

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM EDIFÍCIO CONTENDO MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE (PCM)

MARIA INÊS FIGUEIRAL DE CARVALHO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professora Doutora Ana Vaz Sá

Coorientador: Professora Doutora Ana Sofia Guimarães

JUNHO DE 2019

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2018/2019

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2018/2019 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2019*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família e amigos,

Look for something positive in each day, even if some days you have to look a little harder.

Autor desconhecido

AGRADECIMENTOS

Um agradecimento à professora Ana Vaz Sá pela excelente orientação que me deu, por todo o apoio e por toda a disponibilidade.

Um enorme obrigado a todos os meus amigos por estarem sempre presentes em todos os momentos bons e os menos bons durante a minha vida académica, com um agradecimento especial à Monica Moreira por nunca negar corrigir os meus textos.

À Diana Barbosa, um muito obrigado, por ter a maior paciência do mundo para me explicar todas as matérias.

Agradeço à Mariana Moreira, à Monica Moreira, à Teresa Sousa e à Cátia Cardoso por todas as conversas motivacionais que tivemos e por todo o conforto que me deram.

Um gigante obrigado ao meu namorado, Renato Gaspar, por todo o apoio e por nunca me deixar ir abaixo, olhando sempre para o lado positivo de todas as coisas.

À D. Teresa Silva, por me ter acolhido como uma filha desde o momento em que me conheceu, a ela um enorme obrigado.

À minha família, especialmente à minha mãe, por todo o apoio e compreensão, um obrigado não chega.

.

RESUMO

Numa época de desgaste excessivo e constante de recursos naturais, surge como necessidade social a adoção de mecanismos medidas para a gestão de recursos fósseis.

Sendo a construção civil dos setores que mais consome energia em todo o mundo é imperativa a adoção de medidas sustentáveis para esta indústria. Uma opção viável para esta redução, embora que ainda em pequena escala, está na introdução de materiais de mudança de fase (PCM) nas construções. Este é um material que tem despertado o interesse do meio comercial devido à sua grande capacidade de armazenamento de calor, diminuindo assim, o recurso a sistemas de climatização.

Este trabalho consiste no estudo do efeito da introdução de PCM em dois gabinetes do Edifício G, situado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. As zonas em estudo apresentam ganhos de energia elevados na estação de arrefecimento, quer devido à produção interna de calor, quer devido à arquitetura do edifício, com gabinetes de vãos orientados a Sul e paredes, pavimentos e coberturas em contacto com o exterior.

Este estudo teve como objetivo verificar a influência da introdução de PCM no comportamento térmico e nos consumos energéticos dos espaços em análise.

Recorreu-se ao programa *DesignBuilder* para efetuar as simulações deste estudo.

Numa primeira fase analisou-se a temperatura interior dos gabinetes sem qualquer sistema de climatização. Após esta análise, incorporou-se PCM nos elementos construtivos dos gabinetes e observou-se as possíveis modificações da temperatura interior dos espaços. Verificou-se que, apesar de a temperatura interior diminuir com a introdução do PCM, não se atingem as temperaturas de conforto estabelecidas, havendo necessidade de inserir um equipamento de arrefecimento. Ao inserir este equipamento constatou-se uma descida da temperatura interior para as temperaturas de conforto. Posteriormente, analisaram-se os consumos energéticos verificando-se uma diminuição significativa dos mesmos com a incorporação dos PCM. Esta diminuição levou a uma poupança energética de cerca de 30% para os dois gabinetes estudados. Apesar desta poupança, os custos da incorporação dos PCM ainda são elevados face ao retorno esperado.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais de Mudança de Fase, armazenamento térmico, energia, calor latente, FEUP.

ABSTRACT

In an excessive and constant usage of natural resources, an adoption of mechanisms and measures for non-renewable resources management has emerged as a social need.

The sector currently consuming the most energy worldwide is civil construction. This has made the adaptation to sustainable measures required for this industry. One of the options for this reduction is the introduction of Phase Change Material (PCM) in the constructions. Over the years this material has peaked the interest of the scientific community due to its large capacity for heat storage.

This paper focuses on the study of the effects of the introduction of PCM in two offices in the G building of the Faculty of Engineering of University of Porto. The areas under study high energy gains in the cooling season, either due to internal heat production or due to the building's architecture, with south-facing sash cabinets and walls, floor and roofs in contact with the exterior.

To execute the simulations of this study was used the *DesignBuilder* program.

In a first phase it was analyzed the internal temperature of the offices without any climate system turned on. After this analysis, the PCM was incorporated into the constructive elements of the offices and detected the temperature alteration inside the office. It was recognized that the indoors temperature with the introduction of PCM does not reach the settled comfort temperatures, so there was a need to insert a cooling system. When implanting this equipment, the temperature decreases to the comfort temperatures. Afterwards, the energetic consumes were analyzed and showed a significantly drop with the integration of the PCM, that resulted in energy saving of around 30% for the two cabinets studied. Despite these savings, the costs of incorporating PCM are still high compared to the expected return.

KEYWORDS: Phase Change Materials, thermal storage, energy, latent heat, FEUP.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE	3
2.1. ENQUADRAMENTO BREVE.....	3
2.2. DEFINIÇÕES E CONCEITOS	4
2.3. CLASSES, CATEGORIAS E PROPRIEDADES DOS PCM	7
2.4. PCM COM CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS ADEQUADAS À CONSTRUÇÃO.....	10
2.5. INCORPORAÇÃO DOS PCM NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	13
2.5.1. IMPREGNAÇÃO	13
2.5.2. IMERSÃO	13
2.5.3. ENCAPSULAMENTO	14
2.5.3.1. Macroencapsulação	14
2.5.3.2. Microencapsulação	14
2.6. MATERIAIS E COMPONENTES DA CONSTRUÇÃO COM PCM.....	15
2.6.1. COMPONENTES UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL	16
2.6.1.1. Blocos de Betão.....	16
2.6.1.2. Tijolos.....	16
2.6.1.3. Argamassa.....	16
2.6.2. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	16
2.6.2.1. Elementos de Betão.....	16
2.6.2.2. Painéis de Gesso Cartonado.....	17
2.6.2.3. Pavimentos Radiantes	18
2.6.2.4. Tetos Falsos	18
2.6.2.5. Ladrilhos Cerâmicos	19
2.6.2.6. Envidraçados e Portadas	20
2.6.2.7. Paredes de Trombe	21
2.6.2.8. Painéis de Isolamento Térmico	21
2.7. COMENTÁRIO SÍNTESE.....	21
3 RESOLUÇÃO NUMÉRICA – DESINGBUILDER.....	23

3.1. INTRODUÇÃO	23
3.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR	23
3.2.1. CONCEITOS ASSOCIADOS À TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	23
3.2.1.1. Condução	23
3.2.1.2. Convecção.....	24
3.2.1.3. Radiação	26
3.2.1.4. Temperatura Fictícia Ar-Sol.....	Erro! Marcador não definido.
3.2.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR NOS PCM	28
3.3. RESOLUÇÃO NUMÉRICA.....	28
3.3.1. RESOLUÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR	28
3.3.2. MODELO TEÓRICO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	29
3.3.3. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA	30
3.3.3.1. Explicação do Software EnergyPlus	31
3.3.3.2. Resolução Numérica da Transferência de Calor nos PCM	32
3.4. COMENTÁRIO SÍNTESE.....	35
4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA: DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO E DE CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO.....	37
4.1. INTRODUÇÃO	37
4.2. CASO DE ESTUDO.....	38
4.2.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA	38
4.2.2. EDIFÍCIO G: DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL	39
4.2.2.1. Caracterização do Edifício.....	39
4.2.2.2. Sistemas de Climatização dos Compartimentos da Ala Este	41
4.3. DESIGNBUILDER.....	42
4.3.1. BREVE EXPLICAÇÃO SOBRE O PROGRAMA.....	42
4.3.2. MODELAÇÃO DO EDIFÍCIO	45
4.4. INTRODUÇÃO DE DADOS NO PROGRAMA.....	48
4.4.1. PORMENORES CONSTRUTIVOS.....	48
4.4.2. GANHOS INTERNOS DE ENERGIA.....	50
4.4.3. CLIMATIZAÇÃO DOS GABINETES	51
4.4.4. TEMPERATURA NO INTERIOR DO EDIFÍCIO	52
4.5. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO	52
4.5.1. ZONAS A SIMULAR.....	52
4.5.2. OPÇÕES AVANÇADAS DE SIMULAÇÃO	52
4.5.3. HIPÓTESES DE SIMULAÇÃO	54
4.5.3.1. Introdução de PCM nos Elementos Construtivos	54

4.6. COMENTÁRIO SÍNTESE.....	56
5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA: ANALÍSE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	57
5.1. INTRODUÇÃO.....	57
5.2. SIMULAÇÕES.....	57
5.2.1. SIMULAÇÃO Nº1: GABINETE 137 NAS SUAS CONDIÇÕES REAIS	57
5.2.2. SIMULAÇÃO Nº2: GABINETE 137 COM EQUIPAMENTO DE ARREFECIMENTO	59
5.2.3. CONSUMOS ENERGÉTICOS DO GABINETE 137	61
5.2.4. SIMULAÇÃO Nº3: GABINETE 144 NAS SUAS CONDIÇÕES REAIS	62
5.2.5. SIMULAÇÃO Nº4: GABINETE 144 COM EQUIPAMENTO DE ARREFECIMENTO	64
5.2.6. CONSUMOS ENERGÉTICOS DO GABINETE 144.....	66
5.2.7. CONSUMOS ENERGÉTICOS DA ALA ESTE	66
5.2.8. ANÁLISE FINANCEIRA.....	67
5.2.9. IMPORTÂNCIA DA TEMPERATURA DE FUSÃO	68
5.3. COMENTÁRIO SÍNTESE.....	69
6 SÍNTESE, CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	71
6.1. SÍNTESE E CONCLUSÕES.....	71
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXO A: FOLHAS DE ESPECIFICAÇÕES DE ALGUNS PCM.....	A
ANEXO B: INFORMAÇÕES DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS DOS GABINETES RETIRADOS DO DESIGBUILDER.....	B

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ciclo de fusão/ solidificação da água	3
Figura 2.2 – Estados físicos da água e a sua estrutura molecular.....	6
Figura 2.3 - Diagrama ilustrativo sobre as fases da água (Sá, 2012).	7
Figura 2.4 - Classificação dos Materiais de Mudança de Fase (PCM) (Abhat, 1983).....	8
Figura 2.5 - Distribuição das diferentes categorias de PCM em função da entalpia e temperatura de fusão (adaptado de (Dieckmann, 2008; Sá, 2012))......	8
Figura 2.6 - Macrocápsulas de materiais de mudança de fase (Sá, 2012).....	14
Figura 2.7 - Microcápsulas para materiais de mudança de fase: (a) microcápsula esférica; (b) PCM micro encapsulados em solução aquosa; (c) PCM micro encapsulados em pó (Castilho, 2014).....	15
Figura 2.8 - Ilustração de um corte de bloco cerâmico contendo PCM macroencapsulado (adaptado de (Alawadhi, 2008))......	Erro! Marcador não definido.
Figura 2.9 - Representação esquemática de um pavimento radiante com PCM (adaptado de (Lin et al., 2007; Sá, 2012))	18
Figura 2.10 - Representação esquemática de tetos falsos com PCM - representação diurna; direita (Sá, 2012; Tyagi e Buddhi, 2007)	19
Figura 2.11 - Representação esquemática de tetos falsos com PCM - representação noturna (Sá, 2012; Tyagi e Buddhi, 2007)	19
Figura 3.1 - Condução de calor através de um sólido (Lisboa Técnico).....	24
Figura 3.2 - Convecção de uma superfície para um fluido em movimento.....	25
Figura 3.3 - Convecção de ar por efeito do funcionamento de ar-condicionado (EducaBras, 2018)....	25
Figura 3.4 - Tipos de radiação solar (Energia Heliotérmica, 2019).	28
Figura 3.5 - Níveis de discretização espacial de um edifício (Woloszyn, 1999).	30
Figura 3.6 - Estrutura do <i>EnergyPlus</i> (Crawley et al., 2002).....	32
Figura 4.1 - Divisão do 1º piso do Edifício G em 3 alas (DesignBuilder, 2019).	37
Figura 4.2 - Campus da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (edifício G a vermelho) (FEUP, 2019).....	38
Figura 4.3 - Alçados do Edifício G com descrição de medidas (em metros).	39
Figura 4.4 - Compartimentos da Ala Este do 1º piso do Edifício G (DesignBuilder, 2019).	40
Figura 4.5 - Tela de trabalho do <i>DesignBuilder</i> quando o nível "Sitio" está selecionado (DesignBuilder, 2019).	44
Figura 4.6 - Tela de trabalho do <i>DesignBuilder</i> quando o nível "Edifício" está selecionado (DesignBuilder, 2019).	44
Figura 4.7- Modelação do edifício G na totalidade e da parte em estudo (Ala Este), respetivamente (DesignBuilder, 2019).	45

Figura 4.8 - Distribuição espacial da Ala Este com os diferentes compartimentos (DesignBuilder, 2019).	46
Figura 4.9 - Diferentes posições solares no dia 29 de janeiro (DesignBuilder, 2019).....	47
Figura 4.10 - Diferentes posições solares no dia 5 de Agosto (DesignBuilder, 2019).	48
Figura 4.11 - Opções de calculo feitas no <i>DesignBuilder</i> (DesignBuilder, 2019).....	54
Figura 5.1 – Temperatura Operativa do Gabinete 137, com a temperatura operativa média assinalada a vermelho.....	58
Figura 5.2 – Temperatura Operativa do Gabinete 137 para os dias 6 e 7 de Agosto.....	58
Figura 5.3 – Temperaturas Operativas do Gabinete 137 com PCM e sem PCM nos dias 6 e 7 de Agosto.	59
Figura 5.4 – Temperatura Operativa do Gabinete 137 com sistema de arrefecimento, com a temperatura operativa média assinalada a vermelho.....	60
Figura 5.5 – Temperatura Operativa do Gabinete 137 sem PCM e com sistema de arrefecimento.	60
Figura 5.6 – Temperaturas Operativas do Gabinete 137 com PCM e sem PCM com sistema de arrefecimento nos dias 6 e 7 de Agosto.....	61
Figura 5.7 - Temperaturas Operativas do Gabinete 137 com PCM, mudando a entalpia, e sem PCM com sistema de arrefecimento nos dias 6 e 7 de Agosto.	61
Figura 5.8 – Consumos energéticos do Gabinete 137, para a semana de 5 a 11 de Agosto.	62
Figura 5.9 – Temperatura Operativa do Gabinete 144, com a temperatura operativa média assinalada a vermelho.....	62
Figura 5.10 – Temperatura Operativa do Gabinete 144 para os dias 6 e 7 de Agosto.....	63
Figura 5.11 – Temperaturas Operativas do Gabinete 144 com PCM e sem PCM nos dias 6 e 7 de Agosto.	63
Figura 5.12 – Temperatura Operativa do Gabinete 144 com sistema de arrefecimento, com a temperatura operativa média assinalada a vermelho.....	64
Figura 5.13 – Temperatura Operativa do Gabinete 144 sem PCM e com sistema de arrefecimento...	64
Figura 5.14 – Temperaturas Operativas do Gabinete 144 com PCM e sem PCM com sistema de arrefecimento nos dias 6 e 7 de Agosto.....	65
Figura 5.15 – Temperaturas Operativas do Gabinete 144 com PCM, mudando a entalpia, e sem PCM com sistema de arrefecimento nos dias 6 e 7 de Agosto.	66
Figura 5.16 – Consumos energéticos do Gabinete 144, para a semana de 5 a 11 de Agosto.	66
Figura 5.17 - Consumos energéticos da Ala Este, para a semana de 5 a 11 de Agosto.	67
Figura 5.18 - Temperaturas Operativas do Gabinete 144 com e sem PCM com sistema de arrefecimento, com $T_{fusão}$ de 29°C, nos dias 6 e 7 de Agosto.....	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Propriedades de alguns materiais de construção convencionais e materiais de mudança de fase: condutibilidade térmica, massa volúmica, calor específico e calor específico volumétrico (Coelho, 2016; DesignBuilder, 2019; Mendonça, 2005; Sá, 2012; Santos e Matias, 2006).....	5
Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens das misturas orgânicas, inorgânicas e eutéticas (Zhou, Zhao e Tian, 2012).....	9
Tabela 2.3 - Propriedades relevantes na seleção dos PCM adequados à construção (Sá, 2012; Zalba et al., 2003).....	10
Tabela 2.4 - Tabela de critérios de avaliação de PCM (Martins, 2017).....	11
Tabela 2.5 - PCM com características térmicas adequadas à aplicação no interior dos edifícios (Zhou, Zhao e Tian, 2012).....	12
Tabela 2.6 – PCM disponíveis no mercado, com características térmicas adequadas à aplicação no interior dos edifícios.	13
Tabela 4.1 - Composição dos diferentes elementos da ala Este do Edifício G (do interior para o exterior).	40
Tabela 4.2 – Área do pavimento útil e dos vão envidraçados (DesignBuilder, 2019).	46
Tabela 4.3 – Composição dos elementos construtivos introduzidos no <i>DesignBuilder</i> (DesignBuilder, 2019).	49
Tabela 4.4 – Valores de densidade de ocupantes, metabólicos e ganhos energéticos retirados do <i>DesignBuilder</i> (DesignBuilder, 2019).	51
Tabela 4.5 – Características do PCM para simulações dos gabinetes 137 e 144, indicando se é utilizado ou não sistemas de climatização.	55
Tabela 4.6 - Composição dos elementos construtivos com PCM incorporado.....	55
Tabela 5.1 – Preço de PCM em €/Kg (Kosny, Shukla e Fallahi, 2013)	67
Tabela 5.2 – Preço de PCM em €/m ² (Kosny, Shukla e Fallahi, 2013).....	68

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS

Símbolo	Unidade	Designação
λ	W/(m.K)	Condutibilidade térmica
c_p	J/(kg.K)	Calor específico
C	J/(m ³ .K)	Calor específico volumétrico
α_T	m ² /s	Difusibilidade térmica
ρ	kg/m ³	Massa volúmica
H	J/kg	Entalpia
L	J	Calor latente
T	°C	Temperatura
t	s	Tempo
$\dot{Q}$	W/m ³	Taxa de geração de energia por unidade de volume
q''	W/m ²	Fluxo convectivo de calor por unidade de área
h_{conv}	W/(m ² .K)	Coeficiente de transferência de calor por convecção
T_s	°C	Temperatura da superfície
T_f	°C	Temperatura do fluido
E	W/m ²	Radiância
ε	-	Emissividade (capacidade de emissão da radiação)
σ	W/(m ² .K ⁴)	Constante de Stefan-Boltzmann
G	W/m ²	Irradiação
α_s		Coeficiente de absorção solar
h_r	W/(m ² .K)	Coeficiente de transferência de calor por radiação
T_m	°C	Temperatura média entre a superfície e o meio

1 INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios da sociedade atual prende-se com a preservação e sustentabilidade ambiental, dado o extenso e contínuo esgotamento de recursos naturais.

Entre os diferentes setores da indústria, o setor da construção é dos que mais contribui para este consumo desajustado. Só em 2009, cerca de 40% da energia fóssil foi consumida por este setor nos Estados Unidos e na União Europeia, dada a conceção de projetos de obra não sustentáveis (Zalba et al., 2003).

Acompanhando os outros sectores, tem havido um maior investimento na utilização de energias renováveis na construção. A utilização de painéis solares fotovoltaicos contribuiu para esse aumento. No entanto, a passagem para a utilização deste tipo de energias, neste setor, tem sido um processo moroso, devido aos elevados custos associados. O facto de uma obra ser única implica a necessidade de estudos térmicos específicos para cada projeto, para que se averiguem quais as medidas a aplicar para que a obra se torne sustentável. Isto é algo que, o dono de obra, na maioria das vezes, não está disposto a pagar.

Atualmente, tende-se a optar por uma construção simples e rápida, com intuito de reduzir custos. No entanto, o simples e o rápido trazem sempre inconvenientes associados, como a vulnerabilidade a flutuações térmicas, tendo que se recorrer a sistemas energéticos para uma melhoria do conforto para os seus utilizadores. Estes sistemas para além de consumirem muita energia, dão uma grande despesa monetária. É neste âmbito que se introduzem os Materiais de Mudança de Fase.

Os Materiais de Mudança de Fase ou *Phase Change Materials* (PCM), têm vindo a ser testados ao longo dos anos, sendo uma solução de energia renovável que tem despertado interesse no comercial em alternativa ou complemento aos equipamentos que consomem recursos naturais.

A utilização deste tipo de materiais já foi estudada nas mais variadas áreas, como a têxtil e a alimentar, neste trabalho explorou-se a sua aplicação na construção.

Os PCM, têm um funcionamento diferente dos materiais de construção convencionais pois possuem uma grande capacidade de armazenamento térmico. Inicialmente, estes materiais, comportam-se como um material corrente, no entanto, quando atingem a sua temperatura de fusão, no momento da mudança de fase, conseguem absorver e libertar uma grande quantidade de energia. Ao aplicar estes materiais nas construções, estes provocarão uma redução dos picos de temperatura e uma diminuição das flutuações térmicas. Possuem temperaturas de fusão próximas das temperaturas de conforto exigidas aos espaços interiores (20°C ou 25°C). Estes materiais funcionam como um complemento aos sistemas de aquecimento/arrefecimento, para que assim se consigam reduzir os consumos energéticos e os custos associados a estes.

1.2. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste estudo é verificar se a aplicação de materiais de mudança de fase tem efeito nos consumos energia de dois gabinetes de um edifício na estação de arrefecimento.

Este trabalho consiste numa simulação numérica de gabinetes de professoras do Edifício G, da faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, executada no programa *DesignBuilder*.

Procurou-se um PCM adequado aos espaços estudados, o que implicou um estudo da temperatura de fusão, da entalpia de fusão e da localização mais apropriadas para o sistema construtivo.

No que diz respeito às análises, foram efetuadas simulações do efeito do PCM com e sem sistema de arrefecimento. Os resultados das mesmas foram analisados com base no comportamento térmico dos gabinetes e nos consumos de energia dos mesmos. Observaram-se as diferenças de temperatura e de consumos energéticos provocados pelos equipamentos de refrigeração nos espaços com e sem PCM. Por fim, tomando por referência alguns dos PCM existentes no mercado, foi realizada uma análise do retorno financeiro da aplicação de PCM num dos gabinetes em estudo.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho encontra-se estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Apresentação dos objetivos deste trabalho e breve explicação do conteúdo dos diferentes capítulos.
- Capítulo 2 – Estado de arte relativo ao tema dos materiais de mudança de fase. Num primeiro momento é explicado o que são os PCM e os conceitos associados a estes. De seguida são descritas as classes, categorias e propriedades dos mesmos, dando-se exemplo de alguns PCM existentes. Discutem-se ainda as vantagens e desvantagens deste tipo de materiais. Por último, são exemplificadas as diferentes maneiras de incorporação destes materiais, assim como os exemplos de materiais ou componentes de edifícios já existentes.
- Capítulo 3 – Breve explicação sobre transferências de calor e como estas se processam nos materiais convencionais e nos PCM. Apresentação de vários simuladores numéricos e breve descrição do modo de funcionamento do simulador *EnergyPlus*.
- Capítulo 4 – Apresentação do trabalho a realizar, descrevendo-se as condições de estudo. Introdução ao programa *DesignBuilder*, breve explicação do mesmo e dados inseridos.
- Capítulo 5 – Apresentação dos resultados das simulações: Simulação com a constituição real do edifício, simulação adicionando PCM, simulação com ar condicionado, simulação com ar condicionado e PCM. Verificação das temperaturas e dos gastos energéticos. Por fim, breve análise económica à incorporação de PCM no edifício em estudo.
- Capítulo 6 – Síntese crítica, principais conclusões e desenvolvimentos futuros.

2

CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

2.1.ENQUADRAMENTO BREVE

Os Materiais de Mudança de Fase, mais conhecidos como *Phase Change Materials* (PCM) são materiais que possuem uma grande capacidade de armazenar energia sob forma de calor latente, sendo esta a principal característica que os distingue dos materiais de construção convencionais (Lane, 1983). O calor latente denomina-se como o calor gerado numa mudança de fase reversível ao longo da qual ocorre o armazenamento de energia térmica.

Este fenómeno acontece devido à flutuação da temperatura ambiente. Com o aumento de temperatura há uma quebra de ligações químicas do PCM, dando-se a passagem do seu estado sólido ao líquido. Esta é uma reação endotérmica em que o material absorve o calor fornecido. Quando a temperatura desce, o PCM volta ao estado sólido libertando o calor absorvido e armazenado anteriormente. Pode-se observar este fenómeno na figura seguinte (Figura 2.1) (Sá, 2012).

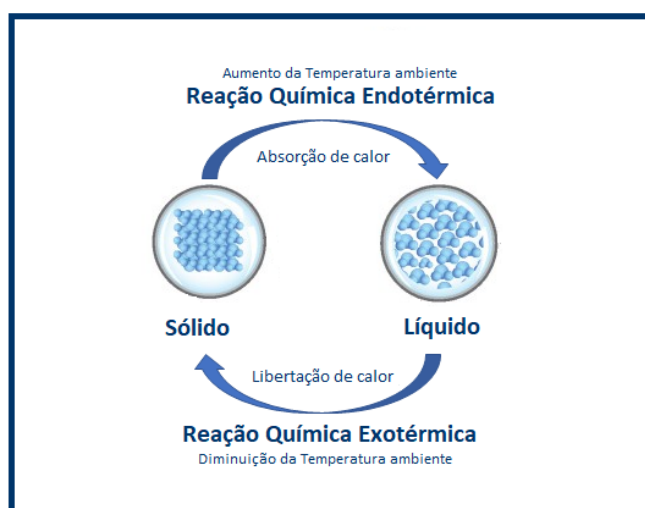


Figura 2.1 – Ciclo de fusão/ solidificação da água

Estes materiais libertam e absorvem energia muito mais eficazmente do que os materiais de construção comuns conseguindo, assim, controlar a temperatura ambiente de um determinado espaço (Hawes, Feldman e Banu, 1993), e fazer com que esta seja muito próxima das temperaturas de conforto exigidas (entre os 20° e os 25°). Isto acontece, pois, a temperatura de fusão (momento em que ocorre a mudança de fase do PCM) deste tipo de materiais encontra-se dentro do intervalo de temperaturas de conforto.

Em relação à aplicação destes materiais em edifícios, existem dois tipos de aplicações: sistemas ativos (como pavimentos radiantes elétricos) e sistemas passivos (como paredes, tetos e portadas). O que difere nestes dois sistemas é a forma como a libertação de calor ocorre para o interior de um determinado espaço. No sistema ativo, é libertado calor em determinados momentos, de maneira a que o recurso à energia seja somente feito em períodos de baixo custo energético, como por exemplo, durante o período noturno, já no sistema passivo o PCM incorporado liberta o calor acumulado conforme as variações térmicas do edifício (Khudhair, 2004; Tyagi e Buddhi, 2007).

2.2. DEFINIÇÕES E CONCEITOS

Neste ponto, para uma melhor percepção deste trabalho, serão apresentados alguns conceitos chave que estão por detrás de todos os materiais, ou seja, propriedades e características que cada um contem e que os diferenciam. Cada material possui uma capacidade de armazenamento de calor, que varia de acordo com as suas propriedades, efetuando, posteriormente, a reposição desse calor armazenado ao meio.

Os conceitos a destacar são, nomeadamente, a condutibilidade térmica, a massa volúmica, o calor específico, o calor específico volumétrico, a difusibilidade térmica e a entalpia. Os mesmos são descritos, em detalhe, abaixo.

A condutibilidade térmica é denominada pela quantidade de calor, por unidade de tempo, que atravessa uma espessura unitária (m) de um material, quando entre duas faces planas e paralelas se estabelece uma diferença unitária de temperatura (1°C ou 1 K). É representada por um λ e expressa-se em W/(m.K).

Por sua vez, a massa volúmica é a relação entre a massa de um corpo e o volume ocupado por este. É representada por ρ e expressa-se em kg/m³.

Quanto ao calor específico, representado por c_p (unidade J/(kg.K)), é definido como a quantidade de calor que deve ser fornecida para que uma unidade de massa, a pressão constante, eleve uma unidade de temperatura. Quanto maior o calor específico de um material, maior será a quantidade de calor a ser retirada ou fornecida para que ocorram variações de temperatura.

