$

C. Determinação do nível de conforto térmico médio anual

Determinou-se o nível de conforto térmico médio anual (PCT). Este nível de conforto corresponde à média ponderada do somatório dos níveis de conforto obtidos para a estação de aquecimento e arrefecimento, em função da duração de cada estação:

$$\overline{P_{CT}} = (P_{CTI} * 6,2 + P_{CTV} * 4) / (6,2 + 4) = \boxed{0,184} \text{ } ^\circ \text{C}$$

Avaliação:

Nível	Condições	Por favor assinale o nível atingido (X)
A*	$\overline{P_{CT}} > 1,00$	
A	$0,70 < \overline{P_{CT}} \leq 1,00$	
B	$0,40 < \overline{P_{CT}} \leq 0,70$	
C	$0,10 < \overline{P_{CT}} \leq 0,40$	X
D	$0,00 \leq \overline{P_{CT}} \leq 0,10$	
E	$\overline{P_{CT}} < 0,00$	

A solução de referência da cidade do Porto sem PCMs obteve classificação C, o edifício não se encontra em conforto.

Conforto térmico – Solução otimizada

A. Determinação do nível de conforto térmico durante a estação de aquecimento

1. Temperatura operativa que é excedida em pelo menos 95% das horas da estação de aquecimento (Θ_{omin95}).

$$\Theta_{omin95} = \boxed{16,83} \text{ } ^\circ \text{C}$$

2. Temperatura operativa que é excedida em pelo menos 95% das horas da estação de aquecimento (Θ_{omin95}):

Melhor Prática: $\Theta_{\text{omin95}}^* =$ °C

Prática convencional: $\Theta_{\text{omin95}}^* =$ °C

Solução: $\Theta_{\text{omin95}} =$ °C

3. Cálculo do valor do Nível de Conforto Térmico Durante a Estação de Aquecimento (PCTI) de acordo com a seguinte equação:

$$\overline{P_{\text{CTI}}} = (\Theta_{\text{omin95}} - \Theta_{\text{omin95}}^*) / (\Theta_{\text{omin95}}^* - \Theta_{\text{omin95}}^*) =$$

B. Determinação do nível de conforto térmico durante a estação de arrefecimento

Melhor Prática: $\Delta_{\text{omáx95}}^* =$ °C

Prática convencional: $\Delta_{\text{omáx95}}^* =$ °C

Solução: $\Delta_{\text{omáx95}} =$ °C

Como no verão o edifício é mecanicamente climatizado adaptaram-se os valores da Tabela A.2 do Anexo A da norma EN15251. Os valores adotados tiveram em consideração as classes de conforto para edifícios residenciais selecionadas pela metodologia SBTool-PT (Classe III – prática convencional e Classe I – melhor prática).

Valor do Nível de Conforto Térmico Durante a Estação de Arrefecimento (PCTV) de acordo com a seguinte equação:

$$\overline{P_{\text{CTV}}} = (\Delta_{\text{omáx95}} - \Delta_{\text{omáx95}}^*) / (\Delta_{\text{omáx95}}^* - \Delta_{\text{omáx95}}^*) =$$

C. Determinação do nível de conforto térmico médio anual

$$\overline{P_{CT}} = (P_{CTI} * 6,2 + P_{CTV} * 4) / (6,2 + 4) = \boxed{0,3911} \text{ } ^\circ \text{C}$$

Avaliação:

Nível	Condições	Por favor assinale o nível atingido (X)
A*	$\overline{P_{CT}} > 1,00$	
A	$0,70 < \overline{P_{CT}} \leq 1,00$	
B	$0,40 < \overline{P_{CT}} \leq 0,70$	
C	$0,10 < \overline{P_{CT}} \leq 0,40$	X
D	$0,00 \leq \overline{P_{CT}} \leq 0,10$	
E	$\overline{P_{CT}} < 0,00$	

A solução ótima da cidade do Porto, apesar de estar muito próxima da classificação B obteve classificação C neste parâmetro, ou seja, a probabilidade de os ocupantes se encontrarem num nível de conforto térmico considerado bom continua a não ser elevada. Contudo, verificou-se que o Nível de Conforto Térmico Médio Anual passou de 0,18 para 0,39. Este valor, para além de estar muito próximo da classe B, demonstra que efetivamente a implementação de PCM's conduziu a uma melhoria do conforto térmico médio anual do edifício.

É importante referir que o edifício analisado não possui qualquer tipo de isolamento térmico, pelo que a obtenção de um nível de conforto térmico médio anual próximo da classe B é um resultado bastante positivo.

Provavelmente, ao se colocar isolamento nas paredes exteriores poderia se ter um maior aproveitamento dos PCMs, o que potencialmente poderia melhorar o nível de conforto dos ocupantes.

4.5 Análise Económica

Markets e Markets lançaram um relatório em 2010, chamado *Advanced Phase Change Material Market: Global Forecast (2010–2015)* (Markets & Markets 2010) afirmando que a crescente necessidade de economia de energia e a tecnologia favorável ao meio ambiente está a impulsionar o mercado global de PCMs.