O calor específico volumétrico designa-se pela capacidade de armazenamento de energia de um material, geralmente é representado pela letra C. Esta propriedade resulta do produto da massa volúmica (ρ) pelo calor específico do material (c_p), $\rho.c_p$, exprimindo-se por J/(m³.K).

A difusibilidade térmica, designada por αT , traduz a relação entre a condutibilidade térmica (λ) e o calor específico volumétrico ($\rho.c_p$) ($\alpha T = \frac{\lambda}{\rho.c_p}$). Esta grandeza mede a capacidade de um material conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de a armazenar, ou seja, expressa a velocidade a que um corpo se ajusta integralmente à temperatura envolvente (Azenha, 2004). Materiais cujo seu αT é elevado respondem rapidamente a alterações térmicas do meio, como é o caso dos metais. Os materiais com αT mais baixo respondem mais lentamente, como é o caso da cortiça e do poliestireno extrudido (XPS).

Na Tabela 2.1, estão descritas as propriedades, mencionadas anteriormente, de alguns materiais de construção tradicionais e de alguns Materiais de Mudança de Fase (Coelho, 2016; DesignBuilder, 2019; Mendonça, 2005; Sá, 2012; Santos e Matias, 2006).

Tabela 2.1 Propriedades de alguns materiais de construção convencionais e materiais de mudança de fase: condutibilidade térmica, massa volúmica, calor específico e calor específico volumétrico (Coelho, 2016; DesignBuilder, 2019; Mendonça, 2005; Sá, 2012; Santos e Matias, 2006)

Materiais de construção tradicionais					
Material		Condutibilidade térmica λ [W/ (m.K)]	Massa volúmica ρ [kg/m³]	Calor específico c_p [kJ/(kg.K)]	Calor específico volumétrico $\rho \cdot c_p$ [kJ/ (m³.K)]
Água (T=10°C)		0,6	1000	4,181	4181
Ar (T=20°C)		0,025	1,23	1,012	1,245
Betão		1,65	2000 – 2300	0,880	1760 – 2024
(Betões normais)		2,00	2300 – 2600	1,040	2392 – 2704
Argamassa		1,3	1800 – 2000	1,000	1800 – 2000
(rebocos tradicionais)		1,8	>2000	1,046	>2092
Cerâmica (tijolo, telhas, ladrilhos)		0,6	1400 – 1600	0,840	1176 – 1344
Isolantes térmicos	EPS	0,04	15 – 20	1,550	15,83 – 21,10
	XPS	0,037	25 – 40	1,045	26,13 – 41,80
Madeira (madeiras densas)		0,23	750 – 870	1,500 – 2,500	1125 – 2050
Vidro (vidro quartzo)		1,4	2200	0,840	1848
Pedras naturais	Granito	2,8	2500 - 2700	0,790	1975 – 2133
Rochas calcárias	Mármore	3,5	2600 – 2800	0,830	2158 – 2324
	Pedras calcárias (densas)	1,4	1800 – 2000	0,810	1458 – 1612
Materiais Mudança de Fase – PCM					
Material		Condutibilidade térmica λ [W/ (m.K)]	Massa volúmica ρ [kg/m³]	Calor específico c_p [kJ/(kg.K)]	Calor específico volumétrico $\rho \cdot c_p$ [kJ/ (m³.K)]
RT22HC (Parafina)		0,2	700 (Sólido a 20°C)	2	1400
BioPCM M27/Q25 (PCM orgânico)		0,2	235	1,97	462,95

As substâncias podem ser encontradas na natureza em três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. Estas podem também ser conhecidas por fases da matéria. A diferença entre estas três fases, ou estados, está nas suas características moleculares, quando um material sofre uma mudança de temperatura a sua estrutura molecular altera-se até atingir um novo estado. A matéria pode apresentar-se em qualquer estado físico, dependendo dos fatores de pressão e temperatura a que está sujeita.

A Figura 2.2 exemplifica os três estados físicos da água e ilustra a estrutura molecular de cada um deles.



Figura 2.2 – Estados físicos da água e a sua estrutura molecular

Como se pode ver na figura descrita em cima (Figura 2.2), a estrutura molecular no estado sólido é forte, as moléculas encontram-se bem unidas possuindo forma própria. Já no estado líquido, as moléculas apresentam uma menor união e uma maior agitação, tendo uma forma variável e volume constante. Estas não apresentam uma estrutura molecular bem definida pois as moléculas encontram-se separadas. No estado gasoso, as partículas que formam a matéria apresentam uma maior movimentação, pois as forças de coesão são pouco intensas. Neste estado as substâncias apresentam forma e volume variáveis.

Estes conceitos são facilmente explicados com uma substância muito conhecida, a água. A água pode existir nos três estados físicos descritos acima. Se esta estiver no estado líquido e for aquecida, irá passar ao estado gasoso, formando assim vapor de água. Por outro lado, se for arrefecida, passa ao estado sólido originando gelo. No entanto, este processo também pode acontecer de maneira contrária, ou seja, a água no estado sólido ao ser aquecida passar a estado líquido, esta passagem (sólido para líquido) é uma reação endotérmica, designando-se por fusão. Este conceito pode ser explicado com um simples cubo de gelo de massa, temperatura e pressão conhecidas. Quando expomos o cubo de gelo ao calor a uma pressão constante, o seu volume específico aumenta ligeiramente aumentando também a sua temperatura até aos 0°C, momento em que o gelo se funde (mantendo-se a temperatura constante nos 0°C). A este acontecimento dá-se o nome de ponto de fusão, neste ponto todo o calor fornecido é utilizado para que a mudança dos estados físicos ocorra, dando-se assim a passagem da água no estado sólido para o estado líquido. Quando a mudança de fase termina o calor continua a ser transmitido até que a temperatura da água fique homogênea.

Para que a fusão do gelo ocorra por completo é necessário fornecer-lhe 334 kg/kJ de energia. Após a fusão do gelo, qualquer energia ou calor extra transmitido provocará um aumento de temperatura até aos 100°C (temperatura de ebulição), passando a água do estado líquido para o estado gasoso. O calor fornecido à água na temperatura de fusão (a 0°C) só será repostado após um decréscimo de temperatura, ou seja, quando a água passar do estado líquido para sólido, isto traduz uma reação exotérmica onde o calor armazenado anteriormente é libertado.

A figura seguinte (Figura 2.3), ilustra o processo de mudança de estado físico na água e, tal como é representado neste diagrama, é necessária uma quantidade muito grande de energia. À quantidade total de energia utilizada na mudança de fase dá-se o nome de entalpia de mudança de fase ou entalpia, esta representa-se pela letra H e expressa-se na unidade joule (J).

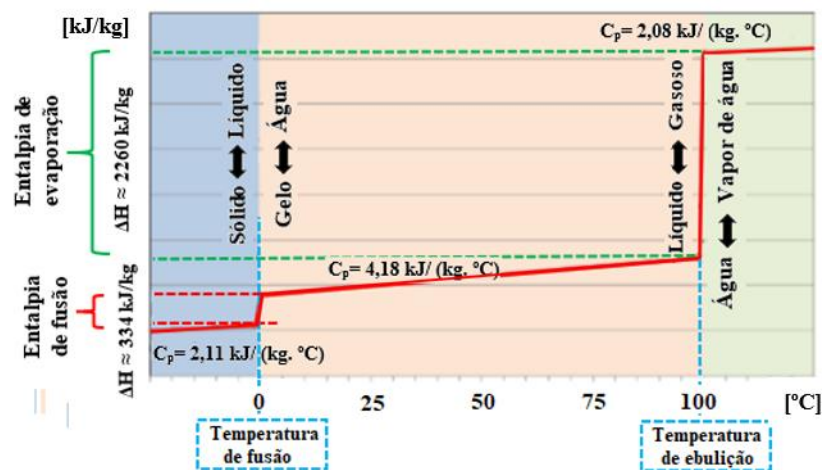


Figura 2.3 - Diagrama ilustrativo sobre as fases da água (Sá, 2012).

Na análise do diagrama apresentado a cima (Figura 2.3), destaca-se que existem cinco retas que ilustram as transformações de estados. Três retas, de declive pouco acentuado, traduzem o conceito de calor sensível, ou seja, a quantidade de calor associado ao calor específico do material (c_p), já as outras duas retas, de declive mais acentuado, traduzem o calor latente, isto é, a quantidade de calor associado à mudança de fase.

Para a indústria da construção só os materiais de mudança de fase sólido – líquido e líquido - sólido apresentam interesse. A estas mudanças de fase estão associadas reações endotérmicas e reações exotérmicas respetivamente.

2.3. CLASSES, CATEGORIAS E PROPRIEDADES DOS PCM

Como foi dito anteriormente, os materiais de mudança de fase utilizados na construção são aqueles que efetuam a transição entre o estado sólido e o estado líquido. Estes materiais podem ser divididos em três categorias: orgânicos e inorgânicos, podendo ainda estas serem subdivididas em diferentes misturas. Na categoria dos orgânicos, as misturas podem ser de parafinas ou de ácidos gordos, enquanto na dos inorgânicos, são de sais hidratados. As misturas eutéticas são comuns às duas categorias, podendo-se dividir em orgânicos-orgânicos, orgânicos-inorgânicos, inorgânicos-inorgânicos. Esta classificação foi feita por Abhat (1983) e está descrita na figura seguinte (Figura 2.4).

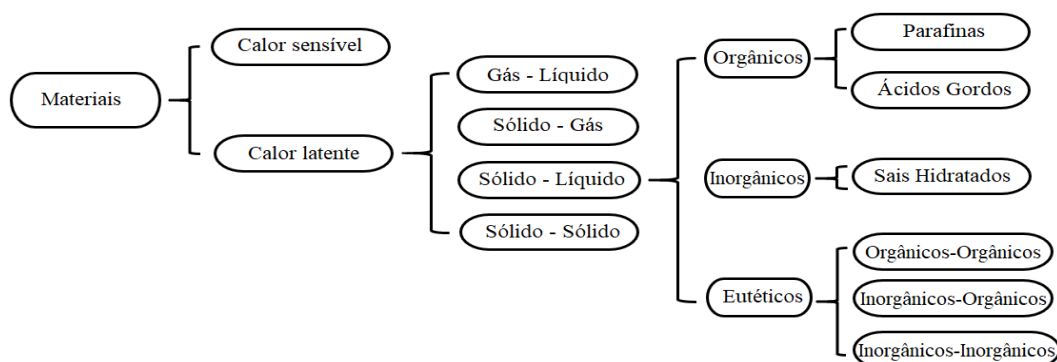


Figura 2.4 - Classificação dos Materiais de Mudança de Fase (PCM) (Abhat, 1983).

O calor sensível está associado aos materiais de construção tradicionais, enquanto que o calor latente está associado aos PCM. Todas as categorias mencionadas acima possuem uma gama de entalpias e um gama de temperaturas de fusão associado. Estas gamas são representadas na figura seguinte (Figura 2.5).

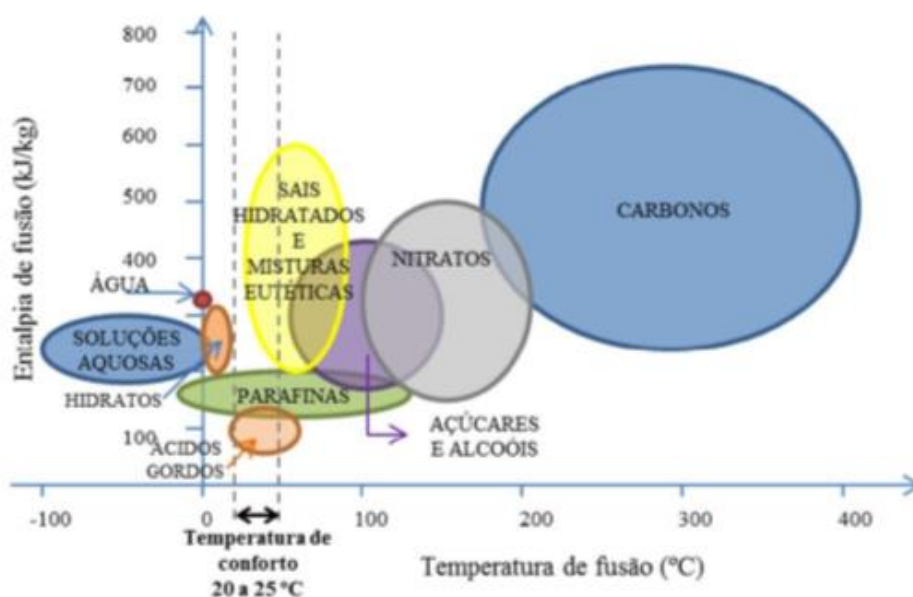


Figura 2.5 - Distribuição das diferentes categorias de PCM em função da entalpia e temperatura de fusão (adaptado de (Dieckmann, 2008; Sá, 2012)).

Pela observação da Figura 2.5 pode-se constatar que as parafinas, os ácidos gordos, os sais hidratados e as misturas eutéticas apresentam temperaturas de fusão dentro do intervalo da temperaturas de conforto (entre os 20°C e os 25°C), o que significa que estas são as que mais se adequam à construção. Também se pode observar que os sais hidratados e as misturas eutéticas apresentam maior entalpia de fusão, o que se constitui como uma vantagem sobre as outras substâncias, no entanto são as parafinas que possuem as características mais adequadas para a aplicação em edifícios, tornando esta aplicação mais vantajosa e eficiente.

Os materiais orgânicos de mudança de fase são geralmente quimicamente estáveis, são não-corrosivos e permitem uma reversibilidade na transição de fase (Baetens, Jelle e Gustavsen, 2010). Estes podem ser classificados como parafinas e não parafinas. Por sua vez, os materiais inorgânicos têm melhor condutibilidade térmica e são não-inflamáveis, contudo são corrosivos e sofrem sobrearrefecimento (Zhou, Zhao e Tian, 2012). A esta categoria estão associados os sais hidratados que são uma combinação de sais e água. Quanto às misturas eutéticas, são designadas como a combinação de dois ou mais PCM que derretem e congelam sem segregação (Sharma et al., 2009). Estas apresentam uma temperatura de fusão/solidificação parecida com a da água (substâncias puras).

Como todas as substâncias, cada categoria mencionada possui um conjunto de vantagens e um conjunto de desvantagens de utilização. Zhou, Zhao e Tian (2012) elaboraram um quadro síntese destas vantagens e desvantagens relacionadas às diferentes categorias de PCM (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens das misturas orgânicas, inorgânicas e eutéticas (Zhou, Zhao e Tian, 2012).

Materiais			
	Orgânicas	Inorgânicas	Eutéticas
Vantagens	• Disponíveis numa gama alargada de temperaturas de fusão. • Elevada entalpia de fusão. • Baixo ou nenhum sobre-arrefecimento. • Estabilidade química. • Recicláveis. • Boa compatibilidade com outros materiais.	• Elevada entalpia de fusão. • Melhor condutibilidade térmica ($\lambda \approx 0,5 \text{ W/(m.K)}$). • Reduzida variação de volume • Baixo custo.	• Temperatura de fusão bem definida. • Elevada capacidade de armazenamento de calor. • Elevada entalpia de fusão.
Desvantagens	• Condutibilidade térmica baixa ($\lambda \approx 0,2 \text{ W/(m.K)}$). • Alteração do volume. • Inflamável.	• Sobre-arrefecimento • Corrosão • Segregação nos processos de fusão e solidificação	• Custo elevado • Necessidade de mais informação comprovada cientificamente

Infelizmente, nem todos os PCM se adequam à construção. Apenas um conjunto deles são eficientes na aplicação em edifícios. A tabela seguinte (Tabela 2.3) contém as características necessárias para que a sua aplicação seja vantajosa.

Tabela 2.3 - Propriedades relevantes na seleção dos PCM adequados à construção (Sá, 2012; Zalba et al., 2003)

Propriedades			
Térmicas	Físicas	Químicas	Económicas
• Temperatura de fusão/solidificação – próxima da temperatura de conforto. • Entalpia elevada. • Condutibilidade térmica (nas fases sólida e líquida) elevada. • Calor específico e massa volúmica elevadas	• Calor específico e massa volúmica elevadas. • Variação da massa volúmica – reduzida. • Pressão de vapor durante a mudança de fase – reduzida. • Mudança de fase uniforme na passagem de sólido/líquido e de líquido/sólido.	• Estabilidade química. • Reversibilidade na passagem de sólido/líquido e de líquido/sólido. • Duráveis – não apresentarem degradação ao fim de vários ciclos de fusão/solidificação • Não inflamáveis, não tóxicos e não poluentes	• Barato e abundante

De todas as propriedades apresentadas na Tabela 2.3, as térmicas são as mais relevantes pois são as propriedades decisivas na escolha do PCM apropriado à aplicação em edifícios.

A Norma ISO 7730:1993 refere que as condições de conforto higrétrico de inverno e de verão são atingidas quando as temperaturas operativas estão compreendidas entre os 20°C e 24°C e os 23°C e 26°C, respetivamente (Standardization, 1993). Tendo esta informação é necessário escolher um PCM com um intervalo de temperaturas de mudança de fase entre as temperaturas mencionadas anteriormente, para se conseguir obter a temperatura de conforto no interior dos edifícios. Apesar da importância da temperatura interior, não se pode ignorar a relevância da temperatura exterior, pois a temperatura de fusão/solidificação depende destas duas temperaturas (interior e exterior). Outras características relevantes a mencionar são: a capacidade de armazenamento de calor latente e sensível e a condutibilidade térmica, devendo estas ser elevadas (Sá, 2012). É fulcral que as estabilidades das características descritas anteriormente sejam garantidas a longo prazo, para evitar modificações nas propriedades térmicas dos PCM. O facto de serem submetidos a infínitos ciclos de fusão/solidificação pode provocar as tais modificações faladas. No que toma a estabilidade, foi provado que as misturas orgânicas são mais estáveis que as inorgânicas (Shukla, Buddhi e Sawhney, 2008).

2.4. PCM COM CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS ADEQUADAS À CONSTRUÇÃO

Como já foi mencionado anteriormente, nem todos os PCM são apropriados para os edifícios. Existe a necessidade de avaliar os materiais pelas suas características e propriedades, para que assim, seja possível identificar qual a melhor aplicação para cada caso.

Os PCM são utilizados na construção para se conseguir manter uma temperatura estável e confortável num compartimento. Num estudo feito em 1979, Jurinak e Abdel-Khalik, concluíram que a temperatura de fusão é a condição mais importante na escolha de um PCM do que o calor latente. Segundo estes autores, o calor latente pode ser controlado pela quantidade de PCM usado. Posteriormente, Peippo e colaboradores, em 1991, efetuaram um estudo que corroborou a informação publicado por Jurinak e Abdel-Khalik efetuaram o seu estudo na Finlândia, país onde as temperaturas são baixas no inverno. Estes autores estimaram que o PCM, incorporado em placas de gesso cartonado na superfície de paredes

interiores, seria ideal se a sua temperatura de fusão fosse entre 1°C e 3°C superior à temperatura média interior (Castilho, 2014).

Já Neeper (2000) defende que a temperatura de fusão ideal do PCM deve ser igualada à temperatura média do interior do compartimento em estudo. Conhecendo as temperaturas de conforto das estações de aquecimento e arrefecimento, e sabendo que temperatura de fusão do PCM depende das flutuações internas de temperatura, verifica-se que a temperatura de fusão deste material pode variar entre os 18°C e os 30°C.

A tabela que se segue (Tabela 2.4) apresenta uma análise das propriedades associadas aos PCM para uma seleção adequada dos mesmos.

Tabela 2.4 - Tabela de critérios de avaliação de PCM (Martins, 2017)

• Densidade do material	Para materiais mais densos correspondem menores volumes ocupados, para iguais respostas térmicas em relação a materiais menos densos.
• Calor específico latente	Inversamente proporcional à quantidade de massa a usar, i. e., quanto mais elevado o valor do calor específico, menor quantidade de material será necessário.
• Temperatura ou intervalo de temperaturas de mudança de fase	Os valores deste critério descartam ou aprovam o uso de certo material, pois, o conforto térmico deve ser garantido; para valores muito altos ou muito baixos este critério é preponderante na inviabilização do material.
• Estabilidade química e térmica	O PCM deve manter a sua composição química inalterada para milhares de ciclos, e para um alargado intervalo de temperaturas.
• Nível de toxicidade	De muito baixo valor, sendo o valor nulo o mais apropriado; para casos de vazamento do material não pode apresentar um risco para a saúde nem para o ambiente.
• Custo	Um ponto, que transversalmente, revoga o uso de variados PCM, é, geralmente, os custos elevados; deve-se avaliar o custo relativamente ao benefício objetivado, e não ao seu valor absoluto (o que reprovava diversos PCM).
• Reciclabilidade	No fim da vida útil do PCM, este, não pode acarretar impactos ambientais elevados; A possível reciclabilidade é real em muitos casos, principalmente para materiais de base orgânica.
• Facilidade de aplicação	O recurso a equipamentos específicos e complexos pode levar a que um dado PCM seja considerado não viável, apesar de respeitar os critérios previamente apresentados; o custo de instalação deve ser tido em conta neste critério.

Na tabela abaixo (Tabela 2.5) mostra uma listagem de materiais de mudança de fase, que se adequam à construção, mais precisamente ao interior dos edifícios, por apresentarem temperaturas de fusão próximas da temperatura de conforto requeridas para o interior.

Tabela 2.5 - PCM com características térmicas adequadas à aplicação no interior dos edifícios (Zhou, Zhao e Tian, 2012)

Designação do PCM	Classe	Temp. de fusão T[°C]	Entalpia de Fusão ΔH [kJ/kg]	Calor Específico c_p [kJ/(kg.K)]	Condutibilidade térmica λ [W/(m.K)]
Parafina C16-C18	O	20-22	152	-	-
Parafina C13-C24	O	22-24	189	0,21	0,21
Parafina C28	O	28	244	2,16	0,15
Butyl stearate	O	19	140	-	-
1-Dodecanol	O	26	200	-	-
n-Octadecane	O	28	200	-	-
Polyglycol E 600	O	22	127,2	-	0,189
45/55 Capric+lauric acid	EU-O	21	143	-	-
KF.4H ₂ O	INO	18,5	231	1,84 (s) 2,39 (l)	-
Mn(NO ₃).6H ₂ O	INO	25,8	125,9	-	-
CaCl ₂ .6H ₂ O	INO	29,7	171	1,45 (s)	-
CaCl ₂ .6H ₂ O + Nucleat + MgCl ₂ .6H ₂ O (2:1)	EU-INO	25	127	-	-
48% CaCl ₂ + 4.3% NaCl + 0.4%KCl + 47.3%H ₂ O	EU-INO	26,8	188	-	-

O – Mistura Orgânica
 INO – Mistura Inorgânica
 EU-O – Mistura Eutética Orgânica-Orgânica
 EU-INO – Mistura Eutética Inorgânica-Inorgânica
 (s) – Estado sólido
 (l) – Estado líquido

Na tabela seguinte (Tabela 2.6), está exposta uma vasta lista de PCM que se adequam à construção e que estão disponíveis no mercado.

Tabela 2.6 – PCM disponíveis no mercado, com características térmicas adequadas à aplicação no interior dos edifícios.

Designação do PCM	Temp. de fusão T[°C]	Entalpia de Fusão ΔH [kJ/kg]	Calor Específico c_p [kJ/(kg.K)]	Condutibilidade térmica λ [W/(m.K)]	Ref.
RT21HC (Parafina)	21	190	2	0,2	(Rubitherm, 2019)
RT22HC (Parafina)	22	190	2	0,2	(Rubitherm, 2019)
RT 24 (Parafina)	24	160	2	0,2	(Rubitherm, 2019)
RT 26 (Parafina)	26	180	2	0,2	(Rubitherm, 2019)
RT 28 HC (Parafina)	28	250	2	0,2	(Rubitherm, 2019)
Climsel C24 (Sal hidratado)	24	140	-	0,74 (s) 0,93 (l)	(Climator, 2019)
Climsel C28 (Sal hidratado)	27	170	-	0,98 (s) 0,72 (l)	(Climator, 2019)
SP21EK	21	170	2	0,6	(Rubitherm, 2019)
SP 25 E2	24 – 26	180	2	0,6	(Rubitherm, 2019)
SP 29 Eu	29 – 31	200	2	0,6	(Rubitherm, 2019)
Latest™29T (sal hidratado)	29	188	2	1	(Teappcm, 2019)

(s) – Estado sólido;

(l) – Estado líquido;

2.5. INCORPORAÇÃO DOS PCM NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Os PCM podem ser incorporados nos materiais de construção convencionais de diversas formas: impregnação (ou incorporação direta), imersão e encapsulamento. Nos pontos seguintes cada uma será explicada ao detalhe.

2.5.1. IMPREGNAÇÃO

De todos os métodos de incorporação a impregnação é o método mais simples, em que os PCM, líquidos ou em pó, podem ser adicionados às misturas de certos materiais de construção, como por exemplo à mistura de gessos e de betões. Este é um método onde não é necessário a utilização de equipamentos complementares. Contudo, a incompatibilidade dos PCM com os materiais de construção apresenta um grande problema na utilização desta técnica (Zhou, Zhao e Tian, 2012).

2.5.2. IMERSÃO

A imersão é um método utilizado em materiais de construção porosos. Os materiais são imersos em PCM derretido que, por sucção capilar se absorve nos seus poros internos. Quando o material de construção é removido da solução de PCM, este seca, ficando assim incorporado nos poros do material.

No entanto, este método apresenta alguns problemas como o facto de ser um processo lento e que implica o desperdício de PCM durante a imersão e utilização do material devido a fugas de PCM durante os ciclos térmicos, isto faz com que o PCM perca o seu potencial ao longo do tempo (Kaasinen, 1992).

2.5.3. ENCAPSULAMENTO

O encapsulamento é a técnica que mais se adequa à indústria da construção, pois evita o contacto direto entre o PCM e os materiais de construção. Este tipo de aplicação facilita o manuseamento dos líquidos.

Existem dois tipos de encapsulamento: macrocápsulas e microcápsulas.

2.5.3.1. MACROENCAPSULAÇÃO

As macrocápsulas podem apresentar vários formatos, como por exemplo, esférico, cilíndrico, em painéis, entre outros (Figura 2.6). Estas podem ser feitas de vários materiais como folhas de alumínio ou polímeros. As macrocápsulas são primeiramente concebidas e só depois incorporadas nos materiais de construção. Apesar deste método ter a vantagem de reter o material no estado líquido (impedindo o derrame do mesmo), há também algumas desvantagens associadas a este tipo de encapsulamento como a necessidade de o adaptar aos sistemas construtivos. No entanto, o facto do PCM estar retido pelo encapsulamento vai impedir alterações volumétricas significativas o que previne diversos riscos, garantindo assim a integridade do material onde as cápsulas forem introduzidas (Martins, Bruno, 2017).

Outro problema associado a este método é a dificuldade em manter as cápsulas intactas durante o uso dos edifícios. Devido à concentração de uma elevada quantidade de PCM, a condutibilidade térmica é reduzida e há uma tendência para a solidificação junto às bordas da cápsula impossibilitando a transferência do calor acumulado pelo PCM para o ambiente interior (Zhou, Zhao e Tian, 2012).



Figura 2.6 - Macrocápsulas de materiais de mudança de fase (Sá, 2012).

2.5.3.2. MICROENCAPSULAÇÃO

A microencapsulação é uma técnica na qual as partículas de PCM são fechadas numa película polimérica fina, selada e de alto peso molecular (Figura 2.7), evitando o vazamento de PCM durante o processo de mudança de fase (Zhou, Zhao e Tian, 2012). Estas podem apresentar um formato esférico, de paredes contínuas ou formato assimétrico com variadas formas, estando os seus diâmetros compreendidos entre 1 e 1000 μm . Este método facilita a incorporação dos PCM nos materiais de construção, tornando fácil

a sua aplicação, pois não exige a alteração dos processos construtivos e as cápsulas não se danificam com a utilização dos edifícios (Sá, 2012).

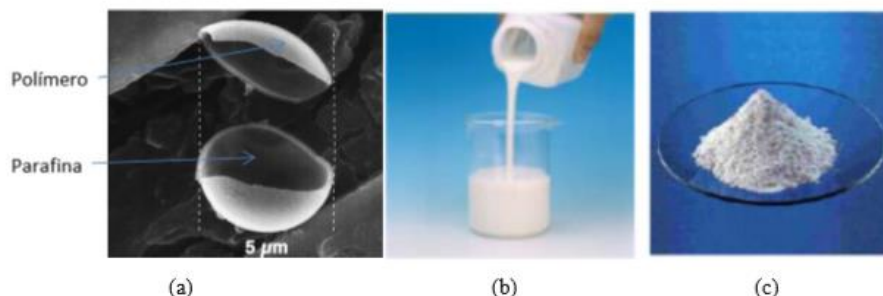


Figura 2.7 - Microcápsulas para materiais de mudança de fase: (a) microcápsula esférica; (b) PCM micro encapsulados em solução aquosa; (c) PCM micro encapsulados em pó (Castilho, 2014).