Posteriormente à análise económica de energia de um edifício localizado no Norte de Portugal com a implementação de PCMs, foi desenvolvido uma análise para compreender se a aplicação de PCMs exhibe viabilidade económica em comparação com a solução referida. O custo do ciclo de vida do edifício foi avaliado de acordo com o método proposto pelo regulamento delegado n.º 244/2012, de 16 de Janeiro de 2012 (EU 2012), conforme apresentado na equação 1.

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_{i=1}^{\tau} \left(C_{a,i(j)} \times R_a(i) - V_{f,\tau}(j) \right) \right] \quad (1)$$

Onde:

τ - Período

$C_g(\tau)$ – Custo global durante o período de cálculo

C_I – Custo de investimento inicial para a medida j

$C_{a,i(j)}$ – Custo anual durante o ano i para a medida j

$R_d(i)$ – Taxa de desconto para o ano i

$V_{f,\tau(j)}$ – Valor residual da j no final do período de cálculo

Foi tido em conta uma taxa de desconto (inflação) de 3%, assim como a evolução dos custos de energia. Os preços da energia previstos nas tendências energéticas da UE até 2030, publicados pela Comissão Europeia em 2009, foram considerados para o período entre 2013 e 2030 (EC 2009). Para o período entre 2030 e 2046 foram utilizados os preços previstos no Energy Road Map 2050 (EC 2011).

Os custos de investimento para a solução de referência são estimados com base numa análise de mercado e foram obtidos através do gerador de preços online para materiais de construção “Gerador de preços para construção civil. Portugal. CYPE Ingenieros, S.A.”. Os custos de investimento para PCMs foram fornecidos pelo fabricante (Rubitherm 2017b). A solução de PCM estudada na análise económica foi aquela que apresentou os melhores resultados de desempenho energético na zona do Porto, ou seja, a solução obtida na terceira fase de simulações.

Através da Tabela 52, conclui-se que o investimento inicial para uma solução com PCMs é três vezes maior do que o investimento para uma solução de referência. Em relação aos custos operacionais, é possível observar que a solução com PCMs permite obter uma redução de 12% na fatura energética. No entanto, no que se refere aos custos do ciclo de vida, conclui-se que, por enquanto, a diminuição dos custos operacionais não é suficiente para ultrapassar o elevado investimento inicial.

Tabela 52: Análise Económica

	Custo de Investimento	Custos Operacionais	Custo do Ciclo de Vida
Solução de Referência (Paredes Exteriores e Cobertura)	11855€	41204€	53059€
Solução com PCMs (Paredes Exteriores e Cobertura)	35217€	36145€	71362€
Diferença	+ 23362€	- 5059€	+ 18303€

Outros autores, realizaram uma análise da viabilidade económica da incorporação de PCMs na construção de paredes e tetos (Peippo et al. 1991; Stovall & Tomlinson 1995). Os resultados são consideravelmente influenciados pelo tipo de PCMs, a técnica de encapsulamento, as características de construção e uso e, principalmente pelas condições climáticas do local de construção. No entanto, em Portugal e especificamente na região Norte, outros autores (Mustaparta et al. 2013) chegaram igualmente à conclusão de que, por enquanto, o tempo de retorno ainda é longo demais.

Contudo, embora a incorporação de PCMs em edifícios ainda seja uma tecnologia cara, esta poderá contribuir para a redução do pico da consumo e da redução do potencial do consumo de energia, economizando assim os utilizadores dos edifícios (Hauer et al. 2005).

Um dos objetivos deste estudo passa por compreender o efeito benéfico da introdução de materiais de mudança de fase (PCM) num edifício localizado no Norte de Portugal. Ao efetuar-se uma análise custo/benefício conclui-se que o custo da aquisição deste material é ainda um pouco elevado e que o investimento efetuado com a aquisição deste material não é facilmente recuperado. Contudo, verificou-se uma vantagem do ponto de vista do conforto térmico, sendo que esta melhoria não é facilmente traduzida em custos. No entanto existem efetivamente poupanças económicas associadas a esta melhoria de conforto.

Como Portugal é um dos países da Europa onde existem mais doenças e mortes associadas ao frio, estas adversidades apresentam um custo não só social, mas também económico que

poderia ser minimizado com a utilização deste tipo de soluções (Fowler et al. 2015; Healy 2003).

De modo a compreender as soluções construtivas efetuadas para otimizar a quantidade de PCMs foi realizada uma análise da viabilidade económica destas soluções no edifício localizado na cidade do Porto. Nas Tabelas 53 e 54 são apresentadas as análises económicas dos edifícios com otimização de PCMs em relação ao edifício de referência sem PCMs.

A Tabela 55 apresenta a diferença de custos da solução otimizada e das soluções com menores quantidades de PCMs em relação ao edifício de referência sem PCMs.