Apesar destas vantagens também existem alguns inconvenientes em volta da microencapsulação.

Estudos publicados por Hunger et al. (2009), demonstram que as propriedades dos materiais de construção são afetadas com a incorporação dos PCM em microcápsulas. O aumento da quantidade de PCM provoca uma diminuição na resistência à compressão e uma redução na condutibilidade térmica do betão endurecido.

Por outro lado, estudos de Cabeza et al. (2007), comprovam que a microencapsulação é segura. Numa experiência com dois protótipos de tamanho grande, foram estudados os seus comportamentos térmicos. Um dos protótipos foi incorporado com PCM e o outro foi mantido sem PCM. Os autores concluíram que a incorporação de um produto de PCM num dos protótipos em estudo, não afetava significativamente as propriedades básicas do betão, pois o PCM é considerado como mais um agregado deste.

Existem vários tipos de microcápsulas. Estas podem ser mononucleares, polinucleares e de matriz (solução de PCM com adição de polímeros). Estas cápsulas podem ser adicionadas diretamente aos materiais de construção ou podem ser conjugadas para obter outros tipos de componentes como, por exemplo, PCM microencapsulado em placas de gesso cartonado, esta é uma solução construtiva já comercializada com aplicações concretas largamente reconhecidas.

As microcápsulas apresentam vantagem sobre as macrocápsulas, apesar de apresentarem um custo mais elevado, afirma Khudhair (2004).

2.6. MATERIAIS E COMPONENTES DA CONSTRUÇÃO COM PCM

Uma pesquisa efetuada sobre o tema de trabalho permitiu conhecer algumas soluções construtivas e alguns componentes de construção onde foi possível incorporar materiais de mudança de fase. Nos primeiros pontos serão debatidos os casos de inclusão nos materiais tais como: blocos de betão, tijolos e argamassa. Posteriormente, será abordada a incorporação dos PCM em elementos de betão, paredes trombe, pavimentos radiantes, tetos falsos, envidraçados e portadas, placas de gesso cartonado, ladrilho cerâmico e painéis de isolamento térmico.

2.6.1. COMPONENTES UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.6.1.1. BLOCOS DE BETÃO

Os PCM podem ser introduzidos nestes materiais por todas as técnicas de incorporação mencionadas anteriormente: incorporação direta do PCM, imersão dos blocos em PCM ou incorporação de macrocápsulas ou microcápsulas de PCM no material.

Um estudo levado a cabo por Hawes et al., em 1993, determinou que a introdução de PCM por incorporação direta em blocos de betão aumentava consideravelmente a capacidade de absorção do calor. Porém, a resistência mecânica do betão é afetada fazendo com que não seja possível a incorporação de grandes quantidades de PCM nestes blocos (Castilho, 2014).

2.6.1.2. TIJOLOS

Tal como os blocos de betão, os PCM podem ser introduzidos nos tijolos por todas as técnicas de incorporação já mencionadas: incorporação direta dos PCM, imersão do material em PCM ou incorporação de macrocápsulas ou microcápsulas de PCM no material.

Martins (2017) referiu, na sua dissertação, uma experiência realizada em Puigvert de Leida, em Espanha, em que introduziram PCM em tijolos, num caso aliado a um spray de poliuretano e noutro caso adicionado a tijolo alveolar. O PCM utilizado é da marca *Rubitherm Technologies GmbH* e é designado por *CSM* (uma macrocápsula). A experiência mostrou que o *CMS* teve algumas dificuldades nomeadamente no processo de libertação de energia na fase de solidificação, por isso será necessária uma otimização no método de arrefecimento do PCM.

2.6.1.3. ARGAMASSA

Num estudo de Sá (2012), foi efetuada uma comparação entre uma argamassa de formulação L (com 15% de ligantes – cimento e cal, e 85% de “agregados” – agregado industrial e PCM) e uma argamassa corrente, denominada por argamassa de referência, a mesma concluiu a ocorrência de alterações na massa volúmica, embora que pouco significativas. Já a condutibilidade térmica sofreu uma redução de 0,31 W/m.K (de 0,61W/m.K para 0,30 W/m.K). Quanto às características mecânicas, mantiveram-se iguais sendo que se estimou uma capacidade térmica de armazenamento de calor, da argamassa melhorada na mudança de fase, de cerca de 25 kJ/kg.

Uma publicação feita por Kheradmand et al. (2016), sustenta o trabalho efetuado por Sá (2012). Neste estudo elaboraram-se dois protótipos cúbicos, com uma dimensão volumétrica de 0,46 m³, um concebido com uma argamassa melhorada e outro concebido com uma argamassa de referência. Feita uma comparação entre estes dois protótipos, concluiu-se que o PCM provocou uma melhoria nas condições térmicas interiores, atenuando as variações de temperatura. No entanto esta melhoria só aconteceu na estação de arrefecimento, pois na estação de aquecimento as melhorias das condições térmicas não foram significativas.

2.6.2. ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

2.6.2.1. ELEMENTOS DE BETÃO

Sendo o betão um material poroso com elevada capacidade de absorção, é possível a introdução de PCM por imersão. No entanto, com a incorporação do PCM a capacidade de resistência à compressão do betão

é afetada. Para além disto, ainda afeta a estabilidade a longo prazo e a resistência ao fogo (Martins, 2017).

A incorporação dos PCM no betão pode ser feita através da mistura deste, encapsulado ou não, com as restantes matérias primas constituintes do betão (Cabeza, L.F., et al.). Também podem ser incorporados pela imersão de betão endurecido em PCM derretido ou em soluções aquosas deste (Bentz e Turpin, 2007).

Estudos levados a cabo por Cabeza et al. (2007), mostraram que o betão pode contrair uma ligeira redução na sua resistência mecânica quando introduzido PCM microencapsulado, a autora criou um cimento com PCM com o objetivo de não afetar a resistência mecânica de uma parede de betão. Cabeza construiu dois protótipos de betão (3x3m), um com PCM incorporado e outra sem, tendo concluído que o betão do protótipo com PCM atinge uma tensão à compressão superior a 25 MPa e uma resistência à tração superior a 6 MPa. Estes resultados são muito favoráveis provando que este material pode ser usado para fins estruturais.

Entrop, Brouwers e Reinders (2011) estudaram o uso de PCM em pavimentos de betão e compararam com pavimentos de betão sem PCM. Sendo o envidraçado do compartimento a única fonte de calor, o autor conclui que a incorporação do material de mudança de fase foi favorável e que permitiu suavizar as variações de temperatura. No entanto é de referir que o pavimento de betão sem nenhum revestimento é pouco comum, por isso os resultados desta experiência são pouco conclusivos.

2.6.2.2. PAINÉIS DE GESSO CARTONADO

Este tipo de material é um material bastante económico e com uma vasta lista de aplicações, como por exemplo, paredes e tetos, estes elementos facilitam a introdução de PCM. Existem vários estudos onde os PCM foram aplicado de variadas formas, tais como: incorporação com imersão direta (Scalat et al., 1996), onde as placas de gesso continham entre 20% a 30% de PCM, e por microencapsulação (Borreguero et al., 2011) com características térmicas distintas em função da aplicação desejada. As propriedades térmicas das placas de gesso cartonado que contêm PCM assemelham-se com as propriedades térmicas dos PCM individuais. Quando se realiza um corte numa placa de gesso cartonado que contenha PCM observa-se que uma grande quantidade de PCM está concentrada no último terço da espessura da placa de cada fase devido ao processo de difusão (Castilho, 2014).

Kuznik, Virgone e Roux (2008), realizaram um estudo que consistia na comparação entre dois quartos, um contendo placas de gesso cartonado com PCM e outro com placas de gesso cartonado sem PCM. Esta experiência mostrou que o material de mudança de fase reduziu as variações de temperatura do ar, diminuiu o efeito dos picos de calor, solidificou corretamente com a redução da temperatura e proporcionou sempre uma temperatura boa garantindo o conforto térmico. Um estudo feito por Ascione et al. (2014), propôs uma reabilitação de um interior de um edifício de escritórios, na estação de arrefecimento, onde foi colocado placas de gesso cartonado com PCM incorporado e simularam-se as vantagens, a nível térmico, destas placas em vários climas mediterrâneos. Foram cinco os climas mediterrâneos escolhidos: Ankara (Turquia), Atenas (Grécia), Nápoles (Itália), Marselha (França) e Sevilha (Espanha). Como é espetável, os resultados são diferentes de cidade para cidade. O PCM incorporado não permite os mesmos benefícios ao longo de todos os meses da estação de arrefecimento e para todos os países mediterrânicos. A utilização de energia de arrefecimento, em Ankara, reduziu cerca de 7,2%. Já em Sevilha e Nápoles alcançou-se uma redução inferior a 3%. É de realçar que nestes climas, na estação de arrefecimento, as horas de baixas temperaturas são reduzidas, é nestas horas que

o PCM solidifica e liberta calor, como são poucas o material não solidifica completamente. No inverno observou-se o mesmo acontecimento, mas para a fusão do material.

2.6.2.3. PAVIMENTOS RADIANTES

Os PCM são usados em pavimentos radiantes de modo a racionalizar o uso de energia no aquecimento. Os materiais de mudança de fase funcionam como um limitador de fluxo de calor emitido pelo piso radiante. O sistema de aquecimento deverá estar ligado só em algumas horas do dia, pois o calor acumulado no PCM é libertado gradualmente. Assim o sistema de aquecimento poderá apenas ter um funcionamento noturno, em que a tarifa de eletricidade é mais baixa, podendo o calor armazenado durante a noite ser libertado durante o dia.

Athienitis e Chen (2000), investigaram a transferência de calor, variável com o tempo, em sistemas de piso radiante, incidindo-se sobre a influência do tipo de revestimento, a intensidade de incidência solar na distribuição de temperaturas e no consumo de energia. Por simulações numéricas, concluíram que as temperaturas superiores, atingidas em zonas do pavimento com incidências solares, o PCM armazena grandes quantidades de calor reduzindo cerca de 30% as necessidades de aquecimento.

Lin et al. (2007), concluíram que, aplicando PCM sobre um pavimento radiante há uma redução significativa dos consumos energéticos com uma adaptação construtiva simples. O pavimento radiante deve possuir uma camada de isolamento térmico inferior para que não haja perdas de calor para o exterior. Podemos observar o caso descrito anteriormente na figura que se segue (Figura 2.8).

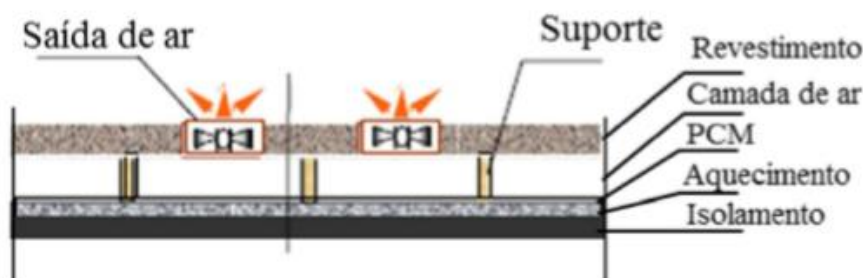


Figura 2.8 - Representação esquemática de um pavimento radiante com PCM (adaptado de (Lin et al., 2007; Sá, 2012)

2.6.2.4. TETOS FALSOS

Os PCM são introduzidos nos tetos falsos com intuito de gerar um efeito de arrefecimento no interior de um edifício ou compartimento, no Verão. Isto requer que o teto falso esteja em contacto com o exterior através de condutas ou grelhas, para que durante a noite haja uma solidificação do PCM devido à descida de temperatura. O teto falso deve dispor de grelhas reguláveis que estão em contacto com o exterior, como já mencionado. Estas devem estar abertas durante a noite para que o ar frio arrefeça a placa do teto falso provocando uma descida da temperatura do PCM. Durante o dia, com as grelhas já fechadas, faz-se circular o ar através da superfície superior do teto falso em que o PCM (com temperatura mais baixa que a temperatura ambiente) absorve o calor até mudar de fase para o estado líquido (Castilho, 2014). Podemos observar o sistema que foi descrito no paragrafo anterior nas figuras seguintes (Figura 2.9 e Figura 2.10).

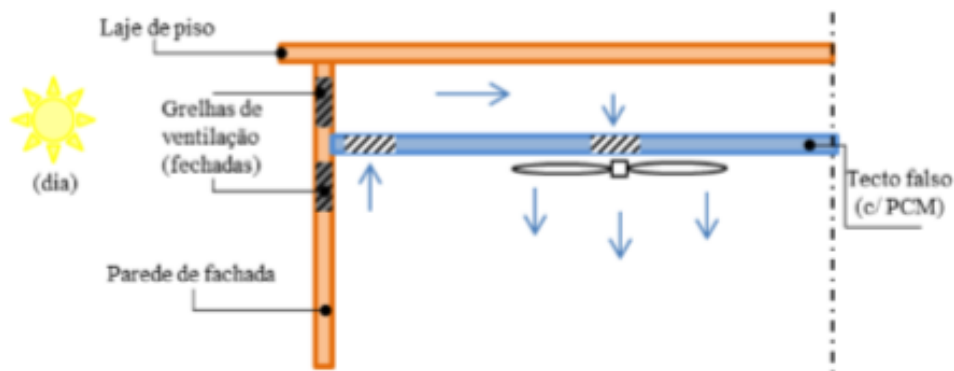


Figura 2.9 - Representação esquemática de tetos falsos com PCM - representação diurna; direita (Sá, 2012; Tyagi e Buddhi, 2007)

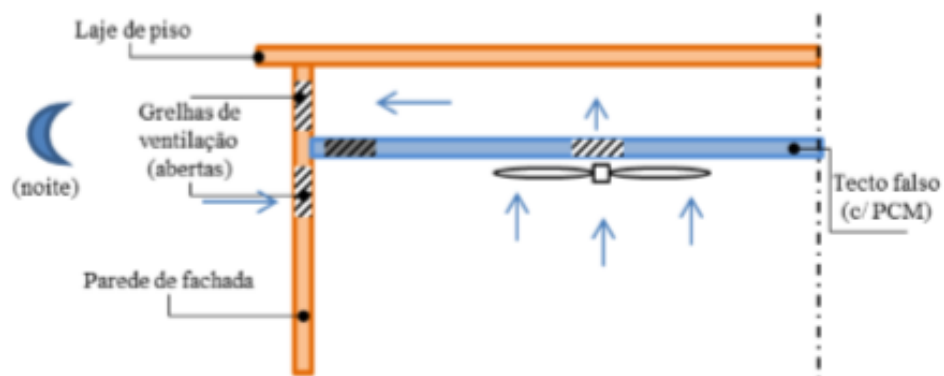


Figura 2.10 - Representação esquemática de tetos falsos com PCM - representação noturna (Sá, 2012; Tyagi e Buddhi, 2007)

2.6.2.5. LADRILHOS CERÂMICOS

Para ser incorporado em ladrilhos, os PCM cerâmicos precisam de se manter sempre sólido. A este tipo de PCM chama-se *Material de Mudança de Fase de estado sólido*. Os ladrilhos cerâmicos resultam da mistura de PCM microencapsulado em pó com os restantes componentes que compõem o ladrilho cerâmico, apenas se substitui parcialmente o pó de quartzo, ficando estes com uma aparência parecida aos ladrilhos correntes. Os ladrilhos possuem uma capacidade de armazenamento calorífica superior aos ladrilhos convencionais, tendo uma entalpia de 130 kJ/kg e uma temperatura de fusão de 29°C (Hittle, 2002).

Um estudo conclui que a incorporação de ladrilhos com PCM, acrescentando isolante térmico num espaço, representa uma solução vantajosa no ponto de vista de armazenamento de energia solar durante o Inverno. Esta junção de materiais estabiliza a temperatura do espaço reduzindo a energia necessária para o condicionamento da temperatura interior noturna (Cerón, Neila e Khayet, 2011).

Alawadhi (2008), realizou um estudo onde introduziu três macrocápsulas cilíndricas no interior de um bloco cerâmico. Este referiu que a posição das macrocápsulas no centro dos blocos seria uma posição mais eficaz para reduzir o fluxo de calor. O autor conclui que o fluxo de calor para o interior dos

edifícios, em climas quentes, pode ser reduzido cerca de 18%. Pode-se observar esta experiência na figura seguinte (Figura 2.11).

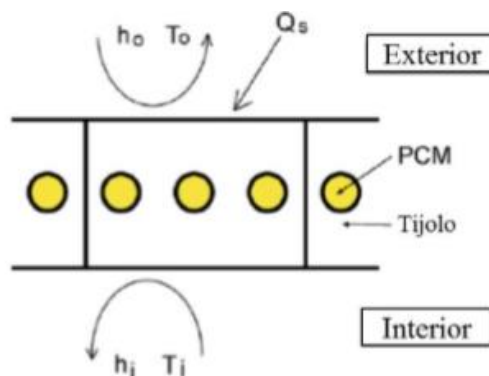


Figura 2.11 - Ilustração de um corte de bloco cerâmico contendo PCM macroencapsulado (adaptado de (Alawadhi, 2008)).

2.6.2.6. ENVIDRAÇADOS E PORTADAS

Os envidraçados são um componente de ligação entre o espaço interior e o espaço exterior, pois em climas frios, estes são responsáveis por grandes perdas de calor para o exterior, já em climas quentes são responsáveis pela entrada de grandes quantidades de calor para o interior. Estas duas situações fazem com que seja necessário aquecer e arrefecer, respetivamente, o interior aumentando assim o consumo de energia. O PCM incorporado nos envidraçados, irá sofrer mudanças de fase devido à incidência solar direta nos vidros, absorvendo e libertando calor contribuindo desta forma, para a diminuição ou aumento da temperatura no local onde está aplicado o PCM (Martins, 2017).

Num estudo apresentado por Ismail e Henriquez (2002), com recurso a modelos numéricos, estes avaliaram modelos de painéis de vidro duplo com caixa de ar com PCM e painéis de um envidraçado de referência só com espaço de ar entre os dois painéis de vidro para variadas espessuras dos materiais. O PCM impediu entradas grandes de calor diminuindo assim a energia transmitida. Os resultados mostraram que a condutibilidade térmica do envidraçado com PCM foi superior ao do envidraçado de referência. Ainda foi feito um estudo que incidiu sobre a influência das cores no PCM onde se apurou que os PCM puros tinham maior transmitância. Tanto os de cor azul como os de cor verde tinham menor transmitância.

Weinläder, Beck e Fricke (2005) publicaram outro estudo onde, através de modelos computacionais foram criadas as seguintes condições: aquecimento uniforme para um quarto para um período diurno com envidraçados orientados a Sul. Nestas condições compararam-se dois modelos de envidraçados em que um continha PCM e outro não. Chegaram à conclusão de que houve uma diminuição de entrada de calor (de 30%) e uma redução de ganhos térmicos (de 50%) no envidraçado com PCM. Já a condutibilidade térmica do envidraçado com PCM é inferior.

As portadas, por sua vez, são outro material que está constantemente exposto à radiação solar e por isso tem um relevante interesse na aplicação de PCM. As portadas deverão ser colocadas no exterior do envidraçado e durante o dia estas deverão estar abertas para exposição solar, quando o PCM atingir o seu ponto de fusão armazenará calor para que durante a noite, se fecharem as portadas e abrindo as janelas, a face interior da portada fique em contacto com o interior do compartimento, libertando o calor armazenado (Scalat et al., 1996).

Quanto ao sistema de persianas, Alawadhi (2012) investigou a incorporação de PCM nestes sistemas, o autor concluiu que a incorporação de PCM reduziu cerca de 23 % o calor atravessado pelo envidraçado quando comparado com outros sistemas de oclusão sem PCM.

2.6.2.7. PAREDES DE TROMBE

Uma parede de Trombe é uma técnica construtiva passiva em que se constrói uma parede na face do edifício mais exposta à radiação solar na estação de aquecimento. A parede é composta por uma camada exterior de vidro, uma camada intermédia de ar e uma estrutura interior com elevada capacidade de armazenamento de calor (Castilho, 2014). Componentes tais como, a parafina, ácidos gordos ou sais hidratados são incorporados nestas paredes com o propósito de aumentar a capacidade de armazenamento de calor (num intervalo de temperaturas apropriado ao caso de estudo).

Um estudo levado a cabo por Bourdeau apresenta como conclusão que uma parede de 8 cm de espessura com PCM tem um desempenho térmico superior a uma parede de alvenaria com 40 cm (Sá, 2012). Os investigadores Swet, Ghoneim et. al. e Chandra afirmaram que uma parede com PCM de espessura menor é mais eficiente do ponto de vista térmico do que uma parede de Trombe corrente, pois apresenta uma maior capacidade de armazenamento calorífico (Sá, 2012).

2.6.2.8. PAINÉIS DE ISOLAMENTO TÉRMICO

Foram efetuados estudos na última década de introdução de PCM em espuma de poliuretano (Kosny, Miller e Syed, 2007; Kośny et al., 2003) e em celulose (Kośny et al., 2003; Kosny et al., 2008; Kosny et al., 2006). No primeiro caso, a espuma de poliuretano com PCM foi disposta em duas camadas de 6mm entre três chapas de alumínio de baixa emissividade, e aplicada no topo de vigas de isolamento de lã mineral. Esta espuma tinha 0,49 kg/m² de PCM, com ponto de fusão de 25,5 °C e uma entalpia máxima de 140 kJ/kg. Confrontando o fluxo de calor em construções convencionais com uma construção contendo este material, esta última mostra uma redução de 40% da carga de arrefecimento na hora de pico. Baetens, Jelle e Gustavsén (2010) também aplicou este método em sótãos onde resultou uma diminuição de temperatura interior no verão de 11°C (de 43°C para 32°C).

2.7.COMENTÁRIO SÍNTESE

Neste capítulo definem-se os PCM, através da introdução e discussão dos principais conceitos associados a estes materiais.

Apresenta-se a divisão dos PCM em classes e categorias, bem como as suas propriedades. Verificou-se a importância das propriedades térmicas na decisão de escolha de um PCM, preferindo aqueles que apresentam maior entalpia, dentro da gama de temperaturas de fusão próximas das temperaturas de conforto. Ressalvando que, as propriedades térmicas não devem ser as únicas a se ter em conta, pois existem outros fatores como: a durabilidade, a estabilidade química, a reversibilidade e a compatibilidade com outros materiais de construção que também podem condicionar a escolha.

A par disso, são descritos também os métodos de incorporação dos PCM em materiais e componentes da Construção.

Por fim, descrevem-se alguns dos trabalhos publicados sobre a aplicação dos PCM nos edifícios e destacam-se os principais resultados.

3

RESOLUÇÃO NUMÉRICA – DESINGBUILDER

3.1.INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão abordados os princípios da transferência de calor tanto a nível de materiais correntes como a nível dos PCM. Para além disto, é descrito, tanto computacionalmente como matematicamente, o funcionamento do simulador *EnergyPlus*, software que está na base do programa *DesignBuilder*.

A aplicação de Materiais de Mudança de Fase só faz sentido porque um edifício possui um comportamento térmico dinâmico de variações de temperatura, com trocas de calor constantes com o exterior.

3.2.TRANSFERÊNCIA DE CALOR

3.2.1.CONCEITOS ASSOCIADOS À TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Denomina-se por transferência de calor o transporte de energia térmica devida a uma diferença de temperatura. A energia térmica está associada à translação, rotação, vibração e aos estados eletrónicos dos átomos e moléculas que constituem a matéria. Esta energia está relacionada com a temperatura da matéria.

Existem diferentes mecanismos de transferência de calor, nomeadamente: condução, convecção e radiação.

3.2.1.1.CONDUÇÃO

A condução é a transferência de calor num sólido ou fluido estático (gás ou líquido) devido ao movimento aleatório dos seus átomos e moléculas ou eletrões constituintes, exigindo a presença de matéria e de variações de temperatura no meio material.

Esta ocorre sobretudo em meios sólidos, mas também acontece em meios líquidos e gasosos, contudo, com menor intensidade.

A condução de calor pode ocorrer em dois regimes:

- Estacionário – Onde não ocorrem variações de temperatura no tempo;
- Variável – Onde ocorrem variações de temperatura no tempo.

Nos edifícios, como é de prever, a condução acontece sempre em regime variável pois as temperaturas do meio interior e exterior estão em constante mudança.

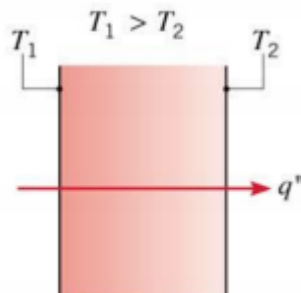


Figura 3.1 - Condução de calor através de um sólido (Lisboa Técnico).

A condução de calor pode ser explicada através da lei de Fourier, na qual a distribuição de temperatura evolui ao longo do tempo, até que atinja um equilíbrio. Esta lei está associada a propriedades que já foram descritos no capítulo 2, tais como: o calor específico, o calor específico volumétrico e a difusibilidade térmica.

Este método de transferência de calor, pode ser traduzido pela expressão geral de Fourier, que permite calcular a temperatura em qualquer ponto de espaço de uma partícula.

Para valores constantes da condutibilidade térmica, tem-se a expressão:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} \quad (3.1)$$

Quando é para um sólido homogéneo, isotrópico e sem geração interna de calor a expressão sofre uma ligeira alteração, passando para a seguinte forma:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

Correspondendo às seguintes designações, ainda não abordadas neste estudo:

$\dot{Q}$ – Taxa de geração de energia por unidade de volume no meio (W/m³)

T – Distribuição de temperaturas no espaço (x,y,z)

t – Tempo (s)

3.2.1.2.CONVECÇÃO

A convecção é um método que se baseia na transferência de calor entre a superfície de um sólido e um fluido em movimento, quando se verifica uma diferença de temperatura. Esta ocorre por duas formas:

- Movimento molecular aleatório (difusão);
- Movimento macroscópico do fluido.

A convecção é o movimento ascendente ou descendente de matéria num fluido (Figura 3.2).

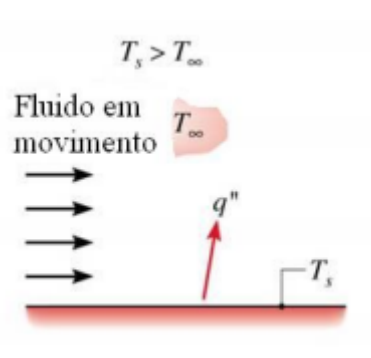


Figura 3.2 - Convecção de uma superfície para um fluido em movimento.

Este mecanismo de transferência de calor é facilmente explicado através do funcionamento de um sistema de ar condicionado colocado no teto de um compartimento (Figura 3.3). O ar frio que sai do equipamento irá permutar com o ar quente, menos denso, que se encontra junto ao pavimento.

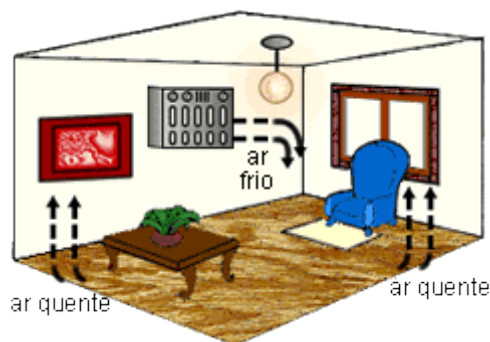


Figura 3.3 - Convecção de ar por efeito do funcionamento de ar-condicionado (EducaBras, 2018).

Este método de transferência de calor depende de alguns parâmetros do fluido, tais como:

- Densidade;
- Viscosidade;
- Condutibilidade térmica;
- Calor específico;
- Características da superfície de contacto:
 - Geometria;
 - Rugosidade;

- Orientação;
- Condições de fluxo.

O fenómeno convectivo é distinguido em quatro tipos:

- Convecção forçada: o fluxo é causado por meios externos (ventoinhas, vento, etc.);
- Convecção livre: o fluxo é causado unicamente pelas diferenças de densidade provocadas pelas diferenças de temperatura;
- Convecção por ebulição;
- Convecção por condensação.

Destes quatro tipos, apenas a convecção livre e a convecção forçada é que se associam a espaços interiores.

Este processo de transferência de calor rege-se pela lei de Newton, que traduz a seguinte expressão:

$$q'' = h_{conv}(T_S - T_f) \quad (3.3)$$

Onde:

q'' - Fluxo convectivo de calor por unidade de área (W/m^2);

h_{conv} - Coeficiente de convecção ($W/(m^2.K)$);

T_S - Temperatura de superfície (K);

T_f - Temperatura do fluido, em zona não perturbada pela superfície (K).

O fluxo de calor entre o sólido e o fluido varia linearmente com a diferença de temperatura entre estes.

3.2.1.3.RADIAÇÃO

A transmissão de energia térmica por radiação está relacionada com a emissão de calor por parte de um corpo em virtude da sua respetiva temperatura. Este método de transferência de calor distingue-se dos demais pois não necessita de um meio material para que ocorra transmissão de calor. A energia de radiação é emitida por ondas eletromagnéticas, segundo a Teoria Clássica de *Maxwell*. Já a hipótese de *Planck* diz que a transmissão é feita através de fótons discretos.

Um corpo emite em permanência radiações térmicas para o seu espaço envolvente, que também absorve, reflete ou transmite radiações que advêm de outros corpos. Denominam-se por absorvidade (α), refletividade (ρ) e transmissividade (τ) as frações de radiação térmica absorvidas, refletidas e transmitidas, respetivamente. O somatório destas parcelas é igual à unidade:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (3.4)$$

De referir que estas três grandezas são resultam do comprimento de onda da radiação incidente.

Designa-se por Radiância (E) a taxa de emissão de radiação por unidade de área de uma determinada superfície. A radiância obedece à lei de *Stefan-Boltzmann*, que se traduz pela seguinte fórmula:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (3.5)$$

Onde:

ε - Emissividade (capacidade de emissão da radiação) [0-1];

σ - Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/ (m}^2 \text{ K}^4\text{)}$);

T_s - Temperatura da superfície (K).

Existem dois tipos de corpos associados à radiação:

- Corpo negro - é um corpo ideal que absorve toda a energia que nele incide e que apresenta uma emissividade igual a 1 ($\varepsilon = 1$).
- Corpo cinzento - é um corpo ideal que absorve apenas uma fração igual para todos os comprimentos de onda ($\varepsilon < 1$).

Os corpos reais comportam-se como corpos cinzentos para certas gamas de comprimento de onda. Para este tipo de corpos a lei de *Kirchoff* assume a seguinte igualdade:

$$\varepsilon = \sigma = \text{constante} \quad (3.6)$$

A expressão que traduz as trocas de calor por radiação entre uma superfície e o meio envolvente é semelhante à expressão que traduz as trocas por convecção, alterando-se apenas o coeficiente de convecção (h_{conv}) pelo coeficiente de transferência de calor por radiação (h_r), representando-se na seguinte equação:

$$q'' = h_r(T_s - T_f) \quad (3.7)$$

O h_r varia em função da geometria e da temperatura da superfície e é representado pela seguinte expressão:

$$h_r = 4\varepsilon \sigma T_m^3 \quad (3.8)$$

Em que T_m é a temperatura média entre a superfície e o meio circundante e é traduzido pela expressão:

$$T_m = \frac{T_s + T_f}{2} \quad (3.9)$$

Para além disto, existe um tipo de radiação muito importante no que toca ao comportamento térmico dos edifícios, a radiação solar. Esta radiação divide-se em:

- Radiação direta
- Radiação difusa

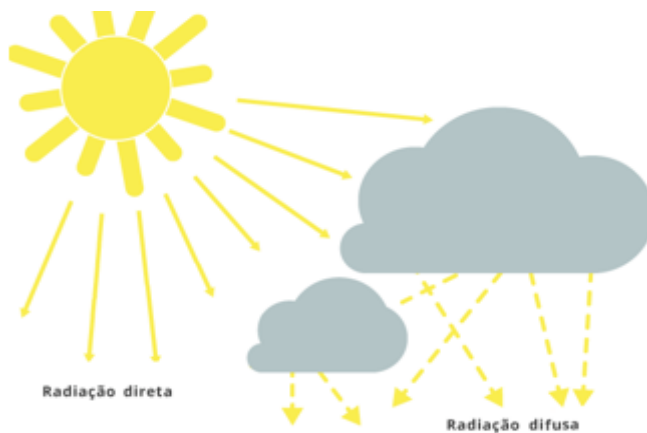


Figura 3.4 - Tipos de radiação solar (Energia Heliotérmica, 2019).

A Figura 3.4 retrata estes dois tipos de radiação. A radiação direta corresponde à radiação que atravessa a atmosfera sem ser desviada nem absorvida no seu percurso, já a radiação difusa corresponde à radiação que é dispersa durante o seu percurso por perturbações dos componentes atmosféricos.

3.2.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR NOS PCM

Vários autores afirmam que a condução é usualmente considerada como tendo uma maior influência na transferência de calor durante o processo de mudança de fase dos materiais (Costa, Buddhi e Oliva, 1998; Ho e Chu, 1996; Khodadadi e Zhang, 2001). Por outro lado, existem autores que consideram que a convecção natural é o método mais importante no processo de mudança de fase. Por exemplo, Velraj et al. (1999) afirmou que durante a fusão ocorre convecção natural no material que funde, o que resulta num aumento da taxa de transferência de calor. Yinping e Yi (1999) concluíram que na passagem do estado sólido para o estado líquido o volume de PCM continuava a aumentar, o que reforça a teoria de que a convecção é o principal fenómeno de transferência de calor, em detrimento da condução.

3.3. RESOLUÇÃO NUMÉRICA

3.3.1. RESOLUÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A resolução de problemas de transmissão de calor pode ocorrer nas 3 dimensões, havendo uma menor ou maior simplificação das equações. Pode-se resolver este problema de três métodos distintos:

- Métodos analíticos;
- Métodos analógicos;
- Métodos numéricos.

Os métodos numéricos são os mais utilizados atualmente, pois há uma resolução rápida de problemas complexos. Para a avaliação do comportamento térmico de um edifício que contém PCM nos seus elementos construtivos é recorrente utilizar-se este método.

Neste estudo, optou-se por utilizar, dentro dos métodos numéricos, o método das diferenças finitas – *Finite Difference*, que faz a análise da transferência de calor unidirecional, perpendicular ao elemento construtivo.

3.3.2. MODELO TEÓRICO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A geometria complexa de um edifício é o primeiro problema a surgir na utilização de um modelo numérico de transferência de calor.

Em 1999, M. Woloszyn propôs quatro modelos de discretização espacial (ver Figura 3.5) para um edifício. Nesta discretização espacial existem dois modelos de elevada complexidade (Ramos, 2007).

- Modelo CFD - Computation Fluid Dynamics - solução numérica de métodos computacionais, que se baseia em cálculos das equações de movimento dos fluídos. Este permite seguir a evolução temporal do movimento do ar, da temperatura e da humidade no interior de um volume com grande detalhe. É um método com elevada complexidade e que exige um bom desempenho dos meios informáticos.
- Modelo Monozona – modelo mais simples que admite características uniformes para todo o interior do edifício. No entanto, o seu nível de precisão não é elevado e não podem ser avaliadas as características de cada compartimento isolado.

E outros dois modelos de complexidade intermédia (Ramos, 2007):

- Modelo Multizona - modelo que consiste em fazer coincidir cada zona considerada uniforme com cada compartimento do edifício. Isto permite ter em conta as diferentes condições de cada compartimento e os movimentos de ar dentro do edifício.
- Modelo Zonal – modelo que permite modelar zonas onde se verifiquem estratos da massa de ar com características térmicas muito diferentes dos estratos envolventes.

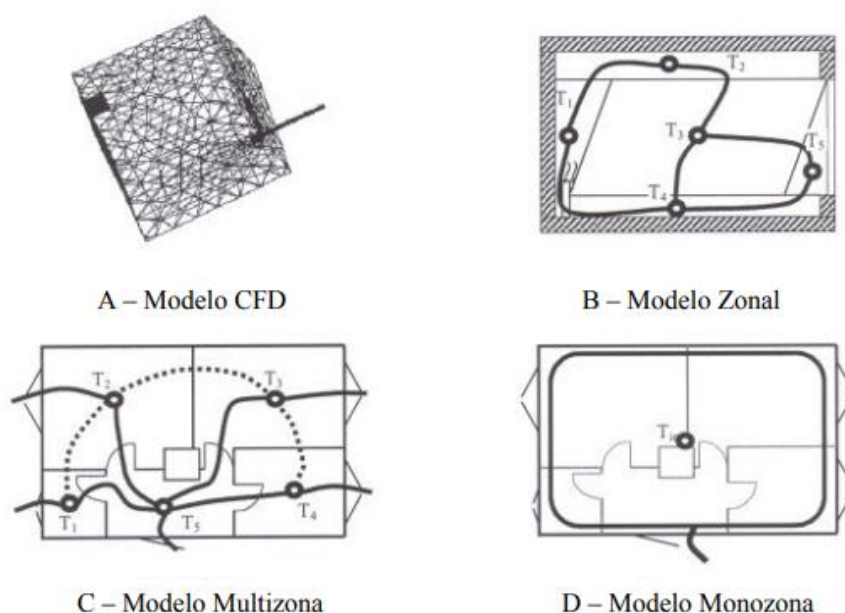


Figura 3.5 - Níveis de discretização espacial de um edifício (Woloszyn, 1999).

3.3.3. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Existem vários programas de simulação numérica que analisam o efeito do PCM nos edifícios, como por exemplo:

- *Energy Plus* – Programa de simulação energética de um edifício que é usado tanto para simular os consumos de energia (para aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação entre outros) como os consumos de água em edifícios (EnergyPlus, 2019).
- *CoDyBa* – Software usado para analisar o desempenho dinâmico higrotérmico de elementos de construção quando submetidos a qualquer tipo de condições climáticas. Esta ferramenta destina-se a realizar estudos de estratégia de aquecimento e arrefecimento, ar condicionado ou opções de ventilação e materiais isolantes a serem instalados. O seu principal objetivo é prever o consumo de energia e a evolução de temperatura e humidade (CoDyBa, 2019).
- *TRNSYS* – software extremamente flexível, baseado em gráficos, utilizado para simular o comportamento de sistemas transitórios. Enquanto que a grande maioria das simulações está focada na avaliação do desempenho de sistemas de energia térmica e elétrica, este programa também pode ser usado para modelar outros sistemas dinâmicos, como o fluxo de tráfego, ou processos biológicos (TRNSYS, 2019).
- *ESP-r* – Ferramenta de modelação que permite simular o desempenho de uma construção. Ao realizar as suas avaliações, o sistema é equipado para modelar fluxos de calor, ar, humidade e energia elétrica a uma resolução espacial e temporal especificada pelo usuário (ESP-r, 2019).

Atendendo às características de cada programa e aos objetivos deste estudo, o *EnergyPlus* foi o programa selecionado para este estudo. Segue-se, no ponto seguinte, uma explicação mais detalhada deste software.

3.3.3.1. EXPLICAÇÃO DO SOFTWARE ENERGYPLUS

O *EnergyPlus* é um programa computacional de simulação energética de edifícios criado a partir de dois programas, o BLAST e o DOE-2. Para além da conjunção das melhores funcionalidades desses dois softwares, o *EnergyPlus* conta ainda com novas capacidades. Foi desenvolvido através de um algoritmo de cálculo do programa IBLAST, e foi escrito na linguagem de programação *Fortran 90*. A natureza modelar do *EnergyPlus* é uma característica muito importante, pois permite que os investigadores, com uma experiência mais baixa, adicionem rapidamente novos módulos no programa, maximizando assim o impacto de novas pesquisas e, ao mesmo tempo, reduz os custos e o tempo do programa (Strand et al., 2000).

Por palavras mais simples, o *EnergyPlus* é um programa que simula os consumos de energia de um edifício a partir de dados climáticos horários de uma dada região, descrição arquitetónica e construtiva do edifício, padrões de uso e ocupação, potência instalada em iluminação, equipamentos, características do sistema de condicionamento de ar e estrutura tarifária (Lima, 2010).

Este *software* inclui certas funcionalidades, como por exemplo (EnergyPlus, 2019):

- Solução simultânea das condições da zona térmica e da resposta do sistema HVAC.
- Solução baseada no equilíbrio de calor de efeitos radiantes e convectivos que produzem cálculos de conforto térmico e condensação das temperaturas da superfície.
- Etapas de tempo, definidas pelo usuário para interação entre as zonas térmicas e o ambiente e, ainda, intervalos de tempo variados automaticamente para interações entre zonas térmicas e sistemas HVAC.
- Modelo de transferência de calor e massa que considera o movimento do ar entre as zonas.
- Modelos avançados de fenestração, que incluem persianas controláveis, envidraçados eletrónicos e balanços térmicos feitos de camada a camada, que calculam a energia solar absorvida pelos painéis das janelas.
- Cálculo da iluminância e brilho para relatar conforto visual e controles de iluminação de condução.
- HVAC baseado em componentes que suportam configurações de sistema padrão e outras novas.
- Um grande número de estratégias de controlo de iluminação e HVAC integradas, e um sistema de scripts de tempo de execução extensível para controlo definido pelo usuário.
- Importação e exportação de interface de simulação funcional para co-simulação com outros mecanismos.
- Resumo padrão e relatórios de saída detalhados, bem como relatórios definidos pelo usuário com resolução de tempo selecionável, todos eles com multiplicadores de fonte de energia.

A figura seguinte (Figura 3.6) descreve o modo de funcionamento do software *Energy Plus*.

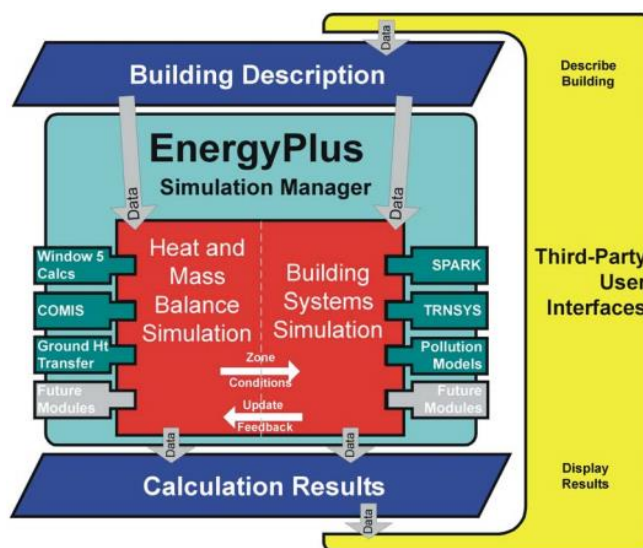


Figura 3.6 - Estrutura do *EnergyPlus* (Crawley et al., 2002).

O *EnergyPlus* possui três componentes básicos (Crawley et al., 2002):

- *Simulation Manager* – O gerador de Simulação controla as interações entre todos os ciclos de simulação de um nível sub-horário até a etapa de tempo selecionada pelo usuário e o período de simulação, seja dia, mês, estação, ano ou vários anos.
- *Heat and Mass Balance Simulation* - O método de cálculo da zona térmica subjacente ao edifício no *EnergyPlus* corresponde ao modelo de balanço de calor, que pressupõe que o ar em cada zona térmica é modelado e bem agitado com temperatura uniforme. A outra suposição importante nos modelos de equilíbrio de calor é que as superfícies (paredes, janelas, tetos e pisos) têm temperaturas superficiais uniformes e irradiação de ondas longas e curtas.
- *Building Systems Simulation* – Controla a simulação de sistemas AVAC, equipamentos elétricos e seus componentes, atualizando as condições de ar da zona.

3.3.3.2.RESOLUÇÃO NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NOS PCM

No software *EnergyPlus*, a condução de calor é avaliada por camadas em uma dimensão. O método utilizado na análise da transferência de calor é o CTF- Condução de Calor Transitória. Esta opção recorre apenas a uma única equação linear, de coeficientes constantes, e consegue efetuar o cálculo de uma fachada constituída por várias camadas de material. Quando necessário avaliar as propriedades térmicas que variam com a temperatura, como é o caso dos PCM, este método já não é tão vantajoso.

O programa apresenta um método para os PCM, que será utilizado nas simulações deste estudo, chamado Método das diferenças finitas – *Finite Difference*. Este é um método baseado em iterações, o que permite ter em conta a entalpia considerada na mudança de fase aquando da simulação dos PCM. A função temperatura-entalpia é calculada por atualização do calor específico efetivo do material em cada iteração (Castilho, 2014).

Para além destes dois métodos, apresentados acima, o programa possui ainda outros como o método HAMT (*Combined Heat and Moisture Finite Element*), que usa uma solução de diferenças finitas unidimensional nos elementos de construção, e o método EMPD (*Moisture Penetration Depth Conduction Transfer Function*), que tem por base a difusão de calor sensível e um algoritmo de armazenamento de humidade de superfície interna. No entanto, como mencionado, só o método das diferenças finitas interessa para este estudo.

O *EnergyPlus* é composto por dois métodos diferentes na formulação do modelo de diferenças finitas (Castilho, 2014):

- Método de Crack-Nicholson – esquema semi-implícito, baseia-se na solução aproximada de Adams Moulton e é considerado de 2ª ordem no tempo. O algoritmo utiliza um esquema implícito de diferenças finitas que contém também uma função de entalpia-temperatura. A formulação implícita para um nó interno é descrita na seguinte expressão:

$$\frac{\rho c_p \Delta x (T_i^{j+1} - T_i^j)}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left[\left(k_w \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right) + \left(k_w \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^j - T_i^j}{\Delta x} \right) \right] \quad (3.10)$$

em que:

T – Temperatura do nó;

i – Nó sendo modelado;

i+1 – Nó adjacente à construção interior;

i-1 – Nó adjacente à construção exterior;

j+1 – Novo intervalo de tempo;

j – Intervalo de tempo prévio;

Δt – Período de tempo de cálculo

Δx – Espessura da camada usada para cálculo das diferenças finitas (sempre menor que a espessura do elemento construtivo respetivo);

c_p – Calor específico do material;

k_w – Condutibilidade térmica da interface entre o nó i e o nó i+1, que se traduz que expressão seguinte:

$$k_w = \frac{(k_{i+1}^{j+1} + k_i^{j+1})}{2} \quad (3.11)$$

k_E – condutibilidade térmica da interface entre o nó i e o nó i-1, que se traduz pela expressão seguinte:

$$k_E = \frac{(k_{i-1}^{j+1} + k_i^{j+1})}{2} \quad (3.12)$$

ρ – densidade do material.

- Método implícito completo – esquema baseado na solução de Adams Moulton e é considerado de 1ª ordem no tempo. Este modelo é traduzido pela seguinte equação:

$$\frac{\rho c_p \Delta x (T_i^{j+1} - T_i^j)}{\Delta t} = k_w \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \quad (3.13)$$

Para este estudo de caso optou-se pelo método implícito completo uma vez que é o pré-definido pelo programa.

A entalpia e a temperatura são relacionadas na equação seguinte:

$$h_i = f_{ht}(T_i) \quad (3.14)$$

Onde,

h_i – Entalpia no nó em análise;

f_{ht} – Função entalpia-temperatura que usa dados de entrada do programa.

Esta equação acompanha as equações descritas acima.

Os valores da entalpia em todos os nós são atualizados e posteriormente, utilizados no desenvolvimento da variável c_p se algum material de mudança de fase estiver a ser simulado, isto através da seguinte equação:

$$c_p = \frac{h_i^{j+1} - h_i^j}{T_i^{j+1} - T_i^j} \quad (3.15)$$

Este processo de iterações faz com que o valor correto da entalpia e o valor correto do calor específico seja usado para cada período de tempo.

No método das diferenças finitas a discretização espacial depende da difusibilidade térmica do material (α) e do intervalo de tempo (Δt) como descreve a equação seguinte:

$$\Delta x = (C\alpha\Delta t)^{0,5} \quad (3.16)$$

O algoritmo também é capaz de definir um coeficiente de temperatura que altera a condutibilidade térmica para cada iteração, pela seguinte expressão:

$$K = K_0 + K_1(T_i - 20) \quad (3.17)$$

em que:

K_0 – É o valor de condutibilidade térmica normal (associado à temperatura de 20 °C);

K_1 – Valor que representa a mudança da condutibilidade térmica por diferença de grau em relação ao valor de 20 °C.

Nos parágrafos acima foi descrito o modo matemático de funcionamento do simulador *EnergyPlus*, no capítulo 4 será descrito o programa onde este está inserido, o *DesignBuilder*.

3.4.COMENTÁRIO SÍNTESE

Neste capítulo analisou-se a temática da transferência de calor abordando os seus conceitos mais importantes. Efetuou-se também uma breve explicação do simulador numérico *EnergyPlus*, assim como a descrição das suas funcionalidades. Este simulador calcula a transferência de calor através do método das diferenças finitas, que se encontra explicado no presente capítulo. Adicionalmente, no próximo capítulo, faz-se uma explicação geral do programa onde se insere este simulador numérico, o *DesignBuilder*, e descrevem-se os dados relativos ao caso de estudo.

4

SIMULAÇÃO NUMÉRICA: DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO E DE CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

4.1. INTRODUÇÃO

O campus da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto é constituído por 19 edifícios, cada um deles designado por uma letra diferente para distinção dos mesmos. O edifício em estudo é designado por Edifício G, mais conhecido por Departamento de Engenharia Civil, que se situa entre o Edifício F (departamento de minas e metalúrgica) e o Edifício I (departamento de eletrotecnia). Este é um edifício constituído por 6 pisos, onde se distribuem gabinetes, salas de reuniões, laboratórios e salas de estudo para apoio aos estudantes de Engenharia Civil. Convém salientar que o 5º piso tem apenas salas técnicas.

Para uma melhor compreensão, dividiu-se este piso em três alas: a ala central, a ala Oeste e a ala Este. Pode-se observar esta divisão na figura seguinte (Figura 4.1).

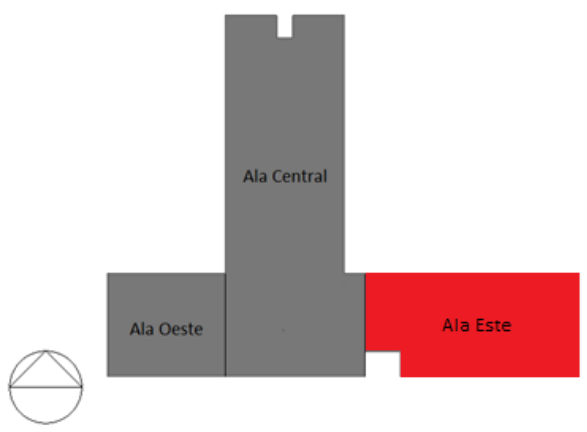


Figura 4.1 - Divisão do 1º piso do Edifício G em 3 alas (DesignBuilder, 2019).

A ala Este e Oeste, de apenas um piso, são as mais desfavoráveis em termos térmicos quando comparados com a ala Central. Os gabinetes situados nestas duas alas apresentam trocas de calor com o meio ambiente através das fachadas, coberturas e pavimentos.

O estudo realizado incidiu sobre a ala Este (Figura 4.1). No Verão, os ganhos solares através dos envidraçados e a produção intensa de calor (computadores, iluminação e equipamentos de escritório) fazem com que os compartimentos aqueçam tornando o seu uso desconfortável.

Tendo como objetivo a resolução destes problemas estudou-se a incorporação de materiais de mudança de fase nos elementos construtivos da ala Este do Edifício G.

Realizaram-se dois cenários, um usando a constituição original dos elementos construtivos e outro adicionando o Material de Mudança de Fase. Posteriormente, foram comparados os resultados para verificar o efeito dos PCM.

O estudo é feito com recurso a ferramentas numéricas, testadas, que permitem a simulação energética do edifício e o estudo de vários cenários de otimização do comportamento térmico do mesmo.

4.2.CASO DE ESTUDO

4.2.1.LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA

O alvo deste estudo serão os gabinetes da ala Este do 1º piso do Departamento de Engenharia Civil (Edifício G), localizado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. As atuais instalações da FEUP localizam-se no polo 2 da Universidade do Porto – Campus da Asprela, freguesia de Paranhos.

Para este caso de estudo selecionaram-se os dados climáticos relativos à cidade do Porto, mais concretamente de Pedras Rubras, situada no concelho da Maia, distrito do Porto. Estes dados foram obtidos no programa *DesignBuilder*, que contém uma ampla lista de dados climáticos para inúmeras cidades a nível mundial.

A temperatura média, na cidade do Porto, varia entre os 14°C, no Inverno, e ao 25°C, no Verão. No entanto, no Verão, em períodos mais secos, pode perfeitamente atingir temperaturas acima dos 30°C e, no Inverno, descer para valores entre os 5 e os 0°C.

A figura seguinte (Figura 4.2), ilustra a disposição dos edifícios que compõem a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A vermelho encontra-se o Departamento de Engenharia Civil.

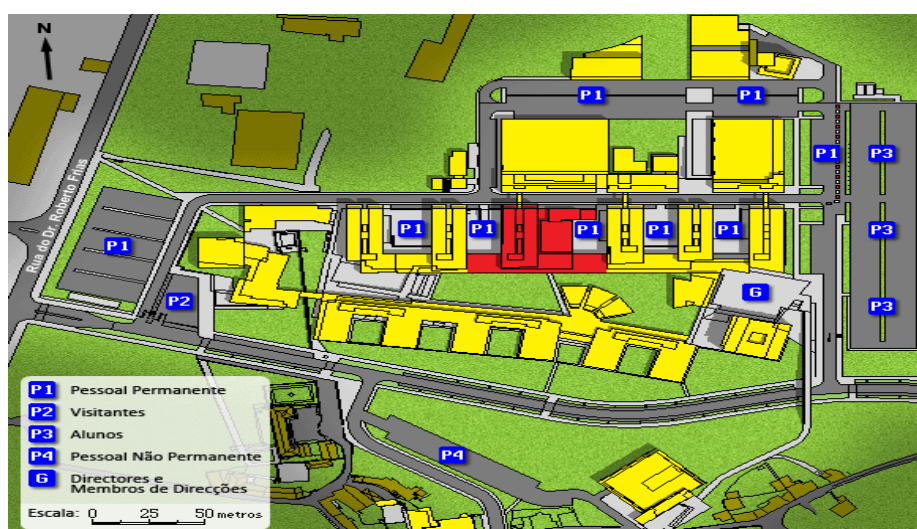


Figura 4.2 - Campus da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Edifício G a vermelho) (FEUP, 2019).

4.2.2.EDIFÍCIO G: DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

4.2.2.1.CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

A figura seguinte (Figura 4.3) contempla as medidas do Edifício G, estando assinaladas a vermelho as medidas da parte do edifício em estudo.

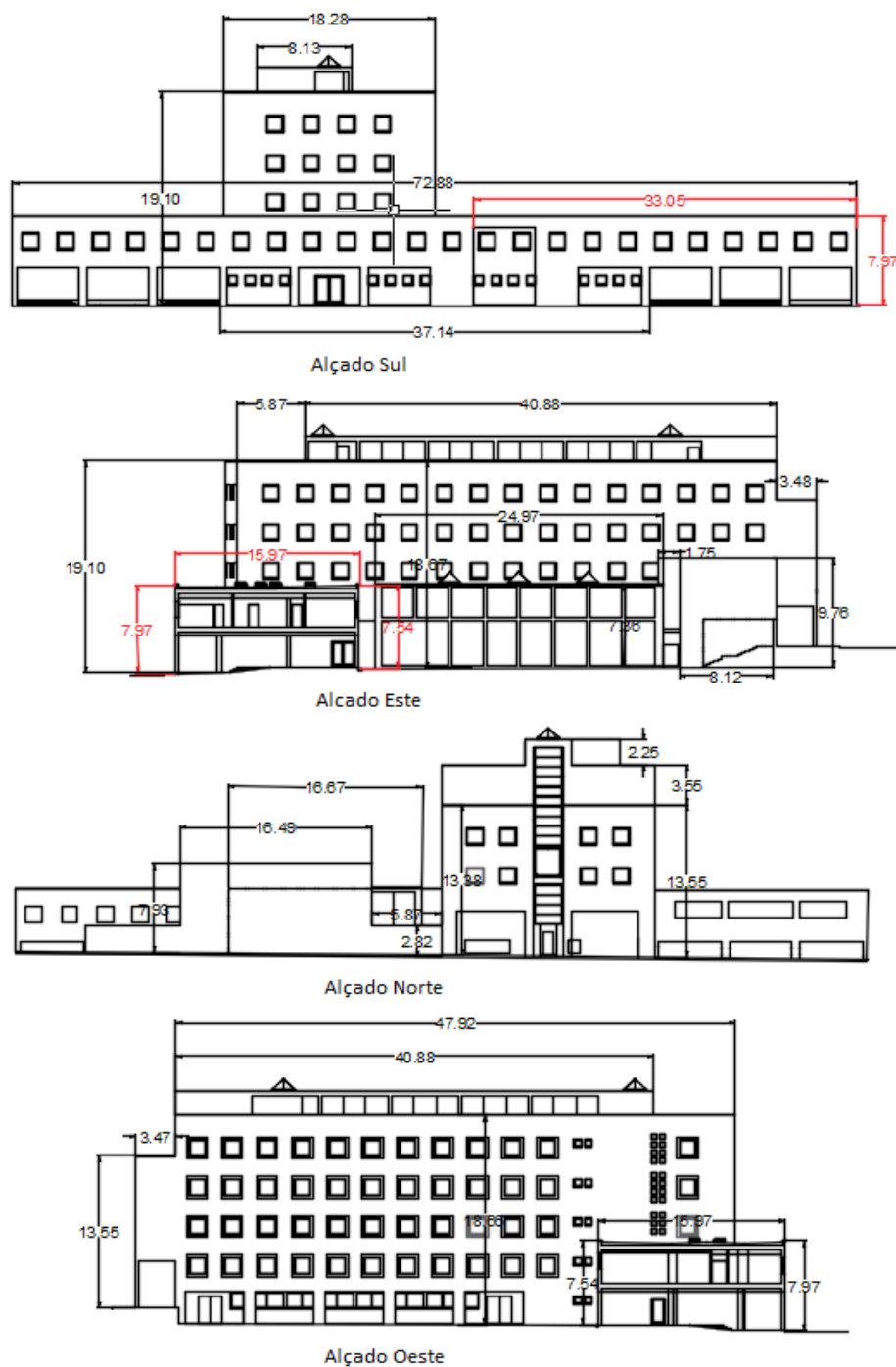


Figura 4.3 - Alçados do Edifício G com descrição de medidas (em metros).