Tabela 53: Análise económica do edifício de estudo com PCMs na parede exterior localizada a sul e na cobertura

	Custo de Investimento	Custos Operacionais	Custo do Ciclo de Vida
Solução de Referencia	11855€	41204€	53059€
PCMs Paredes Sul + Cobertura	26243€	36908€	63151€
Diferença	+14389 €	-4296 €	+10093 €

Tabela 54: Análise económica do edifício localizado na cidade do Porto sem PCMs na parede exterior localizada a Norte

	Custo de Investimento	Custos Operacionais	Custo do Ciclo de Vida
Solução de Referencia	11855€	41204€	53059€
PCMs Cobertura e sem PCMs Norte	31877€	36371€	68247€
Diferença	+20022€	-4833 €	+15189 €

Tabela 55: Diferença dos custos dos diferentes estudos em relação ao edifício de referência sem PCMs

	Custo de Investimento	Custos Operacionais	Custo do Ciclo de Vida
Solução otimizada	+ 23362€	- 5059€	+ 18303€
PCMs Paredes Sul + Cobertura	+14389 €	-4296 €	+10093 €
PCMs Cobertura e sem PCMs Norte	+20022€	-4833 €	+15189 €

Através dos dados obtidos verifica-se, tal como expectável, que a situação em que se colocam PCMs apenas na parede Sul e na cobertura é a que possui menores custos de investimento. Contudo, verifica-se que em termos de custos operacionais, esta solução leva a um aumento de apenas 763€. Para um período de 30 anos isto representa apenas um aumento de cerca de 25€ ao ano. Por outro lado, quando comparada com a solução de referência, esta solução

representa uma diminuição de custos operacionais anuais de cerca de 143€. Desta forma, conclui-se que esta solução poderá ser apelativa para situações em que se pretenda efetuar um investimento inicial menor, conseguindo ainda assim tirar proveito dos benefícios dos materiais de mudança de fase.

Por outro lado, no que respeita à solução em que foram retirados apenas os PCMs da parede Norte, esta pode não ser uma solução tao apelativa. A diminuição do investimento inicial, em relação à solução otimizada é de 3340€. Esta solução apresentar ainda uma poupança anual de cerca 161€ (durante 30 anos) em relação à solução de referência. Contudo, quando comparada com a situação em que apenas foram colocados PCMs na parede Sul e cobertura, verifica-se que através de um investimento inicial bastante inferior é possível igualmente obter poupanças anuais igualmente significativas.

No entanto, a escolha de uma destas três soluções dependerá muito do poder de compra e da vontade de investimento de quem investir.

Apesar do tempo de retorno de investimento não ser apelativo, a solução mais eficiente dependerá sempre da quantidade de PCMs que se aplica no edifício. Quanto mais PCMs forem aplicados, maiores serão os benefícios em termos de economizar de energia e de conforto térmico.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O presente estudo teve como objetivo a análise do efeito de soluções construtivas com incorporação de PCM no consumo energético de edifícios. Estudou-se o consumo energético da aplicação de PCM em soluções construtivas correntes de um edifício com uma geometria simples com a finalidade de descobrir quais os PCM que melhor se adequam ao clima em análise.

Este estudo foi realizado para o clima na zona Norte de Portugal, mais concretamente para as seguintes localizações: Bragança, Montalegre, Porto e Vila Real. Visto que estas localizações pertencem a zonas climáticas diferentes é possível analisar diferentes problemáticas e tirar conclusões distintas relativamente aos tipos de PCM mais apropriados para cada localização.

A aplicação de um único PCM nas paredes exteriores ou laje de cobertura leva a uma diminuição das necessidades de aquecimento e arrefecimento, comparando com o edifício de referência sem PCMs, sendo possível concluir desde já as potencialidades dos PCMs na redução do consumo energético.

Tendo em consideração o edifício analisado, os PCMs têm melhores resultados nas necessidades energéticas quando são aplicados na cobertura do que nas paredes. Isto deve-se ao facto de a área de cobertura ser maior que a das paredes, ou seja, quanto maior for a área de colocação dos PCMs melhor serão os resultados.

Como no Norte do País a situação mais gravosa é o Inverno, então para se obter melhores resultados, estudou-se os PCMs que obtiveram melhores resultados no verão colocados nas paredes exteriores e os PCMs que obtiveram melhores resultados no Inverno colocados na cobertura.

Verificou-se que o PCM que obtém melhor desempenho em todas as zonas nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento é o PCM RT 26. Enquanto nas necessidades nominais para aquecimento, os PCMs que obtiveram melhores resultados variam conforme a realidade.

Os PCMs com melhores resultados nas necessidades nominais para aquecimento em relação às quatro zonas em estudo foram:

- Na cidade de Vila Real o PCM que obteve melhores resultados foi o RT18;
- Em Bragança e Montalegre como o clima na estação de aquecimento é idêntico o PCM que obteve melhores resultados nestas zonas foi o RT 21;
- A cidade do Porto como tem um Inverno menos gravoso em relação às restantes zonas o PCM que obteve melhores resultados foi o RT22.

Após a seleção dos melhores PCMs para cada zona estudou-se qual a solução construtiva que permite tirar maior proveito dos PCMs.

A solução que obteve melhores resultados foi a que possuía caixa-de-ar nas paredes exteriores e na cobertura revestidas com uma chapa metálica. Contudo apesar desta solução construtiva ter obtido os melhores resultados não é a solução mais adequada para uma situação real, por não ser esteticamente/ arquitetonicamente apelativa. Por este motivo a solução otimizada adotada foi a solução com PCMs nas paredes exteriores e na cobertura com caixa-de-ar e gesso cartonado. Esta solução apresenta uma melhoria comparada com a solução com PCMs sem caixa-de-ar nas paredes exteriores, porque a caixa-de-ar permite uma melhoria do U da solução construtiva.

De seguida estudou-se para as quatro zonas em estudo os edifícios com os melhores PCMs e com a solução construtiva definida na segunda fase e obtiveram-se reduções significativas das necessidades energéticas nos edifícios em estudo.

A zona que obteve maiores poupanças energéticas nas necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento foi a zona de Montalegre. Nas necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento a zona que obteve maiores poupanças energéticas foi a zona de Vila Real. Nas necessidades nominais anuais globais de energia útil primária a zona que obteve uma maior redução foi a zona de Montalegre, ou seja, foi a zona que obteve maiores poupanças energéticas com a aplicação desta tecnologia.

Realizou-se uma análise económica com a solução otimizada com PCMs comparada com a solução de referência sem PCMs para a cidade do Porto. Concluiu-se que o investimento inicial para uma solução com PCMs é três vezes superior ao investimento para uma solução de referência. Apesar de a solução com PCMs a nível de custos operacionais apresentar uma redução de 12% na fatura energética, tendo em conta os custos do ciclo de vida, conclui-se que neste momento a diminuição dos custos operacionais não é suficiente para ultrapassar o elevado investimento inicial.

Efetuu-se uma análise de conforto no edifício de referência na cidade do Porto e no edifício com a solução otimizada e concluiu-se que a implementação deste tipo de tecnologia permite obter uma melhoria nas condições de conforto térmico, especialmente no que se refere à estação de arrefecimento. Como o edifício analisado não possui qualquer tipo de isolamento térmico e com uma obtenção de um nível de conforto térmico médio anual próximo da classe B (resultado bastante positivo), provavelmente com a colocação isolamento nas paredes exteriores poder-se-ia ter um maior aproveitamento dos PCMs.

5.2 Trabalhos Futuros

Há necessidade de prosseguir com novos estudos sobre a aplicação de materiais de mudança de fase na construção civil, ajudando a otimizar a sua utilização e o seu potencial.

As possibilidades de investigação futuras que podem dar um contributo assinalável em relação ao trabalho apresentado nesta dissertação, são:

- Estudo de novas soluções construtivas com novos PCMs;
- Estudo de PCMs em vários elementos construtivos;
- Estudo do PCM em diferentes zonas do País;
- Estudo do conforto térmico dos ocupantes num edifício com PCMs noutra zona de estudo;
- Estudo da aplicação de sistemas ativos com PCMs de forma a compreender os benefícios que podem ser obtidos;
- Comparação dos resultados das simulações obtidos neste trabalho com resultados experimentais.

BIBLIOGRAFIA

- Abdul, Mazlan, Seyed Ehsan, Hasanen M Hussen, Hussein J Akeiber, Safaa N Saud, and Abdulrahman Th. 2017. "An Overview of Phase Change Materials for Construction Architecture Thermal Management in Hot and Dry Climate Region." *Applied Thermal Engineering* 112. Elsevier Ltd: 1240–59. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.07.032.
- ADENE. 2012. "Guia Da Eficiência Energética." http://www.adene.pt/sites/default/files/guiaee_v1310.pdf. [Accessed February 3, 2017].
- Akeiber, Hussein, Payam Nejat, Muhd Zaimi, Abd Majid, Mazlan A Wahid, Fatemeh Jomehzadeh, Iman Zeynali, John Kaiser, Ben Richard, and Sheikh Ahmad. 2016. "A Review on Phase Change Material (PCM) for Sustainable Passive Cooling in Building Envelopes." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60. Elsevier: 1470–97. doi:10.1016/j.rser.2016.03.036.
- Ali, Shazim. 2014. "Phase Change Materials Integrated in Building Walls : A State of the Art Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31. Elsevier: 870–906. doi:10.1016/j.rser.2013.12.042.
- Alkan, Cemil, Ahmet Sari, Ali Karaipekli, and Orhan Uzun. 2009. "Solar Energy Materials & Solar Cells Preparation , Characterization , and Thermal Properties of Microencapsulated Phase Change Material for Thermal Energy Storage" 93: 143–47. doi:10.1016/j.solmat.2008.09.009.
- Álvarez, Servando, Luisa F Cabeza, Alvaro Ruiz-pardo, Albert Castell, and José Antonio. 2013. "Building Integration of PCM for Natural Cooling of Buildings." *Applied Energy* 109. Elsevier Ltd: 514–22. doi:10.1016/j.apenergy.2013.01.080.
- Araújo, Catarina, Manuela Almeida, Luís Bragança, and José Amarilio Barbosa. 2016. "Cost-Benefit Analysis Method for Building Solutions." *Applied Energy* 173: 124–33. doi:10.1016/j.apenergy.2016.04.005.
- Arkar, Ciril. 2008. "Correlation between the Local Climate and the Free-Cooling Potential of Latent Heat Storage" 40: 429–37. doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.011.
- ASHRAE. 2004. "Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs."
- Barreneche, Camila, Alvaro De Gracia, Susana Serrano, M Elena Navarro, Ana María, A Inés Fernández, Manuel Carmona, Juan Francisco, and Luisa F Cabeza. 2013. "Comparison of Three Different Devices Available in Spain to Test Thermal Properties of Building Materials Including Phase Change Materials." *Applied Energy* 109. Elsevier Ltd: 421–27. doi:10.1016/j.apenergy.2013.02.061.
- Bentz, Dale P, and Randy Turpin. 2007. "Potential Applications of Phase Change Materials in Concrete Technology" 29: 527–32. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.04.007.
- Bilgen, S. 2014. "Structure and Environmental Impact of Global Energy Consumption." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38. Elsevier: 890–902. doi:10.1016/j.rser.2014.07.004.
- Castell, A., I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, and L.F. Cabeza. 2009. "Analysis of the Simulation Models for the Use of PCM in Buildings." *Effstock 2009, 11th International Conference on Thermal Energy Storage. Thermal Energy Storage for Energy Efficiency*

and Sustainability.