No Edifício G, pode-se observar um desnível de cerca de 2,50m entre a fachada Sul e a fachada Norte do edifício, possui também uma ligeira inclinação de cerca de 0,17m entre fachada Este e a fachada Oeste.

De todas as medidas apresentadas, só as marcadas a vermelho é que têm interesse para este trabalho. A parte em estudo tem uma altura de 7,97m na fachada Sul e 7,54m na fachada contrária, possui também uma largura de 15,97m e um comprimento de 33,05m. O 1º piso em si tem uma altura de 3,5m (ver Figura 4.3).

A parte em estudo, denominada por a ala Este, é constituída por: dezoito gabinetes, uma sala administrativa-secretaria, duas salas de apoio à investigação, um sanitário com uma sala de arrumos na mesma divisão e ainda mais três salas de arrumos.

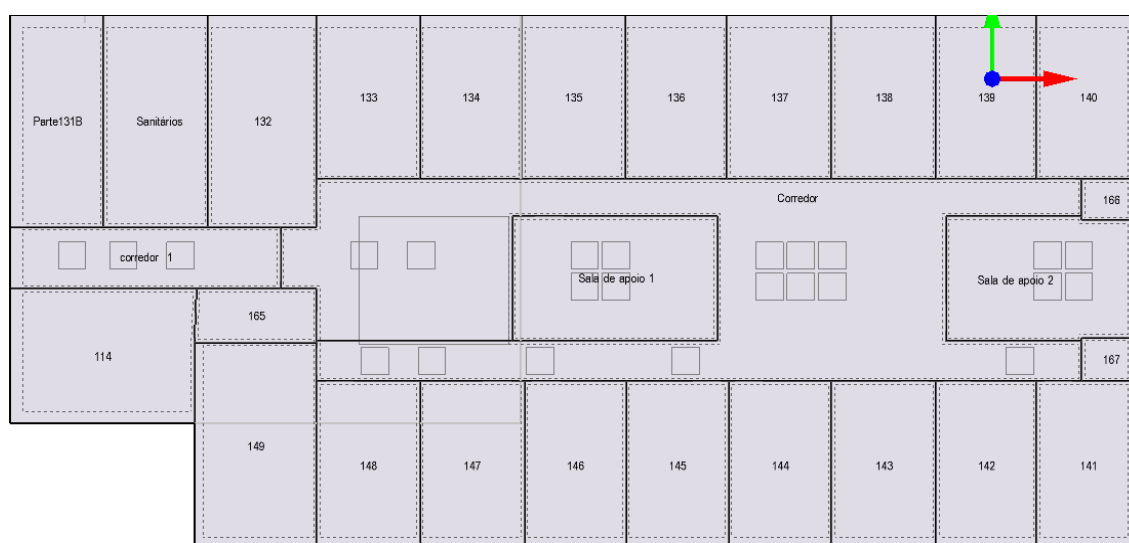


Figura 4.4 - Compartimentos da Ala Este do 1º piso do Edifício G (DesignBuilder, 2019).

Através de alguns cortes construtivos, concedidos pelo responsável dos serviços de manutenção da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, foi possível caracterizar o edifício em termos de pormenores construtivos (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Composição dos diferentes elementos da ala Este do Edifício G (do interior para o exterior).

Elemento	Material
Parede exterior 290mm	Revestimento interior à base de argamassa (40mm)
	Tijolo (200mm)
	Isolante térmico EPS (30mm)
	Revestimento exterior à base de argamassa (20mm)
Parede divisória 180mm	Revestimento interior à base de argamassa (15mm)
	Tijolo (150mm)
	Revestimento exterior à base de argamassa (15mm)

Tabela 4.1 - Composição dos diferentes elementos da ala Este do Edifício G (do interior para o exterior)
(continuação).

Cobertura (flat roof) 471mm	Placa de gesso cartonado (20mm);
	Camada de ar (100mm);
	Laje de betão (200mm);
	Camada de forma (80mm);
	Camada de impermeabilização (1mm);
	Isolante térmico XPS (30mm);
	Camada de pedras soltas (godo) (40mm).
Laje interior 290mm	Linóleo (20mm)
	Camada de Argamassa (50mm)
	Laje de betão (200mm)
	Revestimento exterior à base de argamassa (20mm)
Laje exterior 290mm	Linóleo (20mm)
	Camada de Argamassa (50mm)
	Laje de betão (200mm)
	Revestimento exterior à base de argamassa (20mm)
Vãos envidraçados 25mm	Envidraçado duplo com caixa de ar (6+6+13mm)

4.2.2.2.SISTEMAS DE CLIMATIZAÇÃO DOS COMPARTIMENTOS DA ALA ESTE

Os diferentes compartimentos da ala Este estão equipados com um sistema de aquecimento a gás natural que funciona durante o inverno. O calor proveniente da radiação solar vindo das janelas e claraboias que existem nesta ala é um complemento a este sistema.

Não há nenhum tipo de ventilação mecânica e a ventilação natural que existe surge através da abertura das janelas, das portas e por pequenas infiltrações de ar derivadas a pequenas falhas construtivas.

A inexistência de sistemas de ar condicionado faz com que nas estações mais quentes o arrefecimento dos gabinetes seja feito unicamente pela ventilação natural, já a ventilação dos corredores surge pela abertura das portas interiores. As salas de apoio, situadas no interior desta ala, possuem ventilação mecânica, mas devido ao facto de serem pouco utilizadas não vão ser contabilizadas neste estudo.

4.3. DESIGNBUILDER

4.3.1. BREVE EXPLICAÇÃO SOBRE O PROGRAMA

Para uma melhor percepção do programa em questão irá ser feita uma breve explicação do mesmo para depois se explicar a modelação do edifício e posterior introdução de dados no programa.

O *DesignBuilder* divide-se em diferentes níveis de trabalho:

- **Sítio**
 - **Edifício**
 - **Bloco**
 - **Zona**
 - **Superfície**

No canto superior esquerdo da tela de trabalho do *DesignBuilder*, quando o modo “*Edit*” está selecionado, aparece um conjunto de ferramentas que permitem ao utilizador modelar e caracterizar o edifício da maneira que este pretender.

O *Sítio* é a opção que permite definir a localização do edifício. Neste nível o campo de ferramentas é composto por (DesignBuilder, 2019):

- “**Layout**” – Campo que serve para criar edifícios e mudar o layout dos mesmos.
- “**Location**” – Campo que serve para editar a localização do edifício, os dados climáticos, as poupanças de iluminação natural entre outros.
- “**Region**” – Campo que serve para escolher a região legislativa e os códigos energéticos.

Quando se passa para o nível seguinte, o *Edifício*, é possível construir e caracterizar o edifício, no entanto há uma alteração das ferramentas do canto superior esquerdo, passando a ser constituído por (DesignBuilder, 2019):

- “**Layout**” – Campo que serve para adicionar, editar e apagar blocos do edifício.
- “**Activity**” – Campo que serve para editar os dados relativos à atividade do edifício tais como: tipo de atividades do edifício, densidade de ocupação, conforto, controlo ambiental entre outros.
- “**Construction**” – Campo onde se define a composição e a espessura dos diferentes elementos construtivos. Parede exterior e interior, cobertura plana e inclinada com ou sem ocupação, pisos exteriores ou interiores, terrenos, parede semi-exposta, piso semi-exposto e teto semi-exposto são elementos construtivos apresentados pelo programa podendo estes ser editados de acordo com o que o utilizador pretende. O programa contém uma vasta lista de materiais usuais da construção civil.
- “**Openings**” – Campo onde se define o tipo de janelas e portas que se pretende inserir no edifício. Também é possível introduzir dispositivos de sombreamento para as janelas.
- “**Lighting**” – Campo onde se define a intensidade e o período de funcionamento da luz artificial.
- “**HVAC**” – Campo onde o utilizador pode escolher para o seu edifício um sistema de ventilação natural e/ou mecânico, um sistema de energia auxiliar, um sistema de arrefecimento e/ou aquecimento e controlo da humidade. Nesta área também é possível adotar um sistema para a água quente.

- **“Generation”** – Campo de geração elétrica no local do edifício.
- **“CDF” – Computational Fluid Dynamics** – Campo onde se define parâmetros que estabelecem uma fronteira do CDF. Parâmetros esses que são: temperatura interna de superfície interior/exterior, temperatura superficial interna das janelas, temperatura média do ar interior e temperatura de entrada do ar

Este conjunto de ferramentas, descritas imediatamente acima, mantém-se para os níveis Bloco, Zona e Superfície.

No canto inferior esquerdo da tela de trabalho do *DesignBuilder* aparece outro conjunto de ferramentas que possuem grande importância para a compreensão do trabalho realizado, pois analisam o comportamento térmico do edifício em estudo. Essas ferramentas são (DesignBuilder, 2019):

- **“Edit”** - A caracterização do edifício só é possível com este modo está selecionado.
- **“Visualize”** - Permite a visualização final do edifício com os diferentes elementos construtivos edificados com cores diferentes.
- **“Heating Design”** - Opção de cálculo que permite determinar a potência de um equipamento necessária para satisfazer as necessidades de conforto durante a estação de Inverno, a mais adversa que pode ocorrer na zona geográfica em que o edifício está inserido. Esta simulação contém as seguintes características: temperatura externa constante, velocidade e direção do vento para valores pré-definidos, sem ganhos solares nem ganhos internos (iluminação, ocupação, equipamento, etc), as zonas aquecidas são aquecidas constantemente para atingir a temperatura de conforto utilizando um sistema de aquecimento por convecção simples, inclui consideração e convecção de valor entre zonas com diferentes temperaturas.
- **“Cooling Design”** - Opção de cálculo que permite determinar a potência de um equipamento mecânico de arrefecimento necessária para satisfazer as necessidades de conforto face à estação de Verão, a mais quente que pode ocorrer na zona geográfica em que o edifício está inserido. Esta simulação contém as seguintes características: temperaturas externas periódicas constantes calculadas usando condições climáticas extremas durante a estação de Verão, incluindo ganhos solares pela janela e ventilação programada, inclui também ganhos internos (ocupação, iluminação, equipamento, etc.), considera a condução e convecção de calor entre zonas com diferentes temperaturas.
- **“Simulation”** - Opção de cálculo que gera dados detalhados sobre o desempenho de um edifício usando informações climáticas reais. Esta simulação possui as seguintes características: os dados meteorológicos são provenientes de ficheiros climáticos fornecidos por hora, considera a condução e convecção de calor e entre zonas com diferentes temperaturas, inclui ganhos solares pelas janelas, simulação de equipamentos AVAC e inclui um ou mais dias de pré-aquecimento (ou pré condicionamento), para que ocorra uma correta distribuição de calor entre a massa térmica do edifício no início da simulação. O pré-aquecimento continua até as temperaturas/fluxos de calor em cada zona tenham convergido. Caso não converjam, o pré-aquecimento continua até ao número máximo de dias especificado na opção de calculo.
- **“CDF”** - Computational Fluid Dynamics – Opção de cálculo que fornece informações sobre velocidades, pressões e temperaturas prováveis do ar que possam ocorrer em qualquer ponto através de um volume predefinido de ar no interior e circundantes a espaços de edifícios. O *DesignBuilder* oferece uma análise CFD externa e interna. A análise externa fornece informação sobre a distribuição da velocidade e pressão do ar em volta de um edifício devido ao efeito do

vento, este é importante na localização de caminhos pedestres, localização de pressões locais para localização de equipamentos AVAC e grelhas de extração. Já a análise interna fornece informação sobre a distribuição da velocidade e pressão do ar em espaços interiores. É também calculada a idade do ar para avaliação da qualidade e pureza deste, este é um parâmetro que pode ser usado para avaliar a eficácia dos sistemas AVAC e de ventilação natural.

- **“Daylight”** - Ferramenta que calcula com detalhe os níveis de iluminação de cada zona no plano de trabalho de um edifício. Os cálculos permitem que a luz seja transmitida através das janelas exteriores e englobam os efeitos dos dispositivos de sombra.
- **“Cost and Carbon”** – Esta ferramenta permite ver o custo de construção do projeto do edifício e o carbono incorporado no mesmo.

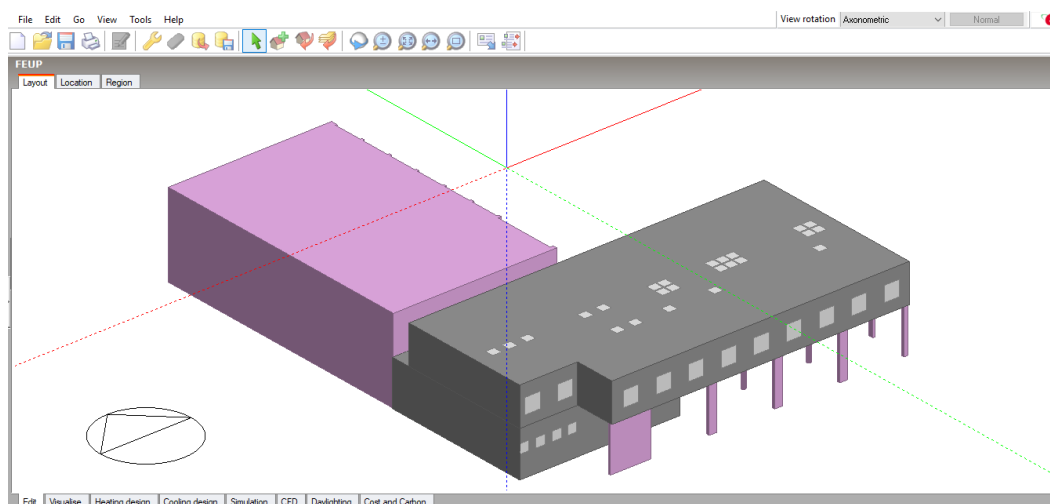


Figura 4.5 - Tela de trabalho do *DesignBuilder* quando o nível "Sítio" está selecionado (DesignBuilder, 2019).

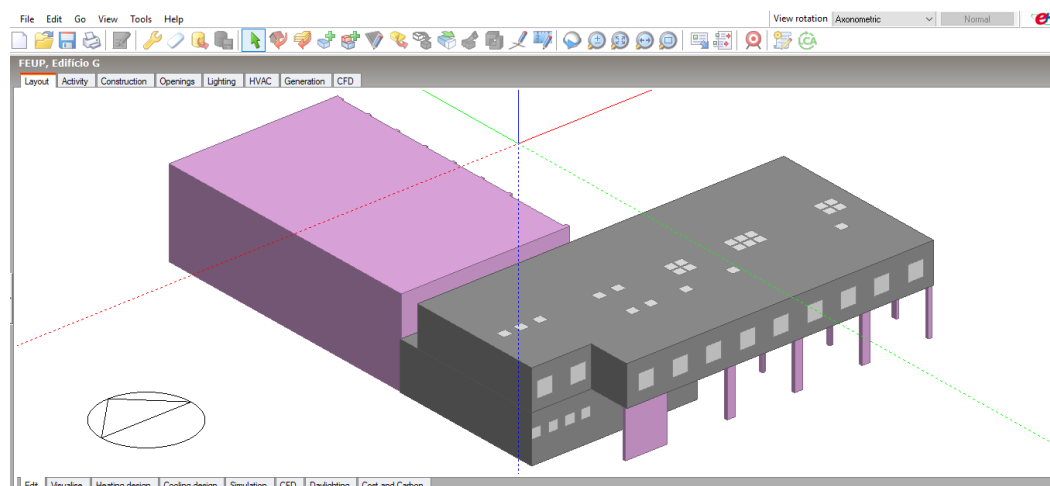


Figura 4.6 - Tela de trabalho do *DesignBuilder* quando o nível "Edifício" está selecionado (DesignBuilder, 2019).

Após feitas as diferentes simulações, os dados podem ser apresentados de diversas formas, tais como tabelas, gráficos e grelhas de valores. A simulação de um edifício pode ser calculada em termos anuais, mensais, diários, horários ou sub-horários, como se verá mais à frente.

4.3.2. MODELAÇÃO DO EDIFÍCIO

Para proceder à modelação do edifício foi necessária a recolha de informações sobre o mesmo, como as suas plantas e os seus alçados, em formato *AutoCAD*. O programa *AutoCAD* permitiu a extração das plantas em formato *.dxf*, formato compatível com simulador *DesignBuilder*.

É de salientar que alguns dados inseridos foram simplificados, como por exemplo nos pormenores construtivos e nos valores referentes à utilização do edifício, devido à falta de informação ou por inaptidão do programa informático. Como estamos perante uma simulação numérica este facto não apresenta problemas.

Após adicionar as plantas do Edifício G no *DesignBuilder*, e tendo todas as medidas do mesmo foi possível construir por cima destas, permitindo uma modelação com exatidão de todos os pisos e compartimentos do edifício.

Inicialmente, modelou-se o Edifício G na totalidade (Figura 4.7), mas devido há quantidade de informação deste ficheiro, a simulação tornava-se muito lenta. Por isto, optou-se por trabalhar apenas com a ala Este, como já foi mencionado no ponto 4.1. Esta simplificação não causa influência no comportamento térmico da parte em estudo.

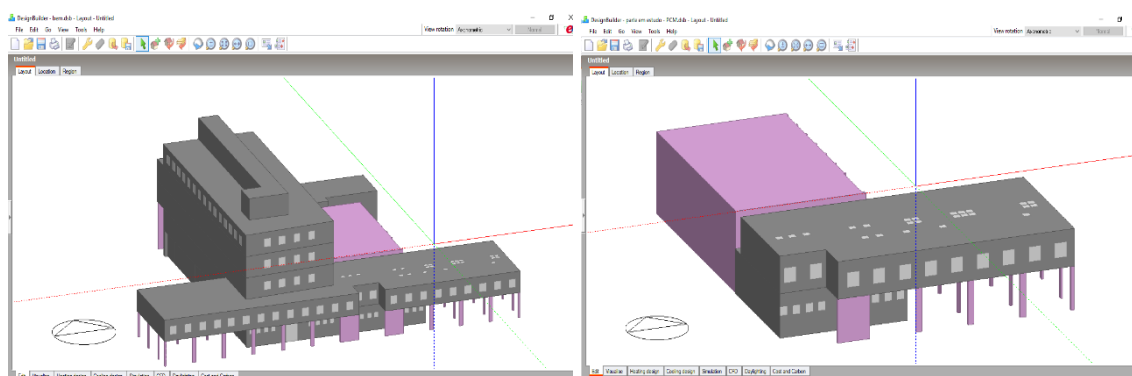


Figura 4.7- Modelação do edifício G na totalidade e da parte em estudo (Ala Este), respetivamente (DesignBuilder, 2019).

A modelação foi composta por dois blocos e um bloco componente. O primeiro bloco compõe o piso 0, este não tem nenhum compartimento pois não vai apresentar influência no estudo. Já o segundo bloco, que corresponde ao 1º piso, possui todos os compartimentos e pormenores que compõem o edifício. Em relação ao bloco componente, é apenas um bloco ilustrativo que representa o laboratório de Construções Civil, não tendo também qualquer influência no estudo.

Na figura seguinte (Figura 4.8), pode-se observar a distribuição espacial da ala Este, estando identificados todos os compartimentos com os seus respetivos usos, como por exemplo, gabinetes, corredores, arrumos, sanitários e salas de apoio.

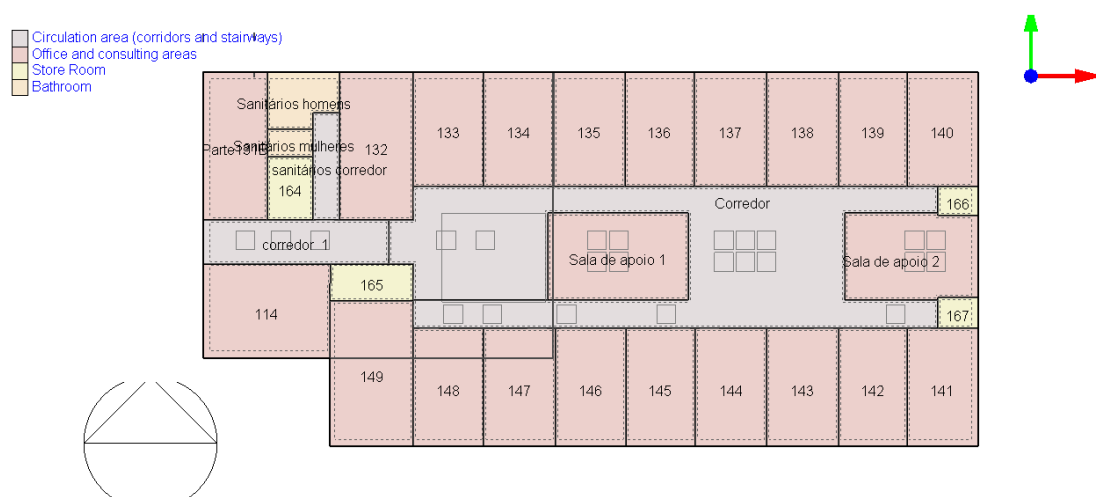


Figura 4.8 - Distribuição espacial da Ala Este com os diferentes compartimentos (DesignBuilder, 2019).

Após concluída a modelação, o programa fornece informações sobre a área útil de pavimento dos diferentes compartimentos e dos seus envidraçados (janelas e claraboias), pode-se consultar esta informação na tabela apresentada abaixo (Tabela 4.2).

Tabela 4.2 – Área do pavimento útil e dos vãos envidraçados (DesignBuilder, 2019).

Compartimento	Área (m ²)	Envidra. (m ²)	Compartimento	Área (m ²)	Envidra. (m ²)
Gabinetes	132	19,99	Gabinetes	141	15,23
	133	14,63		142	14,66
	134	14,50		143	15,30
	135	14,68		144	15,133
	136	14,57		145	14,96
	137	14,9		146	14,91
	138	14,89		147	15,3
	139	14,27		148	15,03
	140	14,81		149	22,09
Sala administrativa - secretaria	114	21,58	Sala de apoio - investigação	150	22,15
				151	20,68
Sanitários	Feminino	2,25	Salas de arrumos	164	5,34
	Masculino	6,67		165	5,06
Corredores				166	2,09
				167	2,24

A ala Este do edifício possui uma área útil de pavimento de 487m² e uma área de envidraçados (janelas e claraboias) de 58,74m².

Relativamente à orientação dos envidraçados, nomeadamente as janelas, verifica-se que estão orientadas a Sul e a Norte.

Pela análise da carta solar, é possível tirar algumas conclusões em relação à orientação das fachadas e vãos envidraçados, tais como (Cunha, 2005):

- No Inverno, a altura do sol é menor, por isso uma superfície voltada a Sul recebe raios solares durante um período maior que qualquer outra orientação. Por outro lado, uma superfície voltada a Norte não está sujeita a uma incidência direta do sol logo é uma superfície que não ganha muita energia solar.
- No Verão, o tempo de incidência solar numa superfície orientada a Sul é menor do que no inverno, enquanto que o sol está mais alto.

Tendo esta informação em conta, a localização dos vãos envidraçados da Ala Este seria perfeita, visto que no Inverno a fachada orientada a Sul teria uma boa incidência solar e o aquecimento central compensaria a falta de insolação na fachada Norte. Já no Verão, esta também seria uma disposição benéfica pois os espaços a Sul não teriam uma grande incidência solar.

Contudo, estamos a falar de uma ala que está desprotegida quer a nível superior quer a nível inferior, o que leva a que ocorram muitas perdas de energia no Inverno e muitos ganhos de energia no Verão. No Inverno como existe aquecimento central os utilizadores não se apercebem deste facto, mas no verão como não há nenhum dispositivo de arrefecimento, as temperaturas dos compartimentos elevam-se mais do que é suposto, principalmente os que estão voltados a Sul.

O *DesignBuilder* permite observar a posição solar nas diferentes horas do dia através do efeito de sombra na opção “*Visualize*”. Como já foi referido anteriormente, a incidência solar no Inverno e no Verão são diferentes, pelo que se colocou no programa um dia do horário de Inverno, e outro do horário de Verão, para se observar as diferentes incidências solares. As imagens que se seguem (Figura 4.9), são referentes à posição solar no dia 29 de janeiro.

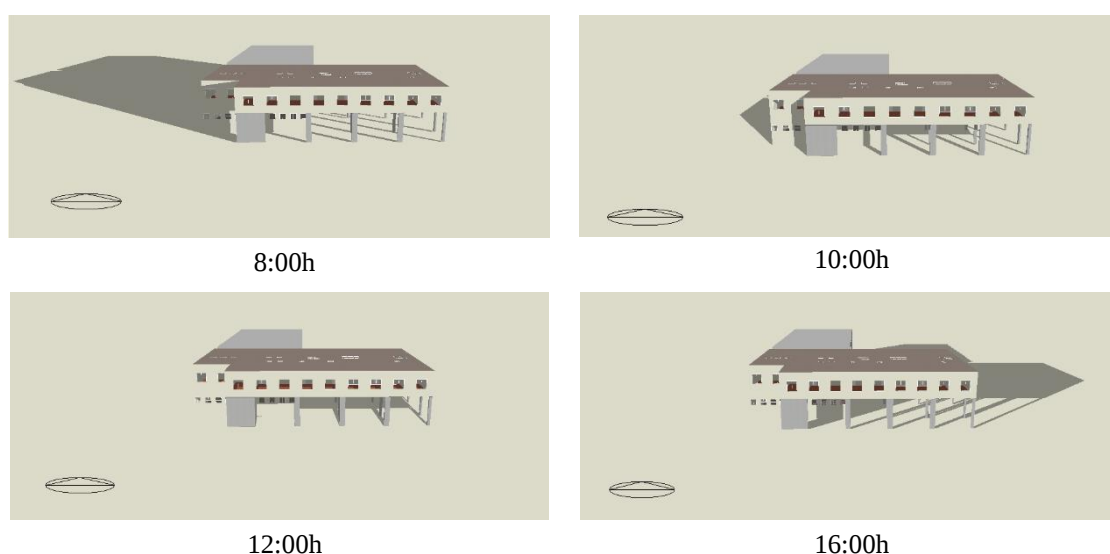


Figura 4.9 - Diferentes posições solares no dia 29 de janeiro (DesignBuilder, 2019).

Como estamos perante um dia de inverno o simulador só mostra a posição solar até às 16:00 horas.

As imagens seguintes (Figura 4.10) são referentes ao dia 5 de Agosto.