- CEN. 2007. “EN 15251 - Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics.” European Committee for Standardization.
- Cerdeira, Sónia. 2015. “ESTUDO DE UM SISTEMA SOLAR PASSIVO COM INCORPORAÇÃO DE PCM’S.” Instituto Politécnico de Bragança - Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Tese de Mestrado.
- Chandel, S S, and Tanya Agarwal. 2017. “Review of Current State of Research on Energy Storage , Toxicity , Health Hazards and Commercialization of Phase Changing Materials.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67. Elsevier: 581–96. doi:10.1016/j.rser.2016.09.070.
- Costa, Susana. 2014. “Armazenamento de Energia Térmica Através de Materiais de Mudança de Fase.” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Mestrado.
- Crawley, Drury B, Jon W Hand, Michaël Kummert, and Brent T Griffith. 2008. “Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs.” *Building and Environment* 43: 661–73. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027.
- Cunha, Sandra, José B Aguiar, and António Tadeu. 2016. “Thermal Performance and Cost Analysis of Mortars Made with PCM and Different Binders.” *Construction and Building Materials* 122. Elsevier Ltd: 637–48. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.114.
- Cunha, Sandra, José Aguiar, and Fernando Pacheco-torgal. 2015. “Effect of Temperature on Mortars with Incorporation of Phase Change Materials.” *Construction and Building Materials* 98. Elsevier Ltd: 89–101. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.077.
- Cunha, Sandra, Marine Lima, and José B Aguiar. 2016. “Influence of Adding Phase Change Materials on the Physical and Mechanical Properties of Cement Mortars.” *Construction and Building Materials* 127. Elsevier Ltd: 1–10. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.119.
- Cunha, Sandra R., José Aguiar, Vânia Martins, Victor Ferreira, and António Tadeu. 2012. “Influência Da Adição de Microcápsulas de PCM Em Argamassas de Cal Aérea.” *Congresso Construção 2012, Coimbra Portugal*.
- Cunha, Sandra R., José Barroso de Aguiar, Mohammad Kheradmand, Luís Bragança, and Vitor Ferreira. 2013. “Thermal Mortas with Incorporation of PCM Microcapsules.” *Restoration of Buildings and Monuments - An International Journal* 19, No. 2/: 171–77. <http://hdl.handle.net/1822/26200>.
- Durães, Tiago. 2013. “Identificação Do Tipo E Quantidade de PCM Adequado Ao Clima Português - Lisboa.” Universidade do Minho. Tese de Mestrado.
- EC. 2006. “Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential.” European Commission. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=LEGISSUM%3A127064>. [Accessed February 13, 2017].
- EC, 2009. “EU Energy Trends to 2030 – Update 2009.” European Commission, Directorate General for Energy. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/trends_to_2030_update_2009.pdf. [Accessed February 13, 2017].
- EC. 2011. “Energy Efficiency Plan 2011.” European Commission. http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar%3A441bc7d6-d4c6-49f9-a108-f8707552c4c0.0002.03%2FDOC_1&format=PDF. [Accessed January 14, 2017].

- EC. 2014. “2030 Climate and Energy Goals for a Competitive, Secure and Low-Carbon EU Economy.” *European Commission*. <http://europa.eu/rapid/press-release%7B-%7DIP-14-54%7B-%7Den.htm>. [Accessed November 12, 2015]
- EC. 2015. “Europe 2020 Targets.” *European Commission*. <http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index%7B-%7Den.htm>. [Accessed November 9, 2015]
- Edsjø, Simen, and Bjørn Petter. 2015. “Phase Change Materials and Products for Building Applications : A State-of-the-Art Review and Future Research Opportunities.” *Energy & Buildings* 94 (7491). Elsevier B.V.: 150–76. doi:10.1016/j.enbuild.2015.02.023.
- EEA. 2011. “Energy and Non-Energy Related Greenhouse Gas Emissions (ENER 001).” Edited by European Environment Agency. *Assessment Published August 2011*. <http://www.eea.europa.eu>.
- EnergyPlus Development Team. 2009. “EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-200.”
- EU. 2002. “Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings.” E. Parliament.
- EU. 2010. *Directive 31/2010/EU of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings*. European Parliament.
- EU. 2012. “Commission Delegated Regulation (EU) N° 244/2012 of 16 January 2012.” Official Journal of the European Communities.
- European Climate Foundation. 2010. “Roadmap 2050 : A Practical Guide to a Prosperous, Low-Carbon Europe,” no. April: 99. doi:10.2833/10759.
- European Commission. 2011. “Communication from the European Parliament, The Council, The European Economic and Social Committee of the Regions - Roadmap to a Resource Efficient Europe , COM(2011) 571 Final.”
- European Commission. 2017a. “2020 Climate & Energy Package.” https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_pt. [Accessed September 11, 2017]
- European Commission. 2017b. “2030 Climate & Energy Framework.” https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_pt. [Accessed September 12, 2017]
- European Commission. 2017c. “2050 Low-Carbon Economy.” https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_pt. [Accessed September 12, 2017]
- Eurostat. 2014. “Energy Production and Imports.” *Eurostat. Statistics Explained*. <http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy%7B-%7Dproduction%7B-%7Dand%7B-%7Dimports>. [Accessed November 9, 2015].
- Evola, G, L Marletta, and F Sicurella. 2014. “Simulation of a Ventilated Cavity to Enhance the Effectiveness of PCM Wallboards for Summer Thermal Comfort in Buildings.” *Energy & Buildings* 70. Elsevier B.V.: 480–89. doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.089.
- Fowler, Tom, Rosamund J Southgate, Thomas Waite, Ruth Harrell, Sari Kovats, Angie Bone, Yvonne Doyle, and Virginia Murray. 2015. “Excess Winter Deaths in Europe: A Multi-Country Descriptive Analysis.” *European Journal of Public Health* 25 (2): 339–45. doi:10.1093/eurpub/cku073.
- Furbo, S. 2015. “Using Water for Heat Storage in Thermal Energy Storage (TES) Systems.” In *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, 31–47. Elsevier.

doi:10.1533/9781782420965.1.31.

- Garcia, Miguel. 2013. “Simulação Dinâmica de Edifícios Com Componentes Integrando PCM.” Universidade de Aveiro. Tese de Mestrado
- Goia, Francesco, Marco Perino, and Valentina Serra. 2014. “Experimental Analysis of the Energy Performance of a Full-Scale PCM Glazing Prototype.” *Solar Energy* 100. Elsevier Ltd: 217–33. doi:10.1016/j.solener.2013.12.002.
- Gracia, Alvaro De, Lidia Navarro, Albert Castell, Dieter Boer, and Luisa F Cabeza. 2014. “Life Cycle Assessment of a Ventilated Facade with PCM in Its Air Chamber.” *Solar Energy* 104. Elsevier Ltd: 115–23. doi:10.1016/j.solener.2013.07.023.
- Hauer, A, H Mehling, P Schossig, M Yamaha, L Cabeza, V Martin, and F Setterwall. 2005. “Annex 17: Advanced Thermal Energy Storage through Phase Change Materials and Chemical Reactions-Feasibility Studies and Demonstration Projects.”
- Healy, J D. 2003. “Excess Winter Mortality in Europe: A Cross Country Analysis Identifying Key Risk Factors.” *Journal of Epidemiology and Community Health* 57: 784–89. doi:10.1136/jech.57.10.784.
- Hed, G, and R Bellander. 2006. “Mathematical Modelling of PCM Air Heat Exchanger” 38: 82–89. doi:10.1016/j.enbuild.2005.04.002.
- Homebuilding&Renovating. 2016. “Homebuilding&Renovating - Phase Change Materials.” <https://www.homebuilding.co.uk/phase-change-materials/>. [Accessed June 9, 2016].
- Hunger, M, A G Entrop, I Mandilaras, H J H Brouwers, and M Founti. 2009. “Cement & Concrete Composites The Behavior of Self-Compacting Concrete Containing Micro-Encapsulated Phase Change Materials.” *Cement and Concrete Composites* 31 (10). Elsevier Ltd: 731–43. doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.08.002.
- INE. 2012. *Censos 2011 Resultados Definitivos*. Instituto Nacional de Estatística.
- IPCC. 2007. “Climate Change, Synthesis Report.” Edited by Intergovernmental Panel of Climate Change. <http://www.ipcc.ch/>.
- Isabel Cardoso. 2006. “Aplicação de Microcápsulas de PCM Em Materiais de Isolamento Térmico Para Fatos de Protecção E Combate Ao Fogo.” Universidade do Minho. Tese de Mestrado
- Iten, Muriel, Shuli Liu, and Ashish Shukla. 2016. “A Review on the Air-PCM-TES Application for Free Cooling and Heating in the Buildings.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 61. Elsevier: 175–86. doi:10.1016/j.rser.2016.03.007.
- Karim, L, F Barbeon, P Gegout, A Bontemps, and L Royon. 2014. “New Phase-Change Material Components for Thermal Management of the Light Weight Envelope of Buildings.” *Energy & Buildings* 68. Elsevier B.V.: 703–6. doi:10.1016/j.enbuild.2013.08.056.
- Kendrick, Christopher, and Nicholas Walliman. 2007. “Removing Unwanted Heat in Lightweight Buildings Using Phase Change Materials in Building Components: Simulation Modelling for PCM Plasterboard” 50: 265–73.
- Konstantinidis, Christine Vasiliki. 2010. “Integration of Thermal Energy Storage in Buildings.” University of Texas at Austin. Master of Science in Sustainable Design.
- Kuznik, Frédéric, Damien David, Kevyn Johannes, and Jean Jacques Roux. 2011. “A Review on Phase Change Materials Integrated in Building Walls.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (1): 379–91. doi:10.1016/j.rser.2010.08.019.