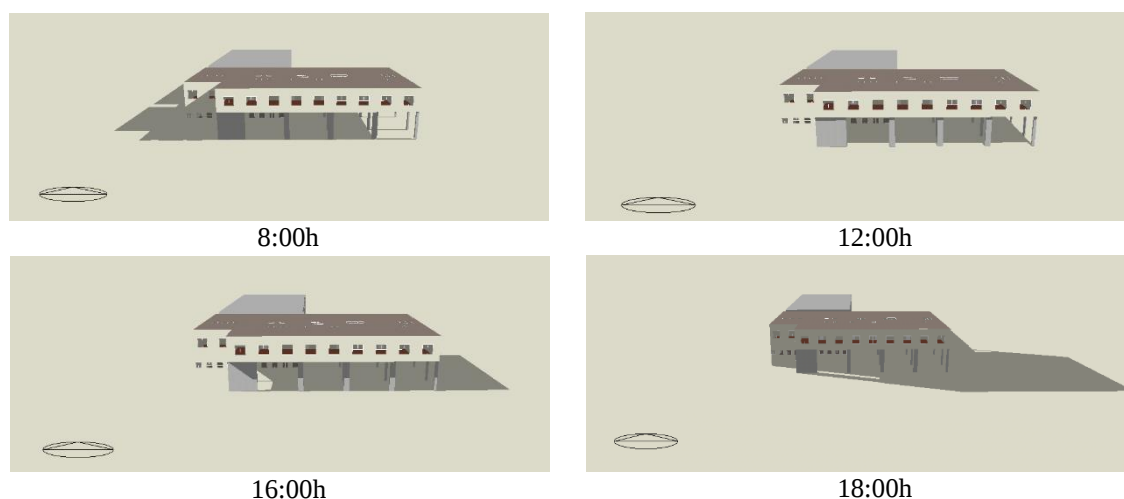


Figura 4.10 - Diferentes posições solares no dia 5 de Agosto (DesignBuilder, 2019).

Verifica-se que a fachada a Sul, tanto na estação de Inverno como na de verão, tem uma grande incidência solar durante o dia. Observa-se também que a fachada a Norte não recebe muita insolação.

É de salientar que existem edifícios na envolvente do edifício G, no entanto, não vai ser uma condicionante contabilizada neste estudo. Para simplificar o trabalho realizado, ir-se-á considerar que os edifícios envolventes não afetam o comportamento térmico da Ala Este do edifício G.

4.4.INTRODUÇÃO DE DADOS NO PROGRAMA

Concluída a modelação do edifício, passou-se à introdução de alguns dados importantes no simulador, que fazem com que as condições do mesmo se assemelhem o mais possível à realidade.

4.4.1.PORMENORES CONSTRUTIVOS

Os primeiros dados a serem inseridos foram os referentes aos pormenores construtivos. Como já foi mencionado anteriormente, o programa possui uma diversa lista de materiais de construção, o que permite que os materiais dos pormenores construtivos da simulação sejam muito parecidos aos do edifício real. A composição dos elementos construtivos do Edifício G, no programa *DesignBuilder*, estão representados na tabela seguinte (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Composição dos elementos construtivos introduzidos no *DesignBuilder* (DesignBuilder, 2019).

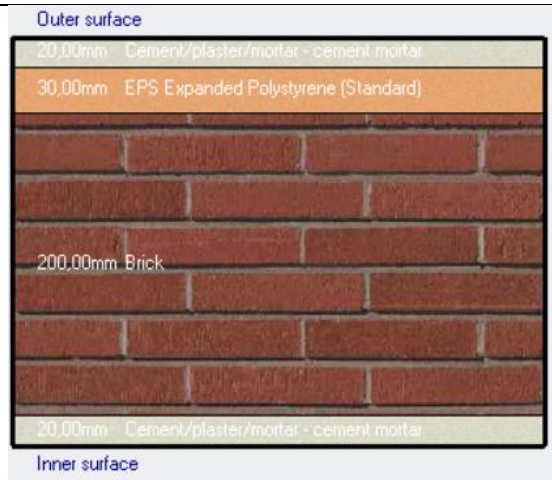
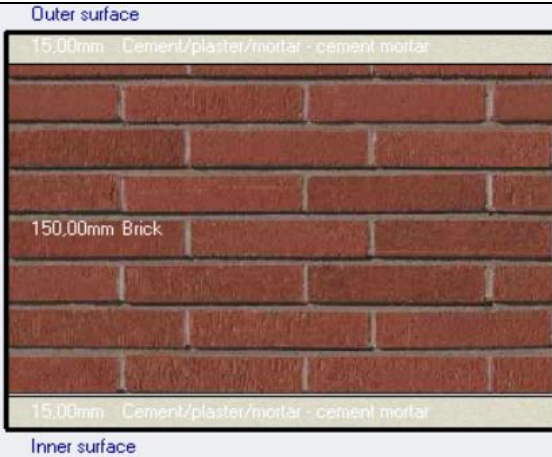
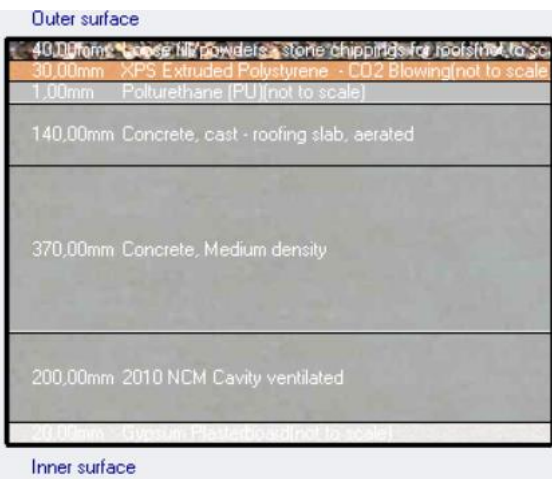
Elemento construtivo	Ilustração <i>DesingBuilder</i>
• Parede exterior Exterior - Reboco de argamassa (20mm); - Isolante EPS (30mm); - Tijolo (200mm); - Reboco de argamassa (40mm). Interior	
• Parede divisória Exterior - Reboco de argamassa (15mm); - Tijolo (150 mm); - Reboco de argamassa (15mm) Interior	
• Cobertura (Flat roof) Exterior - Godo (40 mm); - Isolante XPS (30mm); - Membrana impermeável de poliuretano (1mm); - Camada de forma (80 mm); - Laje de betão densidade média (200 mm); - Espaço de ar ventilado (100 mm); - Placa de gesso cartonado (20 mm). Interior	

Tabela 4.3 – Composição dos elementos construtivos introduzidos no DesignBuilder (DesignBuilder, 2019)
(Continuação).

• Piso exterior Exterior - Reboco de argamassa (20 mm); - Laje de betão (200 mm); - Camada de betão - densidade média (40 mm) - Camada de linóleo (20 mm); Interior	
• Piso interior Exterior - Reboco de argamassa (20 mm); - Laje de betão (200 mm); - Camada de betão - densidade média (40 mm) - Camada de linóleo (20 mm); Interior	
• Vãos envidraçados Envidraçado duplo com caixa de ar (6+6+13 mm)	

4.4.2. GANHOS INTERNOS DE ENERGIA

Após efetuada a escolha dos materiais foi necessário atribuir funções a cada compartimento.

O *DesignBuilder* permite fazer uma distinção dos espaços, fornecendo uma vasta lista de diferentes compartimentos por categorias de edifícios. O programa gerou automaticamente um conjunto de valores, com base na ocupação de cada espaço, e os mesmos podem ser consultados na tabela que se segue (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Valores de densidade de ocupantes, metabólicos e ganhos energéticos retirados do *DesignBuilder* (DesignBuilder, 2019).

Compartimento (designação <i>DesignBuilder</i>)	Densidade de Ocupação (Ocupante/m ²)	Taxa Metabólica por ocupante (W/ocupante)	Fator metabólico	Ganhos com a iluminação (W/m ² /100 lux)
Gabinetes (Office and consulting areas)	0,1030	123	0,90	5

A tabela apresentada acima (Tabela 4.4), apresenta alguns dos diferentes valores gerados pelo simulador. Apenas estão apresentados os valores referentes aos gabinetes, pois é nestes que os utilizadores passam a maioria do seu tempo.

Os gabinetes, possuindo todas dimensões semelhantes, apresentam uma densidade de ocupação de 0,1030 ocup. /m². No que diz respeito à taxa metabólica, o *DesignBuilder* atribui um valor de 123 de potência produzida por ocupante aos *office and consulting areas*. O fator metabólico pode variar entre 1 para o sexo masculino e entre 0,85 para o sexo feminino, o programa assumiu um valor de 0,90.

Quanto aos ganhos com iluminação adotaram-se os valores gerados pelo programa de 5 W/m²/100lux.

4.4.3. CLIMATIZAÇÃO DOS GABINETES

Como já foi dito anteriormente, no ponto 4.2.2.2, os gabinetes só possuem ventilação natural. Esta pode ser feita através da circulação do ar por janelas exteriores e portas interiores ou por infiltrações do ar provocadas por defeitos construtivos.

É necessário explicar alguns conceitos que estão associados à ventilação natural no simulador *DesignBuilder* para uma melhor compreensão deste aspeto. A ventilação natural no programa possui duas opções: a opção *Schedule Natural Ventilation* e a opção *Calculated Natural Ventilation*. A primeira define explicitamente o valor do caudal de renovações de ar em cada zona e o valor constante do caudal de infiltração, estabelecendo um horário de funcionamento e uma gama de temperaturas em que a ventilação natural ocorre, chamada *setpoint temperature*. Por outro lado, a opção *Calculated Natural Ventilation* calcula o caudal de infiltração e de circulação do ar, baseando-se na abertura das janelas, fissuras, flutuações e diferenças de pressão derivadas do vento, controlando-o através da *setpoint temperature*. A *Calculated Natural Ventilation* aproxima-se mais da realidade, pois na realidade a ventilação não pode ser controlada com horário de funcionamento. Apesar disto, se for conhecida a ordem de grandeza do edifício, o modo *Schedule Natural Ventilation* apresenta resultados coerentes com os reais, segundo o ficheiro *help* do programa. Com base nisto, selecionou-se a opção *Schedule Natural Ventilation* (Castilho, 2014; DesignBuilder, 2019).

A esta seleção estão associados alguns valores, sendo um deles a infiltração do ar por pequenas fissuras, no programa chamado de *Airtightness*. Este apresenta um valor de 0,7 renovações por hora (rph).

Outro valor associado é o valor do caudal de circulação de ar devido a aberturas exteriores, sendo este de 10 l/s por ocupante.

Apesar de não existir ar condicionado no edifício irá ser considerado por uma questão de tratamento de dados em relação à estação de verão, para que se possa comparar consumos. Este equipamento tem um índice de eficiência de energia (EER) de 4,5.

4.4.4. TEMPERATURA NO INTERIOR DO EDIFÍCIO

Também é possível escolher a temperatura pretendida para o interior do edifício, esta escolha deve ter em atenção a cidade em que se pretende simular o edifício.

A temperatura interior divide-se em dois campos: o *Heating Setpoint Temperature* (estação de inverno) e o *Cooling Setpoint Temperature* (estação de verão).

O primeiro subdivide-se nas seguintes opções preenchíveis: *Heating* e *Heating set back*, e o segundo subdivide-se em *Cooling* e em *Cooling set back*. O *Heating* e o *Cooling* correspondem à temperatura no interior do edifício durante o período em que este se encontra ocupado. Já o *Heating set back* e o *Cooling set back* representam a temperatura no interior do edifício no período em que este não se encontra ocupado. Considerou-se para a estação de verão um *cooling* de 23°C e um *cooling set back* de 27°C. Para esta simulação classificou-se o edifício como “*office and consulting áreas*”, que considera o período de ocupação das 6:00 horas às 18:00 horas.

4.5. CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

4.5.1. ZONAS A SIMULAR

Como já foi referido os gabinetes são os compartimentos que mais importa estudar, pois é neles que os utilizadores passam mais tempo. Se estes tiverem condições desagradáveis os utilizadores estarão desconfortáveis.

O programa não só permite fazer uma simulação do edifício total como também permite simular por zona. Por conseguinte, não só vai ser feita uma análise da ala Este no seu global, mas também irá ser efetuada uma análise de dois gabinetes, um com fachada voltada a Norte, outro com fachada orientada a Sul, apenas para a estação de Verão. Os gabinetes escolhidos serão os mais desfavoráveis, ou seja, os que se situam na zona onde não existe nem piso inferior nem piso superior. Desta forma, serão excluídos da análise os gabinetes 114, 132, 133, 134 e 131B. Os gabinetes 147, 148 e 149 também serão excluídos pois possuem uma parte com piso inferior, então deixam de ser considerados como “mais desfavoráveis”. Os gabinetes que podem ser alvo de análise são o 135, 136, 137, 138, 139, 140, orientados a Norte, e o 141, 142, 143, 144, 145 e 146, orientados a Sul.

4.5.2. OPÇÕES AVANÇADAS DE SIMULAÇÃO

Nos parágrafos que se seguem irão ser explicadas algumas opções que o programa possui antes de passar ao último passo, a simulação.

Num primeiro momento o *DesignBuilder* permite escolher a altura do ano da simulação. Este também possui semanas críticas pré-definidas de verão e inverno:

- *Summer design week* – de 5 a 11 de agosto.
- *Summer typical week* – de 15 a 21 de julho.
- *Winter design week* – de 22 a 28 de janeiro.
- *Winter typical week* – de 29 de janeiro a 4 de fevereiro.

Para este estudo, como só se vai simular a estação de verão escolheu-se o *Summer design week*, devido a ser uma semana em que as intensidades de cargas térmicas são mais elevadas. O software permite

também escolher o tipo de intervalo de simulação: anual e mensal, diário, horário e sub-horário. Optou-se por fazer uma análise horária.

Após isto, entra o *EnergyPlus* no seguinte campo de opções. Como já mencionado, este é uma ferramenta de simulação energética de edifícios que se encontra incorporado no *DesignBuilder*, possuindo quatro métodos de cálculo numérico (EnergyPlus, 2019):

- *Conduction Transfer Function (CTD)*
- *Finite Difference (CondFD)*
- *Combined Heat And Moisture Finite Element (HAMT).*
- *Moisture Penetration Depth Conduction Transfer Function (EMPD)*

Foi selecionado o método das diferenças finitas, como referido anteriormente.

De seguida, e ainda no mesmo campo, é possível selecionar os *timesteps*, onde existe um conjunto de opções no qual se escolheu a opção de 30 *timesteps*, isto significa que os cálculos são refeitos 30 vezes por hora. Foram escolhidos estes *timesteps* devido a uma recomendação do programa, este diz que quando se está a simular materiais de mudança de fase deve-se usar os 30 *timesteps*.

Outra opção de escolha que o programa oferece é em relação à temperatura de controlo, que pode ser:

- *Air temperature* - Controla as temperaturas médias do ar da zona para as temperaturas do ponto de ajuste de aquecimento e arrefecimento.
- *Operative temperature* - Controla a temperatura ambiente usando 0,5 de fração radiante.
- *Others* – pode-se inserir a fração de controle de temperatura radiante.

Optou-se pela opção de temperatura do ar em detrimento das outras. No entanto, ao fim da simulação é fornecido um excel de resultados, onde contém a temperatura do ar, temperatura operativa e temperatura radiante. Na análise de dados a temperatura que vai ser analisada vai ser a temperatura operativa pois é a temperatura que os ocupantes sentem quando estão no compartimento. Deste modo, esta é a temperatura que mais relevância tem.

Para além de tudo isto, o programa ainda permite controlar os ganhos solares, pela consideração ou omissão dos edifícios envolventes enquanto elementos de sombreamento, no entanto não foi selecionada esta opção.

As opções selecionadas e mencionadas acima podem ser vistas na figura abaixo (Figura 4.11).

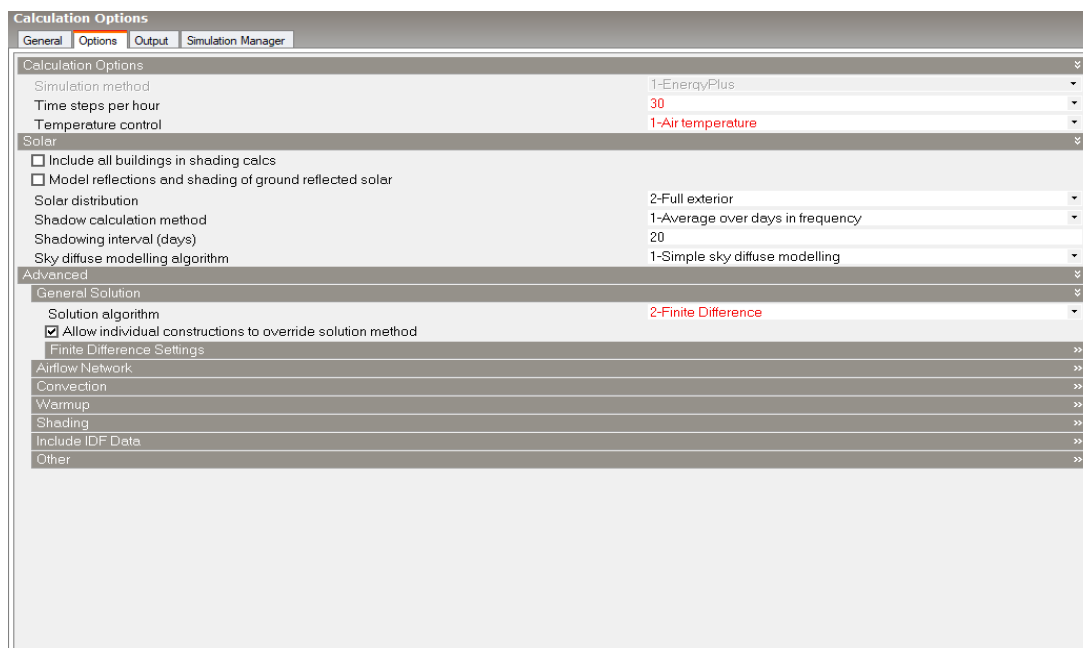


Figura 4.11 - Opções de calculo feitas no *DesignBuilder* (DesignBuilder, 2019).

4.5.3.HIPÓTESES DE SIMULAÇÃO

O objetivo deste estudo é comparar o comportamento térmico e os consumos energéticos de compartimentos da ala Este, com e sem a incorporação de materiais de mudança de fase. Para isto, foi necessário adicionar à simulação sistemas de arrefecimento para se conseguir observar os efeitos da colocação de PCM.

Primeiramente, irá-se fazer uma simulação da ala Este com os seus materiais correntes e de seguida irá se fazer uma simulação com a introdução do PCM. Após isto, irá ser introduzido o sistema de arrefecimento e irá ser feita uma análise com e sem PCM. Todas as simulações serão feitas para a estação de verão. Os compartimentos alvo de estudo serão os gabinetes 137 e 144.

4.5.3.1.INTRODUÇÃO DE PCM NOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Foram introduzidos em todos os elementos construtivos, da ala Este do Edifício G, Materiais de mudança de fase a fim de melhorar as condições térmicas e reduzir os consumos de energia. O programa possui uma lista com diferentes PCM, no entanto também permite adicionar outros tipos deste material.

Neste estudo, optou-se por adicionar novos PCM ao programa, escolhidos consoante as necessidades e características dos compartimentos em estudo, ou seja, averiguando a temperatura operativa média de cada um e com base nisso seleccionar a temperatura de fusão adequada. As características do PCM, que serão introduzidos nos gabinetes nas simulações presentes no Capítulo 5, estão apresentados na tabela seguinte (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Características do PCM para simulações dos gabinetes 137 e 144, indicando se é utilizado ou não sistemas de climatização.

Gabinete	Sistema de climatização	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (kJ/kg.K)	Densidade (kg/m ³)	Entalpia (kJ/kg)	Temperatura de fusão (°C)
137	Não	0,2	2	760	66	27,5
144	Não	0,2	2	760	66	29
137	Sim	0,2	2	760	66	24
144	Sim	0,2	2	760	66	24,5

A introdução deste material nos elementos construtivos esta descrita na tabela seguinte (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 - Composição dos elementos construtivos com PCM incorporado.

Parede exterior Exterior - Reboco de argamassa (20mm); - Isolante EPS (30mm); - Tijolo (200mm); - PCM (100mm) - Reboco de argamassa (20mm). Interior	Parede divisória Exterior - Reboco de argamassa (15mm); - Tijolo (150mm); - PCM (5mm) - Reboco de argamassa (15mm) Interior
Cobertura (Flat roof) Exterior - Godo (40mm); - Isolante XPS (30mm); - Membrana impermeável de poliuretano (1mm); - Camada de forma (80mm); - Laje de betão densidade média (200mm); - Espaço de ar ventilado (100mm); - PCM (100mm) - Placa de gesso cartonado (20mm). Interior	Pavimento exterior/interior Exterior - Reboco de argamassa (20mm); - Laje de betão (200 mm); - Camada de betão – densidade média (40mm) - PCM (100mm) - Camada de linóleo (20mm); Interior

4.6.COMENTÁRIO SÍNTESE

Neste capítulo fez-se uma pequena descrição do edifício em estudo. Também é descrita a modelação virtual no programa *DesignBuilder*, começando-se por modelar o edifício na totalidade e, depois, optando-se por modelar apenas os gabinetes da ala Este.

Ainda à cerca do programa *DesignBuilder*, é feita uma pequena introdução, acompanhada de uma breve explicação das suas funcionalidades. São também descritos os dados introduzidos no programa, nomeadamente, o tipo de materiais de construção, o uso de cada compartimento e as temperaturas de conforto para a estação de arrefecimento. Este programa, com base em algumas opções escolhidas, também fornece um conjunto de valores associados a essas escolhas, como, por exemplo, a densidade de ocupação, a taxa metabólica, o fator metabólico, entre outros.

Fez-se a reprodução do edifício, tanto a nível construtivo, como a nível de condições térmicas e energéticas, o mais próximo possível da realidade.

Nesta fase, anterior à simulação, definiu-se o período do ano e o tipo de intervalos em que se pretende fazer a simulação, bem como, o método de simulação e a temperatura de controlo.

No próximo capítulo, serão tratados os dados obtidos nos cenários descritas.

5

SIMULAÇÃO NUMÉRICA: ANÁLISE E COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

5.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo integra as simulações de dois gabinetes da ala Este do Edifício G, durante a semana crítica da estação de arrefecimento.

As simulações consistiram na análise dos gabinetes 137 e 144 com e sem equipamentos de arrefecimento.

Primeiramente, foi feita uma análise às temperaturas operativas de cada gabinete para cada simulação, obtendo a média destas temperaturas. Com base nisto foi selecionada a temperatura de fusão do PCM para cada caso.

Posteriormente, foram analisados os resultados, verificando a influência dos PCM nos compartimentos, observando as alterações nas temperaturas e nos consumos energéticos.

5.2. SIMULAÇÕES

Neste estudo, foram alvo de análise os gabinetes 137 e 144. Estes situam-se numa parte do edifício que não possui nem piso superior nem piso inferior, apresentando deste modo trocas com a envolvente através das paredes, pavimento e cobertura. Para cada simulação, foi feita uma seleção da temperatura de fusão, a partir da análise da temperatura operativa da semana mais crítica da estação de verão, determinada pelo *DesignBuilder* (Ver Capítulo 4, ponto 4.5.2). Lembra-se que esta semana ocorre entre os dias 5 e 11 de Agosto (começando no dia 5, terça-feira à 1:00 hora, e acabando dia 11, segunda-feira às 23:00 horas).

Para facilitar a análise de dados e evitar a sobrecarga de resultados, visto que o programa fornece resultados horários para toda a semana, optou-se por fazer uma análise apenas para dois dias. Foram escolhidos os dias 6 e 7 de Agosto (quarta-feira e quinta-feira) por serem dias a meio da semana, não estando os resultados influenciados pela pausa do fim de semana, quando não existe nenhum equipamento ligado.

5.2.1. SIMULAÇÃO Nº1: GABINETE 137 NAS SUAS CONDIÇÕES REAIS

Na primeira simulação foi feita uma análise do comportamento térmico do gabinete 137, nas condições a que está sujeito no dia a dia, ou seja, sem nenhum sistema de arrefecimento, considerando apenas que este possui ventilação natural. Foi calculada uma média da temperatura operativa do espaço para a

semana crítica obtendo-se uma temperatura de 28,5°C, como se pode observar no gráfico seguinte (Figura 5.1).

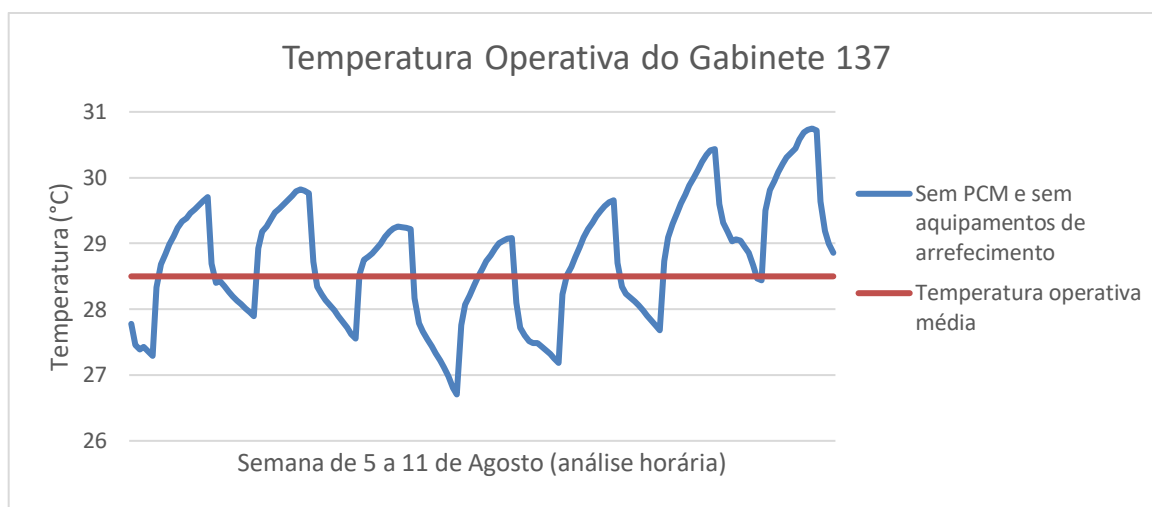


Figura 5.1 – Temperatura Operativa do Gabinete 137, com a temperatura operativa média assinalada a vermelho.

Pela análise do gráfico (Figura 5.1), observam-se sete oscilações distintas, cada uma pertencente a cada dia da semana crítica, obtidas com os resultados horários. O gráfico que se segue (Figura 5.2) apresenta as temperaturas operativas para os dois dias selecionados e observa-se que a temperatura oscila entre os 30°C e os 27,5°C.

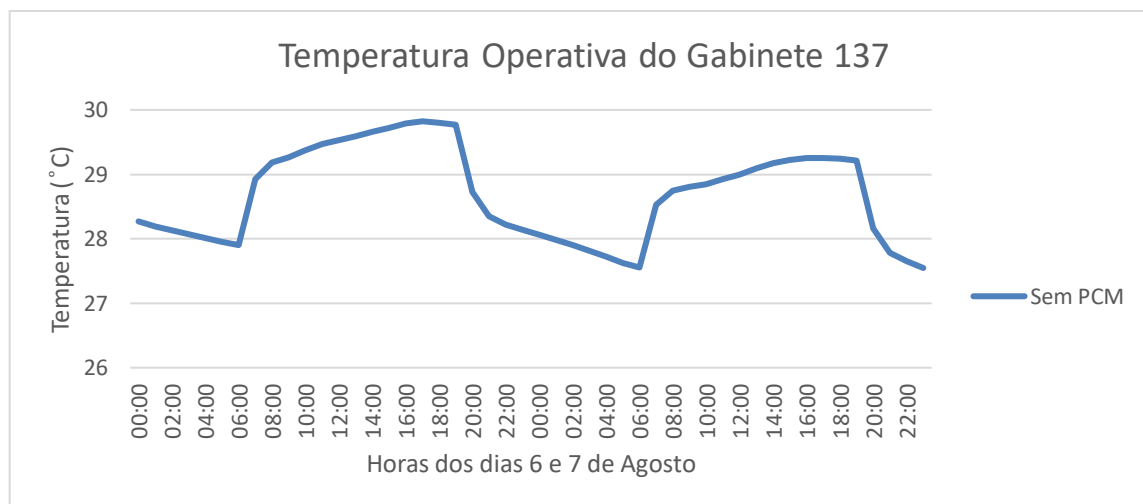


Figura 5.2 – Temperatura Operativa do Gabinete 137 para os dias 6 e 7 de Agosto.

Apesar da temperatura de fusão do PCM ser baseada na temperatura operativa média do gabinete, foi necessário baixar o ponto de fusão do PCM para os 27,5°C. Como o PCM atua durante toda a estação de arrefecimento, podem haver semanas em que as temperaturas sejam mais baixas, daí ter que se baixar a temperatura de fusão.