- Markets and Markets. 2010. “Advanced Phase Change Material Market Global Forecast (2010–2015).”
- Mateus, Ricardo, and Luís Bragança. 2009. *Guia de Avaliação SBTool Pt - H*. iiSBE Portugal.
- Medrano, Marc, Luisa F Cabeza, Cecilia Castello, Ron Leppers, and Oihana Zubillaga. 2007. “Use of Microencapsulated PCM in Concrete Walls for Energy Savings” 39: 113–19. doi:10.1016/j.enbuild.2006.03.030.
- Mehling, D.H. and D.L. Cabeza. 2008. *Heat and Cold Storage with PCM: An up to Date Introduction into Basics and Applications*. Springer.
- Melo, Ana Puala, and Roberto Lamberts. 2009. “Análise Da Influência Do Desempenho Térmico Dos Fechamentos Opacos Através Do Balanço Térmico.” *XII Encontro Nacional de Tecnologia No Ambiente Construído, At Fortaleza*.
- Mendes, João Farinha, António Joyce, Pedro Horta, e Maria João Brites. 2009. “Armazenamento de Energia Solar Térmica.”. Laboratório Nacional de Energia e Geologia.
- Merlin, Kevin, Didier Delaunay, Jérôme Soto, and Luc Traonvouez. 2016. “Heat Transfer Enhancement in Latent Heat Thermal Storage Systems : Comparative Study of Different Solutions and Thermal Contact Investigation between the Exchanger and the PCM.” *APPLIED ENERGY* 166. Elsevier Ltd: 107–16. doi:10.1016/j.apenergy.2016.01.012.
- Michael Christopher Smith. 2009. “Microencapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage.” The University of Auckland. Master’s thesis.
- Monteiro, José M., J.B. Aguiar, L.M. Bragança, e J.R. Gomes. 2007. Argamassas incorporando micrcápsulas de materiais de mudança de fase (PCM), seu processo de obtenção e sua utilização no revestimento interior de sistemas construtivos. 103 336, issued 2007. Patent number: 103 336.
- Monteiro, José M, Barroso de Aguiar, Luís Bragança, Jaime R Gomes, e P. Santos. 2005. “Argamassas Com Desempenho Térmico Melhorado Portugal Portugal Portugal Portugal Pedro Santos Micrópolis Portugal.” *Congresso Nacional de Argamassas de Construção*.
- Muruganatham, K. 2010. “Application of Phase Change Material in Buildings: Field Data vs. EnergyPlus Simulation.” Arizona.
- Mustaparta, Olli, Sandra Silva, and Dinis Leitão. 2013. “Potentialities of Using PCM in Residential Buildings in Portugal.” *Book of Proceedings - PORTUGAL SB13, CONTRIBUTION OF SUSTAINABLE*, 229–36.
- Navarro, Lidia, Alvaro De Gracia, Dervilla Niall, Albert Castell, Maria Browne, Sarah J McCormack, Philip Grif, and Luisa F Cabeza. 2016. “Thermal Energy Storage in Building Integrated Thermal Systems: A Review . Part 2 . Integration as Passive System” 85: 1334–56. doi:10.1016/j.renene.2015.06.064.
- Nunes, Lucília. 2011. “Eficiência Energética de Edifícios: Contributo Dos PCMs E Parede Trombe.” Universidade de Aveiro. Tese de Mestrado.
- Nuno Sá. 2015. “Identificação Do Tipo E Quantidade de PCM Adequado Ao Clima Português.” Universidade do Minho. Tese de Mestrado.
- Oliveira, Daniel. 2012. “Identificação Do Tipo E Quantidade de PCM Adequado Ao Clima Português.” Universidade do Minho. Tese de Mestrado.

- P C Tabares-Velasco, C Christensen M Bianchi, and C Booten Nrel. 2012. "Verification and Validation of EnergyPlus Conduction Finite Difference and Phase Change Material Models for Opaque Wall Assemblies." *Building and Environment*, no. July: 1–55. doi:10.1080/19401493.2011.595501.
- Parameshwaran, R., S. Kalaiselvam, S. Harikrishnan, and A. Elayaperumal. 2012. "Sustainable Thermal Energy Storage Technologies for Buildings: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (5). Elsevier Ltd: 2394–2433. doi:10.1016/j.rser.2012.01.058.
- Pasupathy, A., R. Velraj, and R. V. Seeniraj. 2008. "Phase Change Material-Based Building Architecture for Thermal Management in Residential and Commercial Establishments." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (1): 39–64. doi:10.1016/j.rser.2006.05.010.
- Peippo, K, P Kauranen, and P D Lund. 1991. "A Multicomponent PCM Wall Optimized for Passive Solar Heating." *Energy and Buildings* 17 (4): 259–70. doi:10.1016/0378-7788(91)90009-R.
- Portugal. 2013. "Decreto-Lei n.º118/2013 de 20 de Agosto." *Diário Da República, 1.ª Série - Nº 159 - 20 de Agosto de 2013*.
- Portugal. 2013b. "Despacho n.º15793-F/2013." *Diário Da República, 2.ª Série - Nº 234 - 3 Dezembro de 2013*.
- Rathod, Manish K, and Jyotirmay Banerjee. 2013. "Thermal Stability of Phase Change Materials Used in Latent Heat Energy Storage Systems: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 18. Elsevier: 246–58. doi:10.1016/j.rser.2012.10.022.
- RGEES. 2017. "Phase Change Energy Storage Technology." <http://www.rgees.com/technology.php>. [Accessed September 22, 2017].
- Rubitherm. 2017a. "PCM RT-LINE - Wide - Ranging Organic PCM for Your Application." <https://www.rubitherm.eu/en/index.php/productcategory/organische-pcm-rt>. [Accessed January 15, 2017].
- Rubitherm. 2017b. "Rubitherm - Phase Change Materials." <https://www.rubitherm.eu/en/>. [Accessed January 20, 2017].
- S., Shrestha, W. Miller, T. Stovall, A. Desjarlais, K. Childs, W. Porter, M. Bhandar, and S. Coley. 2011. "Modeling PCM-Enhanced Insulation System and Benchmarking EnergyPlus against Controlled Field Data." *In Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney*.
- Sá, Ana. 2012. "Comportamento Térmico de Edifícios Em Portugal Usando Materiais de Mudança de Fase." Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Tese de Douturamento.
- Saffari, Mohammad, Alvaro De Gracia, Svetlana Ushak, and Luisa F Cabeza. 2016. "Economic Impact of Integrating PCM as Passive System in Buildings Using Fanger Comfort Model." *Energy & Buildings* 112. Elsevier B.V.: 159–72. doi:10.1016/j.enbuild.2015.12.006.
- Santos, Calos, and Luís Matías. 2006. "ITE50- Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos Da Envolvente Dos Edifícios." LNEC.
- SCARDUELLI, Franck;, and Roberto WESTPHAL, Fernando; LAMBERTS. 2005. "Aplicação Do Método Bestest No EnergyPlus Para Treinamento Em Simulação Do