Após esta análise, introduziu-se uma camada de PCM em todos os elementos construtivos do gabinete com temperatura de fusão de 27,5°C, com intuito de observar as melhorias no conforto térmico provocadas por esta incorporação.

O gráfico que se apresenta de seguida (Figura 5.3), retrata a diminuição da temperatura operativa do gabinete após a introdução do material de mudança de fase, baixando a de temperatura em cerca de 1°C.

Embora tenha havido uma diminuição da temperatura com a incorporação do PCM, não se atingiu a temperatura de conforto. Para se atingir esta temperatura terá que se adicionar um equipamento de arrefecimento. Este cenário será analisado no ponto que se segue.

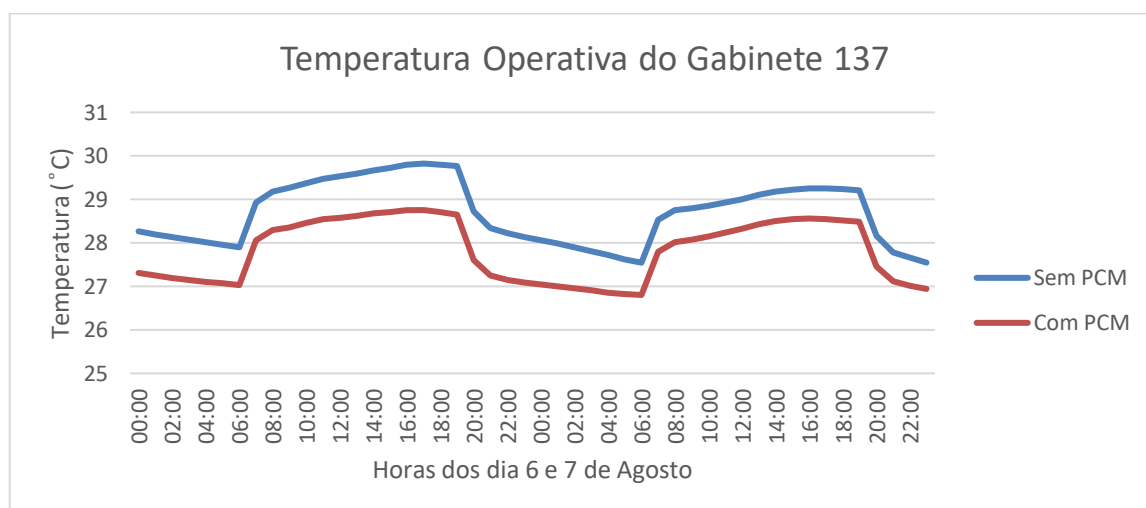


Figura 5.3 – Temperaturas Operativas do Gabinete 137 com PCM e sem PCM nos dias 6 e 7 de Agosto.

5.2.2.SIMULAÇÃO Nº2: GABINETE 137 COM EQUIPAMENTO DE ARREFECIMENTO

Depois de se averiguar a temperatura do gabinete nas suas condições reais, passou-se à análise da mesma, mas com um equipamento de ar-condicionado. Este possui um índice de eficiência de energia (EER) de 4,5.

Fez-se, primeiramente, uma análise às temperaturas do compartimento apenas com o sistema de arrefecimento, que se encontra ligado nos períodos de ocupação do edifício, das 6:00 às 18:00 horas.

Em relação à temperatura de fusão, calculou-se a média da temperatura operativa durante a semana nas condições descritas, obtendo-se um valor de 24°C. Esta temperatura foi a escolhida para o PCM (Figura 5.4).

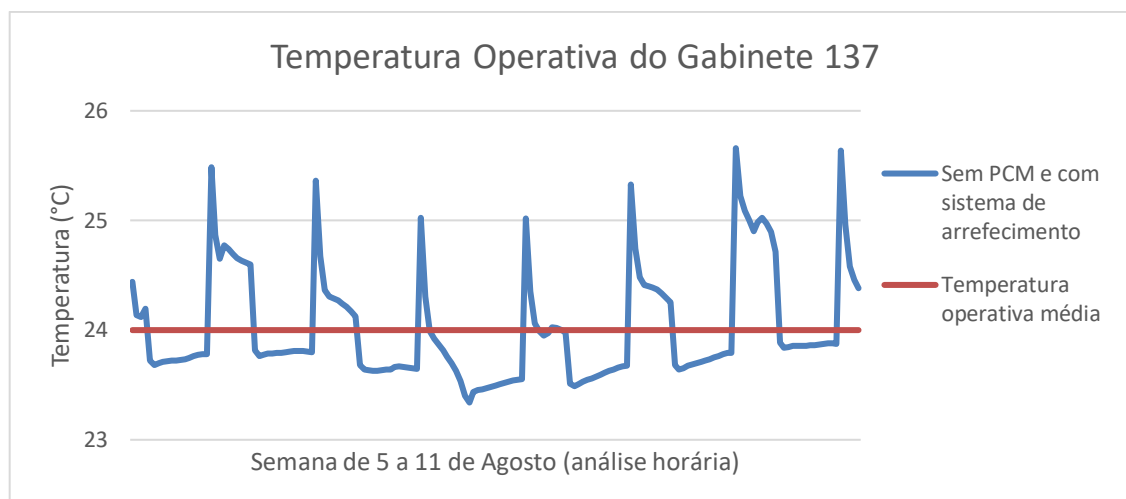


Figura 5.4 – Temperatura Operativa do Gabinete 137 com sistema de arrefecimento, com a temperatura operativa média assinalada a vermelho.

Após revisão da temperatura de todos os dias da semana crítica (Figura 5.4), passou-se à análise dos dois dias selecionados.

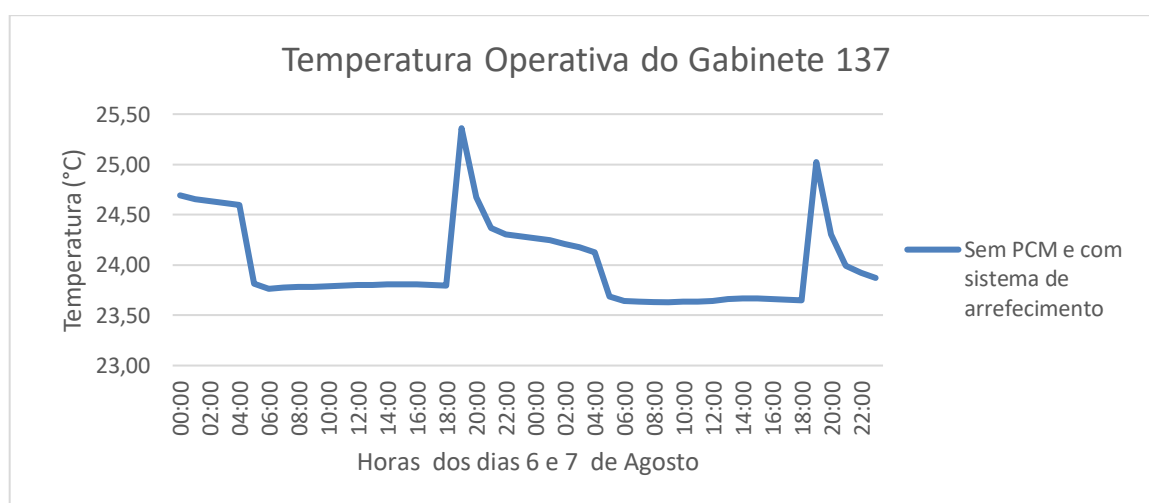


Figura 5.5 – Temperatura Operativa do Gabinete 137 sem PCM e com sistema de arrefecimento.

Observou-se que com a introdução do equipamento de arrefecimento a temperatura do gabinete desceu significativamente, atingindo a temperatura de conforto. No entanto, incorporou-se uma camada de PCM para verificar se com a introdução destes materiais seria possível obter a temperatura de conforto com menor consumo de energia.

O gráfico seguinte (Figura 5.6), retrata o efeito da incorporação de PCM na temperatura operativa do compartimento, quando o equipamento de arrefecimento está em funcionamento. Verificou-se uma maior discrepância entre as temperaturas no dia 6 de Agosto, de cerca de 0,25°C, isto porque a sua temperatura operativa sem PCM é maior neste dia. No entanto, também se verifica, uma diminuição de temperaturas no dia 7 de Agosto, ainda que menor.

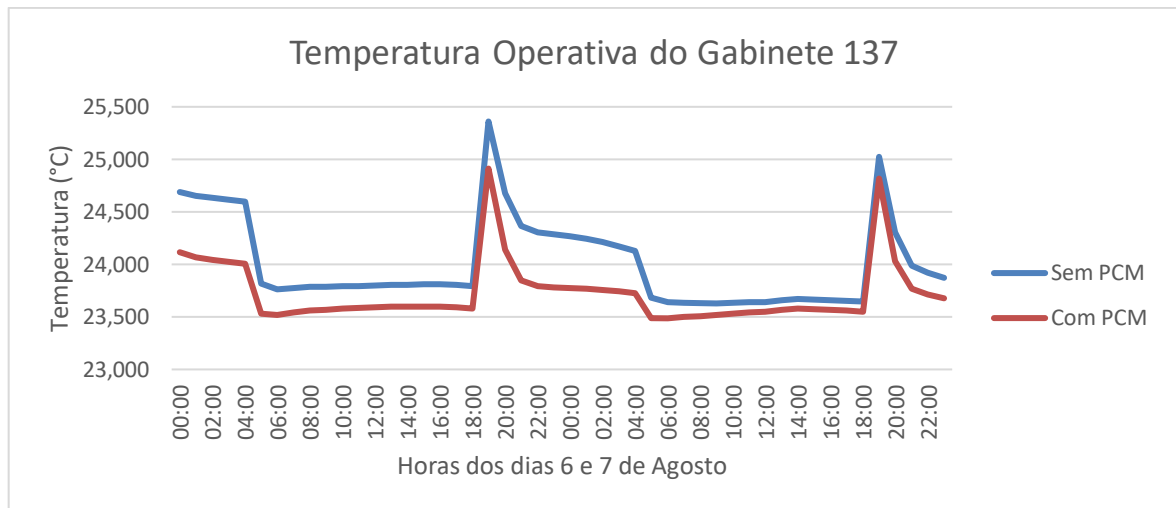


Figura 5.6 – Temperaturas Operativas do Gabinete 137 com PCM e sem PCM com sistema de arrefecimento nos dias 6 e 7 de Agosto.

Depois desta análise, decidiu-se alterar a entalpia do PCM para o dobro, mantendo a temperatura de fusão, para averiguar o efeito que esta modificação teria no gabinete. Esta alteração não provocou nenhuma alteração na temperatura operativa do espaço, como é possível observar no gráfico seguinte (Figura 5.7). Ora, isto indica que a entalpia de fusão anterior já seria suficiente e que o seu aumento não teria mais nenhum impacto na temperatura do compartimento.

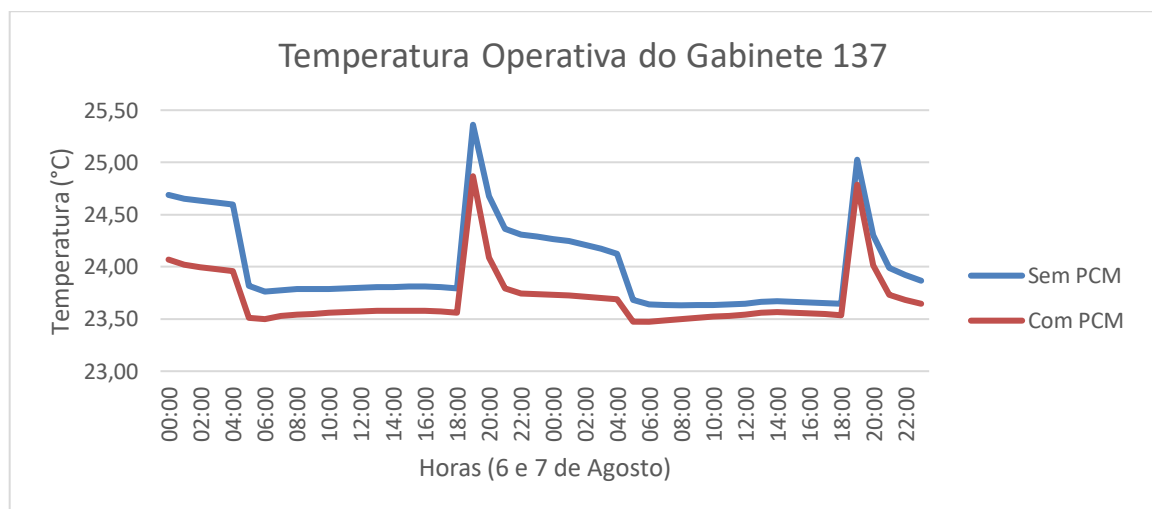


Figura 5.7 - Temperaturas Operativas do Gabinete 137 com PCM, mudando a entalpia, e sem PCM com sistema de arrefecimento nos dias 6 e 7 de Agosto.

5.2.3. CONSUMOS ENERGÉTICOS DO GABINETE 137

O programa *DesignBuilder* fornece os consumos energéticos de todas as simulações efetuadas nele.

O gráfico seguinte apresenta os consumos energéticos do gabinete 137 com e sem PCM com o equipamento de arrefecimento em funcionamento para a semana crítica da estação de arrefecimento.

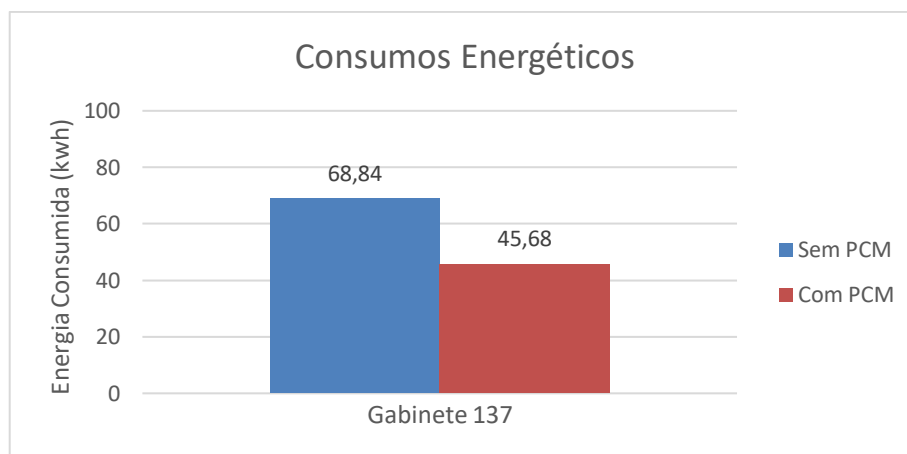


Figura 5.8 – Consumos energéticos do Gabinete 137, para a semana de 5 a 11 de Agosto.

Verifica-se, pela análise da Figura 5.8, que há um decréscimo de cerca de 34% no consumo de energia quando aplicado o PCM no compartimento. Em termos de custos energéticos, custando a energia 0,1595 €/kWh, obtém-se uma poupança na semana crítica de cerca de 3,70€.

5.2.4.SIMULAÇÃO Nº3: GABINETE 144 NAS SUAS CONDIÇÕES REAIS

A terceira simulação teve como alvo o gabinete 144, orientado a Sul.

À semelhança do gabinete 137, identificou-se a sua temperatura operativa média da semana mais crítica, para assim se seleccionar qual a temperatura de fusão indicada para o PCM, sem nenhum tipo de equipamento de arrefecimento ligado (Figura 5.9).

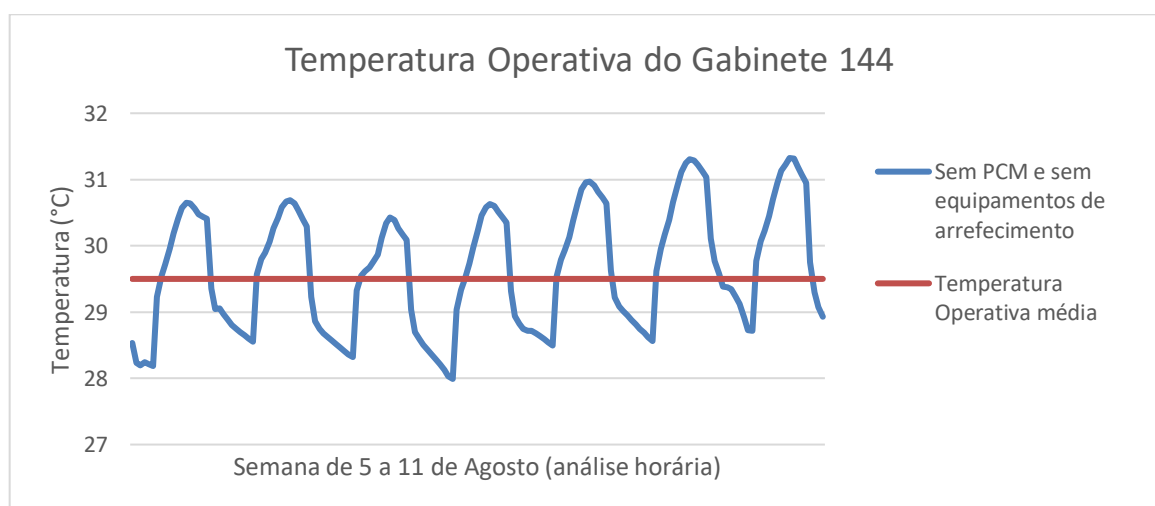


Figura 5.9 – Temperatura Operativa do Gabinete 144, com a temperatura operativa média assinalada a vermelho.

A temperatura operativa média deste compartimento é de 29,5°C, sem equipamento de arrefecimento ligado. No entanto foi necessário baixar o ponto de fusão para os 29°C para se verificar o efeito do PCM.

Apesar desta análise ser realizada só para o período temporal de uma semana, o PCM atua durante toda a estação de verão, podendo haver semanas em que as temperaturas sejam mais baixas.

O gráfico seguinte (Figura 5.10) mostra a temperatura operativa detalhada dos dois dias selecionados sem PCM e sem sistema de arrefecimento. Pode-se verificar que as temperaturas oscilam entre os 29°C e os 31,5°C.

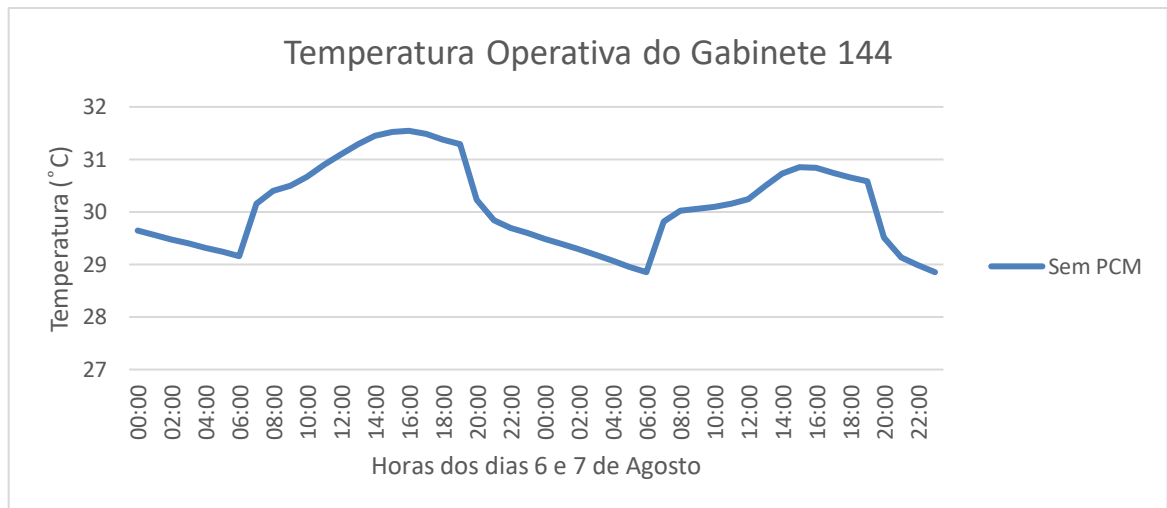


Figura 5.10 – Temperatura Operativa do Gabinete 144 para os dias 6 e 7 de Agosto.

De seguida, introduziu-se o PCM com uma temperatura de fusão de 29°C e observou-se qual seria o efeito provocado por este material. Foi possível constatar que houve uma diminuição da temperatura operativa do gabinete (ver Figura 5.11), contudo, esta não atinge a temperatura de conforto, sendo necessário introduzir um sistema de ar-condicionado.

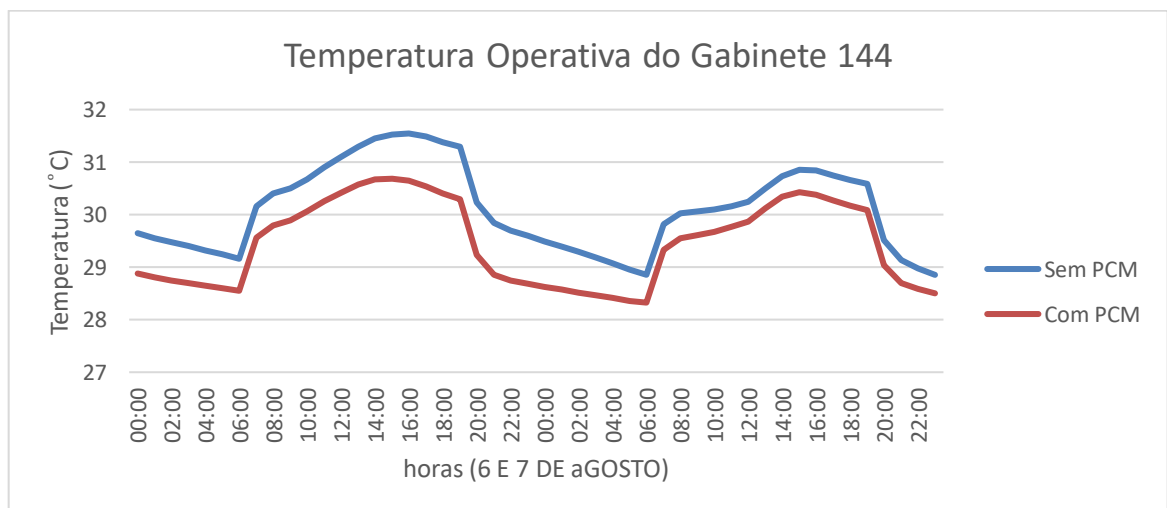


Figura 5.11 – Temperaturas Operativas do Gabinete 144 com PCM e sem PCM nos dias 6 e 7 de Agosto.

5.2.5.SIMULAÇÃO Nº4: GABINETE 144 COM EQUIPAMENTO DE ARREFECIMENTO

Como aconteceu na simulação nº2, realizou-se uma análise às temperaturas do compartimento apenas com o sistema de arrefecimento ligado.

Primeiramente, observou-se o comportamento da temperatura operativa para a semana completa para se descobrir qual a temperatura fusão ideal para o PCM, para assim, trabalhar em paralelo com o sistema de arrefecimento (Figura 5.12).

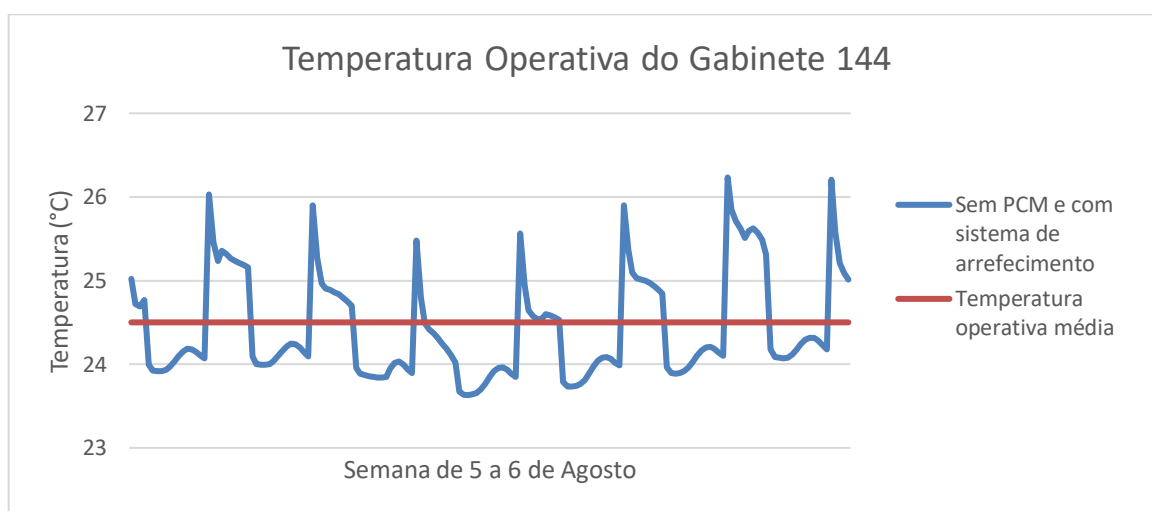


Figura 5.12 – Temperatura Operativa do Gabinete 144 com sistema de arrefecimento, com a temperatura operativa média assinalada a vermelho.

Chegou-se à conclusão, pela temperatura operativa média, que a temperatura de fusão ideal do PCM para esta simulação seria de 24,5°C.

Depois de uma análise global à semana crítica, passou-se à observação apenas dos dias seleccionados para este estudo.

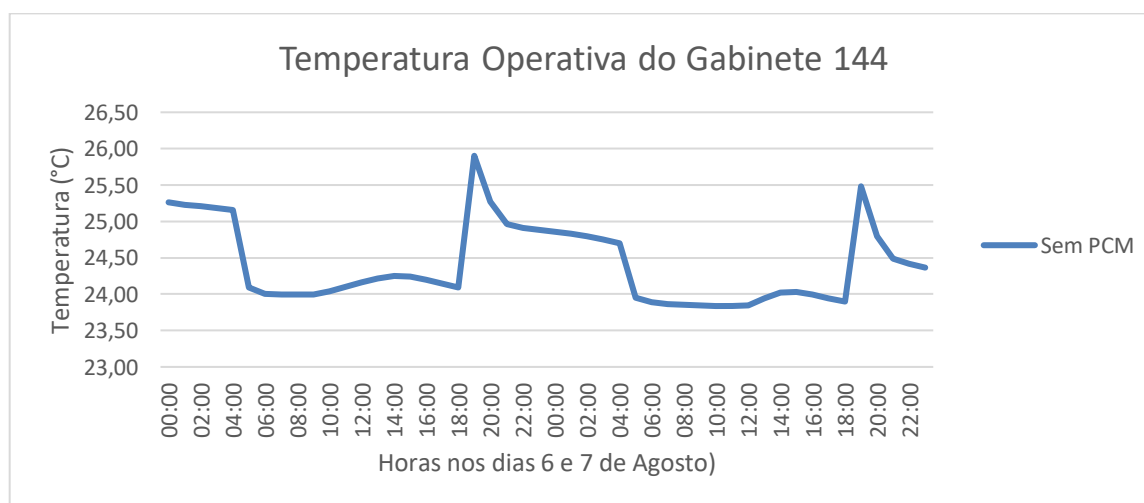


Figura 5.13 – Temperatura Operativa do Gabinete 144 sem PCM e com sistema de arrefecimento.

Após análise dos gráficos anteriores (Figura 5.12 e Figura 5.13), observou-se que há uma descida na temperatura operativa, nas horas de ocupação do edifício, passando para a temperatura de conforto. No entanto introduziu-se o PCM para verificar quais as melhorias de temperatura que este provoca no gabinete.

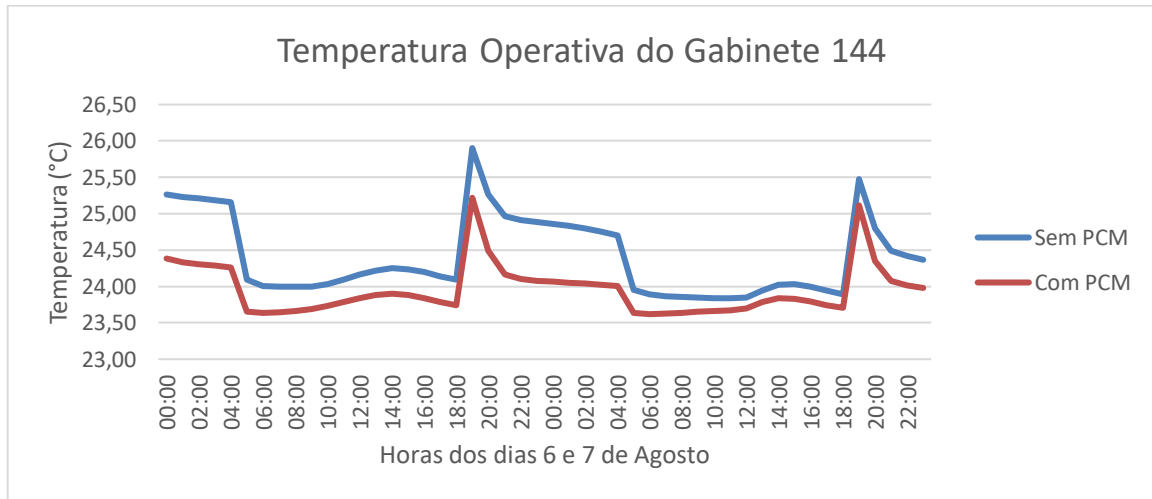


Figura 5.14 – Temperaturas Operativas do Gabinete 144 com PCM e sem PCM com sistema de arrefecimento nos dias 6 e 7 de Agosto.