- Desempenho Térmico de Edificações.” *ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*.
- Schröder, J, and K Gawron. 1981. “Latent Heat Storage.” *International Journal of Energy Research* 5 (2). Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company: 103–9. doi:10.1002/er.4440050202.
- Sharma, S D, and Kazunobu Sagara. 2005. “Latent Heat Storage Materials and Systems : A Review” 5075. doi:10.1081/GE-200051299.
- Silva, Nelson. 2009. “Incorporação de Materiais de Mudança de Fase Em Materiais de Construção.” Universidade do Minho. Tese de Mestrado.
- Silva, Nelson, José B. Aguiar, Luís Bragança, Freire Teresa, and Isabel Cardoso. 2008. “Properties of Gypsum-PCM Based Mortars for Interior Plastering of Construction Systems.” *Materials Science Forum* 587–588 (913–917). 10.4028/www.scientific.net/MSF.587-588.913.
- Soares, N, J J Costa, A R Gaspar, and P Santos. 2013. “Review of Passive PCM Latent Heat Thermal Energy Storage Systems towards Buildings ’ Energy Efficiency.” *Energy & Buildings* 59. Elsevier B.V.: 82–103. doi:10.1016/j.enbuild.2012.12.042.
- Souayfane, Farah, Farouk Fardoun, and Pascal-henry Biwole. 2016. “Phase Change Materials (PCM) for Cooling Applications in Buildings : A Review.” *Energy & Buildings* 129. Elsevier B.V.: 396–431. doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.006.
- Stovall, T K, and J J Tomlinson. 1995. “What Are the Potential Benefits of Including Latent Storage in Common Wallboard?” *Journal of Solar Energy Engineering Transactions of the ASME* 117 (4): 318–25.
- Tabares-Velasco, Paulo Cesar, Craig Christensen, and Marcus Bianchi. 2012. “Verification and Validation of EnergyPlus Phase Change Material Model for Opaque Wall Assemblies.” *Building and Environment* 54: 186–96. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.019.
- Tetlow, D., Y. Su, and S. Riffat. 2011. “EnergyPlus Simulation Analysis of Incorporating Microencapsulated PCMs (Phase Change Materials) with Internal Wall Insulation (IWI) for Hard-to-Treat (HTT) Houses in the UK.” In *10th International Conference on Sustainable Energy Technologies*.
- Tristão, Soares. 2014. “Encapsulação de Materiais de Mudança de Fase (PCM) Para Aplicações No Armazenamento de Energia.” Instituto Politécnico de Bragança - Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Tese de Mestrado.
- Tyagi, Vineet Veer, and D ã Buddhi. 2007. “PCM Thermal Storage in Buildings : A State of Art” 11: 1146–66. doi:10.1016/j.rser.2005.10.002.
- UNEP. 2016. “United Nations Environment Programme Environment for Development - Why Buildings?” <http://www.unep.org/sbci/AboutSBCI/Background.asp>. [Accessed July 11, 2016].
- Waqas, A, S Kumar, A Waqas, and S Kumar. 2016. “Utilization of Latent Heat Storage Unit for Comfort Ventilation of Buildings in Hot and Dry Climates COMFORT VENTILATION OF BUILDINGS IN HOT AND” 5075 (June). doi:10.1080/15435075.2010.529406.
- Weinl, Helmut, Andreas Beck, and Jochen Fricke. 2005. “PCM-Facade-Panel for Daylighting and Room Heating” 78: 177–86. doi:10.1016/j.solener.2004.04.013.

Zhang, D., J. Zhou, and K. Wu. 2003. "Study of Phase-Changing Energy Storage Composite Material and Its Power Peak Regulation Function." *East China Electric Power* 31 (9): 27–30.