O gráfico acima (Figura 5.14) ilustra o efeito do PCM na temperatura operativa do compartimento quando o equipamento de arrefecimento está ligado. Verifica-se que há uma maior diferença de temperaturas no dia 6 de Agosto, de cerca de 0,25°C, à semelhança do gabinete 137. Contudo, também se observa uma pequena diminuição de temperaturas no dia 7 de Agosto.

Em forma de experiência, à semelhança do gabinete 137, alterou-se a entalpia do pondo de fusão do PCM introduzido no compartimento para o dobro, mantendo a temperatura de fusão. A temperatura operativa baixou ligeiramente com esta mudança de entalpia (Figura 5.15), no entanto, sendo esta uma mudança residual, concluiu-se que mesmo que se aumentasse mais a entalpia, não existiriam efeitos significativos na temperatura.

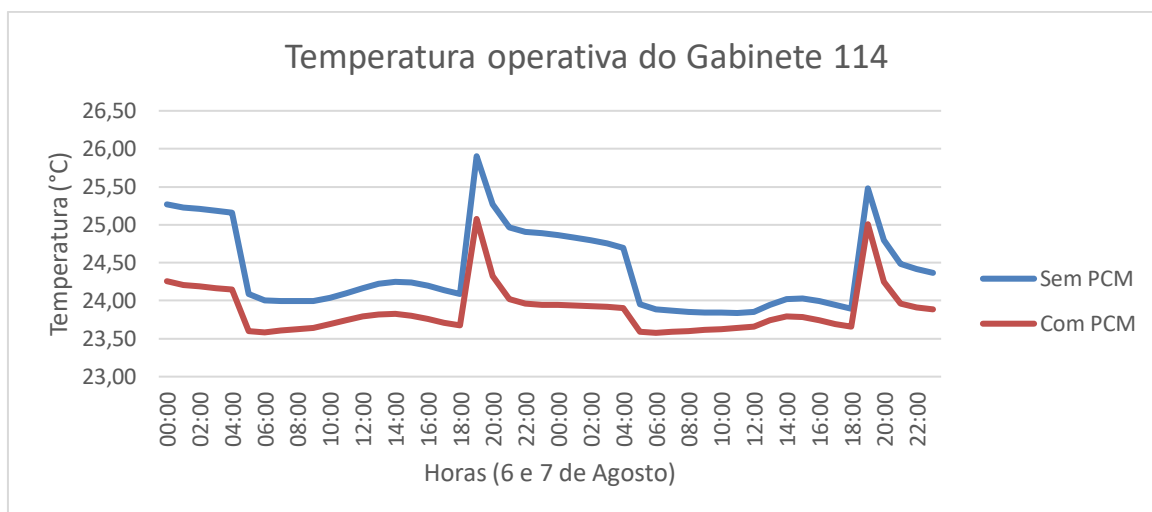


Figura 5.15 – Temperaturas Operativas do Gabinete 144 com PCM, mudando a entalpia, e sem PCM com sistema de arrefecimento nos dias 6 e 7 de Agosto.

5.2.6.CONSUMOS ENERGÉTICOS DO GABINETE 144

Após a análise das temperaturas observou-se o desempenho energético do gabinete com e sem PCM.

Constata-se que há uma diminuição significativa nos consumos de cerca de 32% com a introdução do PCM no compartimento (Figura 5.16), sendo o custo da eletricidade de 0,1595€/kWh, há uma poupança, na semana crítica, de 4,25€ com a introdução do PCM.

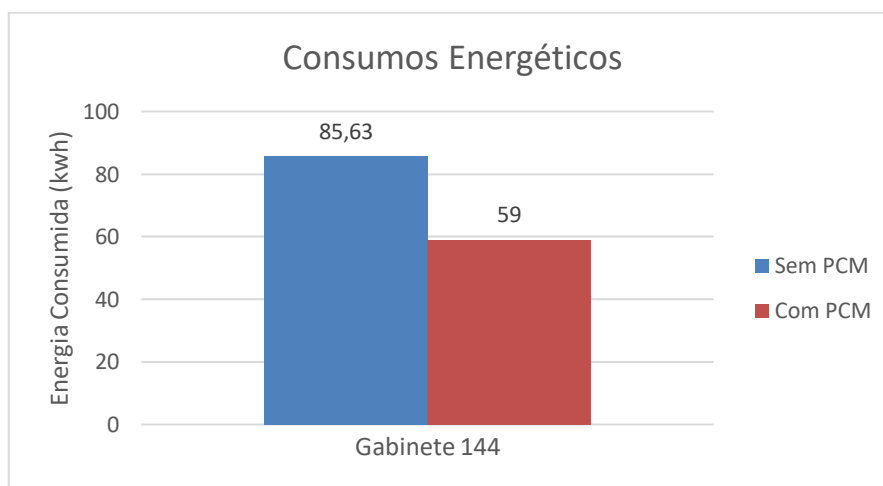


Figura 5.16 – Consumos energéticos do Gabinete 144, para a semana de 5 a 11 de Agosto.

5.2.7.CONSUMOS ENERGÉTICOS DA ALA ESTE

Após análise dos consumos de energia dos gabinetes 137 e 144, foi realizada a análise dos consumos para a ala Este (Figura 5.17). Com a incorporação do PCM, há um decréscimo significativo, de cerca de 24% dos consumos de energia. Quanto à poupança monetária, na semana em análise, é de 72€.

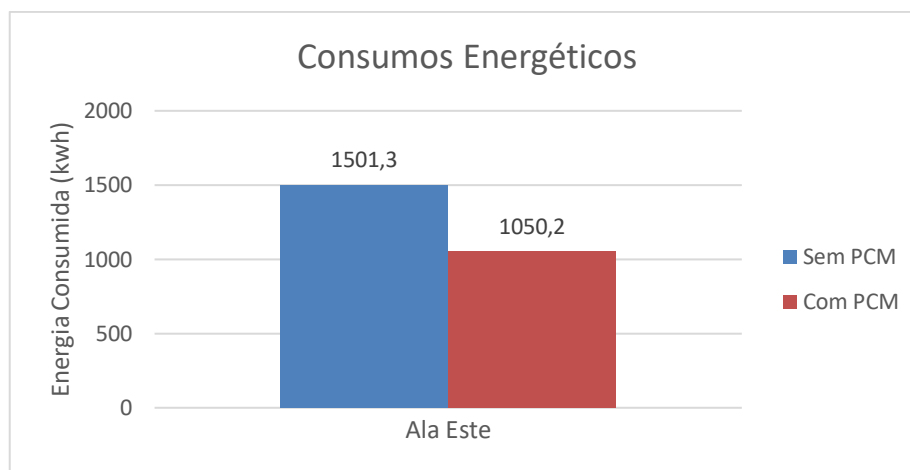


Figura 5.17 - Consumos energéticos da Ala Este, para a semana de 5 a 11 de Agosto.

5.2.8. ANÁLISE FINANCEIRA

Para se obter uma noção dos preços dos PCM, foi estudado um artigo publicado por Kosny, Shukla e Fallahi (2013). Estes autores realizaram um estudo do mercado para os materiais de mudança de fase.

O custo do material depende significativamente da classificação do PCM (orgânico, inorgânico ou biomaterial). Os PCM parafínicos comerciais são subprodutos das refinarias de petróleo, por isso, estão disponíveis em grande quantidade e um preço relativamente mais baixo como se pode verificar na Tabela 5.1. Também se pode observar, nesta mesma tabela (Tabela 5.1), que os ácidos gordos possuem um preço acessível.

Tabela 5.1 – Preço de PCM em €/Kg (Kosny, Shukla e Fallahi, 2013)

PCM		€/Kg
Cera de Parafinas		1,10–1,78
Ácidos Gordos	Ácido Esteriático	1,27–1,38
	Ácido Palmítico	1,43–1.53
	Ácido Oleico	1.48–1.56
Glicerina bruta de biodisel (biocrude)		0.19–0.25

Outros preços mencionados pelo autor são de materiais de mudança de fase com base biológica (ver Tabela 5.2). Para cada classe (M-27, M-51, M-91, M-182) estão disponíveis cinco valores de temperatura de fusão: 21 °C, 23 °C, 25 °C, 27 °C e 29 °C. As siglas das classes indicam a capacidade de armazenamento energético, ou seja, um PCM da classe M-27 consegue absorver uma energia igual a 27 Btu15 (63 kJ/kg) (Castilho, 2014).

Tabela 5.2 – Preço de PCM em €/m² (Kosny, Shukla e Fallahi, 2013)

Classe de PCM	€/m ²
M-27	18,58
M-51	27,10
M-91	44,0
M-182	84,2

O *DesignBuilder* possui estas classes de PCM com todas as temperaturas de fusão que lhe estão associadas, no entanto, já possuem uma espessura e propriedades fixas que não se adequavam ao presente estudo. Não obstante, neste estudo foi necessário aplicar uma espessura maior de PCM de maneira a se conseguir observar bem o seu efeito.

Como o PCM M27Q25 possui uma entalpia e uma temperatura de fusão próximas do PCM utilizado neste estudo, fez-se uma análise financeira sobre a aplicação deste num dos gabinetes estudados (gabinete 144 orientado a Sul).

Apesar de na simulação numérica se ter considerado PCM em todos os elementos construtivos, nesta análise de custos só se vai aplicar PCM no pavimento, na parede exterior e na cobertura, pois a maior eficácia dos PCM provém da introdução destes em superfícies em que incida a radiação solar.

O custo do PCM para o gabinete 144, sem custos de aplicação, será de 758€. Se o efeito do PCM se verificar em 30% dos dias da estação de arrefecimento, então a poupança anual em energia será equivalente a 34€, sendo que o período de retorno é de 23 anos.

5.2.9. IMPORTÂNCIA DA TEMPERATURA DE FUSÃO

A título de curiosidade, simulou-se o gabinete 144 com sistema de arrefecimento, escolhendo-se uma temperatura de fusão de 29°C. O comportamento térmico deste gabinete com e sem PCM é semelhante, pois as suas temperaturas operativas coincidem. Como a temperatura operativa do gabinete em estudo não atinge a temperatura de fusão, o PCM não está a funcionar, não estando a provocar efeito na temperatura operativa do compartimento. Estes resultados evidenciam a necessidade da correta definição da temperatura de fusão do PCM.

Para se tirar proveito da entalpia de fusão dos PCM é necessário ter um cuidado especial na definição da temperatura de fusão, que deverá estar próximo da temperatura média registada no interior do espaço em estudo. Como se pode observar na Figura 5.18, a temperatura operativa desta simulação mantém-se quase inalterada com a introdução do PCM.

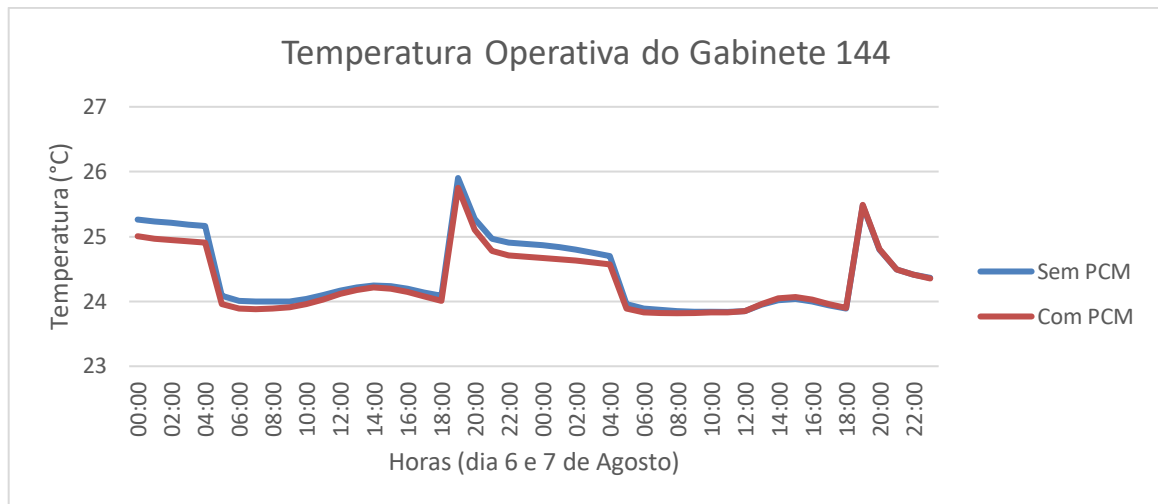


Figura 5.18 - Temperaturas Operativas do Gabinete 144 com e sem PCM com sistema de arrefecimento, com $T_{\text{fusão}}$ de 29°C, nos dias 6 e 7 de Agosto.

5.3.COMENTÁRIO SÍNTESE

Neste capítulo, foram efetuadas várias simulações com intuito de analisar o comportamento térmico dos gabinetes em estudo.

As simulações consistiram na análise das temperaturas operativas dos compartimentos e na subsequente escolha das temperaturas de fusão adequadas aos mesmos.

A primeira simulação de cada compartimento baseou-se na análise das temperaturas nas condições reais do edifício, ou seja, sem sistemas de climatização. De seguida, incorporou-se os PCM, verificando-se que as temperaturas alcançadas não atingiam as temperaturas de conforto. Deste modo, foi necessário adicionar sistemas de climatização aos espaços. Com esta adição foi possível verificar que as temperaturas diminuía para os valores pretendidos.

Após a análise de temperaturas, fez-se uma análise dos custos energéticos, observando-se uma descida significativa em ambos os compartimentos. Para além disto, fez-se uma estimativa do custo do PCM para aplicar no gabinete 144, tendo o período de retorno de 23 anos. De referir que este período só contabiliza monetariamente 30% dos dias da estação de arrefecimento.

Também foi visível, neste capítulo, a importância da escolha da temperatura de fusão nos PCM, analisando um caso onde se colocou uma temperatura de fusão de 29°C (temperatura bastante exagerada para o local em que existe sistema de climatização). Verificou-se que esta temperatura de fusão não provocou qualquer alteração na temperatura interior do espaço.

6

SÍNTESE, CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1.SÍNTESE E CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido ao longo deste projeto permitiu definir os PCM, abordando os seus conceitos chave, características e propriedades.

Verificou-se de que maneira é que estes se poderiam introduzir nos materiais correntes, nos seus componentes e nos elementos construtivos.

Este trabalho exigiu uma grande interação com o programa *DesignBuilder* e com os materiais de mudança de fase. Tendo como objetivo principal a verificação dos efeitos da aplicação de materiais de mudança de fase, tanto no conforto térmico como nos consumos de energia.

Foram efetuadas as seguintes simulações nos gabinetes 137 e 144:

- Nas suas condições reais (sem equipamentos de climatização);
- Com introdução de sistemas de climatização;
- Mudança da entalpia de fusão do PCM.

Foi necessário executar várias simulações para se conseguir chegar aos resultados pretendidos.

A análise de resultados revelou que a incorporação de materiais de mudança de fase nos gabinetes, sem nenhum sistema de arrefecimento, resulta na diminuição da temperatura operativa, contudo, nesta simulação não se conseguiu atingir a temperatura de conforto pretendida. Após esta análise, houve a necessidade de se introduzir um equipamento de arrefecimento, para que as temperaturas descessem até um ambiente confortável, ao nível dos 23°C/24°C. Depois de confirmada a sua eficácia, conclui-se que os PCM apenas servem para complemento ao equipamento de arrefecimento, pois por si só não conseguem garantir as temperaturas de conforto.

Foi também perceptível, com este estudo, a grande importância da escolha das características dos PCM, nomeadamente a temperatura de fusão e entalpia do material.

Em relação aos consumos de energia, é notória uma grande diminuição dos consumos, tanto nos dois gabinetes selecionados, como na ala Este inteira, cerca de 30% de redução. Ao efetuar um estudo económico do gabinete 144, observou-se que o período de retorno do investimento no PCM seria de cerca de 23 anos, considerando apenas que esta poupança ocorresse em 30% dos dias da estação de arrefecimento. Claro que, no inverno, também haveriam poupanças de energia, não calculadas neste estudo, diminuindo assim o período de retorno. Não obstante, os resultados deste estudo reforçam a utilização dos PCM como uma resposta mais sustentável. Quanto maior o consumo de energia, maior

necessidade de produção da mesma, o que, obrigatoriamente, implica maiores consumos de recursos fósseis. A utilização deste tipo de materiais permite atenuar este consumo exagerado de energia.

6.2.DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Após a realização deste estudo, apresentam-se algumas sugestões para desenvolvimentos futuros:

- Analisar de que forma se poderá introduzir os PCM nos diferentes elementos construtivos, como por exemplo, colocação de macrocápsulas com PCM num teto falso de uma cobertura.
- Comparar os resultados obtidos neste programa com outro software de simulação numérico para corroborar os mesmos.
- Validar experimentalmente o estudo efetuado, de maneira a verificar a semelhança entre os resultados numéricos e os resultados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABHAT, A (1983) - Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. Solar energy [Em linha]. 30:4. 313-332. ISSN 0038-092X.
- ALAWADHI, Esam M (2008) - Thermal analysis of a building brick containing phase change material. Energy and Buildings [Em linha]. 40:3. 351-357. ISSN 0378-7788.
- ALAWADHI, Esam M (2012) - Using phase change materials in window shutter to reduce the solar heat gain. Energy and Buildings [Em linha]. 47: 421-429. ISSN 0378-7788.
- ASCIONE, Fabrizio [et al.] (2014) - Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season. Applied Energy [Em linha]. 113: 990-1007. ISSN 0306-2619.
- ATHIENITIS, AK; CHEN, Y (2000) - The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems. Solar Energy [Em linha]. 69:3. 229-237. ISSN 0038-092X.
- AZENHA, Miguel Ângelo Dias (2004) - Comportamento do betão nas primeiras idades: fenomenologia e análise termo-mecânica. [Em linha].
- BAETENS, Ruben; JELLE, Bjørn Petter; GUSTAVSEN, Arild (2010) - Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. Energy and Buildings [Em linha]. 42:9. 1361-1368. ISSN 03787788.
- BENTZ, Dale P; TURPIN, Randy (2007) - Potential applications of phase change materials in concrete technology. Cement and Concrete Composites [Em linha]. 29:7. 527-532. ISSN 0958-9465.
- BORREGUERO, Ana M [et al.] (2011) - Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content. Applied Energy [Em linha]. 88:3. 930-937. ISSN 0306-2619.
- CABEZA, Luisa F [et al.] (2007) - Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings. Energy and Buildings [Em linha]. 39:2. 113-119. ISSN 0378-7788.
- CASTILHO, António José Soares (2014) - Simulação numérica do efeito de PCM no conforto térmico de edifícios: caso de estudo da FEUP. [Em linha].
- CERÓN, Isabel; NEILA, Javier; KHAYET, Mohamed (2011) - Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use. Energy and Buildings [Em linha]. 43:8. 1869-1874. ISSN 0378-7788.
- CLIMATOR (2019) - Climator [Em linha]. [Consult. 15/04/2019]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.climator.com/en/pcm-climself/product-data-sheets>>.
- CODYBA (2019) - [Em linha]. [Consult. 25/05/2019]. Disponível em WWW: <URL: http://www.jnlog.com/codyba1_en.htm>.
- COELHO, P. M. (2016) - Tabelas de termodinâmica. Porto: FEUP edições.
- COSTA, M; BUDDHI, D; OLIVA, A (1998) - Numerical simulation of a latent heat thermal energy storage system with enhanced heat conduction. Energy Conversion and Management [Em linha]. 39:3-4. 319-330. ISSN 0196-8904.
- CRAWLEY, Drury B [et al.] (2002) - EnergyPlus: New, capable, and linked. Journal of Architectural and Planning Research [Em linha]. 21:4. 292-302. ISSN 0738-0895.
- CUNHA, M (2005) - Geometria de Insolação-Optimização do Dimensionamento de Elementos de Protecção Solar. Tecnologia de Fachadas, Mestrado em Construção de Edifícios.
- DESIGNBUILDER (2019) - [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <https://designbuilder.co.uk/>>.
- DIECKMANN, J (2008) - Latent heat storage in concrete. Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany, www.eurosolar.org, retrieved December [Em linha]. 9:
- EDUCABRAS (2018) - Convecção [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: https://www.educabras.com/enem/materia/fisica/terminologia/aulas/conveccao_de_calor_irradiacao_termica>.
- ENERGIA HELIOTÉRMICA (2019) - O sol: fonte de energia [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/o-sol-fonte-de-energia>>.
- ENERGYPLUS (2019) - [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <https://energyplus.net/>>.
- ENTROP, Alexis Gerardus; BROUWERS, HJH; REINDERS, Angelina HME (2011) - Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses. Solar energy [Em linha]. 85:5. 1007-1020. ISSN 0038-092X.

- ESP-R (2019) - [Em linha]. [Consult. 25/05/2019]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>>.
- FEUP (2019) - [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: https://sigarra.up.pt/feup/pt/instal_geral.edificio_view?pv_id=1412>.
- HAWES, DW; FELDMAN, D; BANU, D (1993) - Latent heat storage in building materials. Energy and buildings [Em linha]. 20:1. 77-86. ISSN 0378-7788.
- HITTLE, Douglas C (2002) - Phase change materials in floor tiles for thermal energy storage
- HO, Ching-Jenq; CHU, CH (1996) - Numerical simulation of heat penetration through a vertical rectangular phase change material/air composite cell. International journal of heat and mass transfer [Em linha]. 39:9. 1785-1795. ISSN 0017-9310.
- HUNGER, M [et al.] (2009) - The direct incorporation of micro-encapsulated Phase Change Materials in the concrete mixing process—A feasibility study. Lifecycle Design of Buildings, Systems and Materials [Em linha]. 141.
- ISMAIL, KAR; HENRIQUEZ, JR (2002) - Parametric study on composite and PCM glass systems. Energy conversion and management [Em linha]. 43:7. 973-993. ISSN 0196-8904.
- KAASINEN, Harri (1992) - The absorption of phase change substances into commonly used building materials. Solar Energy Materials and Solar Cells [Em linha]. 27:2. 173-179. ISSN 0927-0248.
- KHERADMAND, Mohammad [et al.] (2016) - Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings. Energy [Em linha]. 94: 250-261. ISSN 0360-5442.
- KHODADADI, JM; ZHANG, Y (2001) - Effects of buoyancy-driven convection on melting within spherical containers. International journal of heat and mass transfer [Em linha]. 44:8. 1605-1618. ISSN 0017-9310.
- KHUDHAIR, Amar M (2004) - A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials. Energy conversion and management [Em linha]. 45:2. 263-275. ISSN 0196-8904.
- KOSNY, J; MILLER, W; SYED, AM (2007) - Field testing of second-generation residential attic using inorganic PCM thermal storage. Oak ridge national laboratory (ORNL) [Em linha].
- KOSNY, Jan; SHUKLA, Nitin; FALLAHI, Ali (2013) - Cost analysis of simple phase change material-enhanced building envelopes in southern US climates
- KOŚNY, Jan [et al.] (2003) - PCM-enhanced building envelopes in current ORNL research projects. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN [Em linha].
- KOSNY, Jan [et al.] (2008) - 2006/07 Field Testing of Cellulose Fiber Insulation Enhanced with Phase Change Material
- KOSNY, Jan [et al.] (2006) - PCM-Enhanced Cellulose Insulation Thermal Mass in Lightweight Natural Fibers. [Em linha].
- KUZNIK, Frederic; VIRGONE, Joseph; ROUX, Jean-Jacques (2008) - Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation. Energy and buildings [Em linha]. 40:2. 148-156. ISSN 0378-7788.
- LANE, George Ashel (1983) - Solar heat storage: latent heat materials. Universidade de Michigan: CRC Press.
- LIMA, Thais Borges Sanches (2010) - Qualidade ambiental e arquitetônica em edifícios de escritórios: diretrizes para projetos em Brasília. [Em linha].
- LIN, Kunping [et al.] (2007) - Study of an electrical heating system with ductless air supply and shape-stabilized PCM for thermal storage. Energy Conversion and Management [Em linha]. 48:7. 2016-2024. ISSN 0196-8904.
- LISBOA TÉCNICO - Transferência de calor: Origens físicas e equações de taxas de transferência.
- MARTINS, Bruno Filipe Moura (2017) - Materiais de Mudança de Fase (PCM) para Melhoria do Desempenho Térmico de Edifícios. PCM-Produtos e Aplicações em Construção. [Em linha].
- MENDONÇA, Paulo (2005) - Habitar sob uma segunda pele. TD, Universidade do Minho [Em linha].
- NEEPER, DA (2000) - Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage. Solar energy [Em linha]. 68:5. 393-403. ISSN 0038-092X.
- RAMOS, Nuno Manuel Monteiro (2007) - A importância da inércia higroscópica no comportamento higratérmico dos edifícios. [Em linha].
- RUBITHERM (2019) - [Em linha]. [Consult. Disponível em WWW: <URL: <https://www.rubitherm.eu/>>.
- SÁ, Ana Margarida Vaz Duarte Oliveira (2012) - Sustentabilidade na construção: comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase. [Em linha]. 23.

- SANTOS, C. A. P. dos; MATIAS, Luís (2006) - Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. ICT Informações Científicas e Técnicas, Edifícios - ITE 50. Lisboa: LNEC.
- SCALAT, S [et al.] (1996) - Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard. Solar Energy Materials and Solar Cells [Em linha]. 44:1. 49-61. ISSN 0927-0248.
- SHARMA, Atul [et al.] (2009) - Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable energy reviews [Em linha]. 13:2. 318-345. ISSN 1364-0321.
- SHUKLA, Anant; BUDDHI, D; SAWHNEY, RL (2008) - Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials. Renewable Energy [Em linha]. 33:12. 2606-2614. ISSN 0960-1481.
- STANDARDIZATION, International Organization for (1993) - ISO 7730. Disponível em WWW: <URL: <https://www.iso.org/standard/14567.html>>.
- STRAND, Richard K [et al.] (2000) - EnergyPlus: A new-generation energy analysis and load calculation engine for building design. 2000.
- TEAPPCM (2019) - [Em linha]. [Consult. 20/04/2019]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.teappcm.com/products/telecomshelters.htm#LiveSiteTrial>>.
- TRNSYS (2019) - [Em linha]. [Consult. 25/05/2019]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.trnsys.com/>>.
- TYAGI, Vineet Veer; BUDDHI, D (2007) - PCM thermal storage in buildings: a state of art. Renewable and Sustainable Energy Reviews [Em linha]. 11:6. 1146-1166. ISSN 1364-0321.
- VELRAJ, RVSR [et al.] (1999) - Heat transfer enhancement in a latent heat storage system. Solar energy [Em linha]. 65:3. 171-180. ISSN 0038-092X.
- WEINLÄDER, Helmut; BECK, Andreas; FRICKE, Jochen (2005) - PCM-facade-panel for daylighting and room heating. Solar Energy [Em linha]. 78:2. 177-186. ISSN 0038-092X.
- WOLOSZYN, Monika (1999) - Modélisation hygro-thermo-aéraulique des bâtiments multizones: proposition d'une stratégie de résolution du système couple. Lyon, INSA.
- YINPING, Zhang; YI, Jiang (1999) - A simple method, the-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. Measurement Science and Technology [Em linha]. 10:3. 201. ISSN 0957-0233.
- ZALBA, Belen [et al.] (2003) - Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied thermal engineering [Em linha]. 23:3. 251-283. ISSN 1359-4311.
- ZHOU, Dan; ZHAO, Chang-Ying; TIAN, Yuan (2012) - Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. Applied energy [Em linha]. 92: 593-605. ISSN 0306-2619.

ANEXO A: FOLHAS DE ESPECIFICAÇÕES DE ALGUNS PCM

**ANEXO B: INFORMAÇÕES DOS CONSUMOS ENERGÉTICOS DOS GABINETES, RETIRADAS DO
DESIGNBUILDER**