

**Comportamento Térmico e Energético de Unidades
CANIFA e Propostas de Melhoria. Caso de estudo: Edifício
de Comando.**

João Romãozinho Cabrito

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Militar

Orientadores:

Professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues

Professor Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa

Júri

Presidente: Professora Doutora Ana Paula Patrício Teixeira Ferreira Pinto França de
Santana

Orientador: Professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues

Vogal: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Outubro de 2014

Agradecimentos

Esta dissertação é o culminar de seis anos de ensino superior. Um trabalho desta natureza não depende apenas do autor mas de outras pessoas também. Por essa mesma razão gostaria de agradecer aos meus pais, à minha irmã e a todos os meus amigos e camaradas, que me acompanharam ao longo do trabalho aqui realizado.

Ao meu orientador Professor Doutor António Heleno Domingues Moret Rodrigues e ao meu coorientador Professor Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa, gostaria de agradecer todo o empenho e dedicação, uma vez que a sua ajuda foi essencial para a realização deste trabalho.

Gostaria também de agradecer à Academia Militar pela formação que me concedeu, à Direção de Infraestruturas do Exército por ter disponibilizado as plantas necessárias para este trabalho, e por fim ao Regimento de Artilharia nº4 por toda colaboração que me prestou.

Resumo

Atualmente, a necessidade de reduzir o consumo energético a nível global é uma prioridade, devido ao facto da produção de energia convencional envolver a emissão de poluentes e a exploração de recursos não renováveis. Nas sociedades modernas os edifícios residenciais e de comércio e serviços, são os principais consumidores de energia. Deste conjunto fazem também parte os edifícios militares. Neste trabalho serão abordados os edifícios militares tipo CANIFA. Estes edifícios datam da década de 50 e, como tal, encontram-se bastante desatualizados face às preocupações atuais de poupança energética e melhoria das condições de conforto.

O presente trabalho pretende realçar a necessidade da reabilitação energética dos edifícios militares, centrando-se no edifício de comando do Regimento de Artilharia nº4 (RA4). Neste estudo será efetuada uma proposta de reabilitação deste edifício, com o objetivo de melhorar o seu desempenho energético e sustentabilidade da construção. Para tal, o edifício foi primeiro estudado nas condições de origem, sem qualquer intervenção. Seguidamente, utilizando uma metodologia baseada na minimização do custo global, determinou-se a espessura ótima de isolamento térmico a aplicar nos diferentes elementos construtivos. Esta metodologia inclui o custo do material de isolamento térmico e respetiva aplicação e o custo energético associado à manutenção das condições de conforto para um dado horizonte de projeto. Uma vez determinada a solução de reabilitação, com o tipo e espessura de isolamento para cada elemento construtivo, o edifício foi estudado novamente com o objetivo de averiguar se as alterações enquadraram o edifício com o paradigma atual relativo ao desempenho energético.

Palavras-chave: CANIFA, Reabilitação energética, RA4, metodologia do custo mínimo

Abstract

Nowadays the need to reduce energy consumption worldwide is pressing, due to the fact that its production involves the emission of pollutants and due to the fact that energy is a scarce resource. One of the main energy consumer in modern society are the buildings, namely the common residential and services buildings. Amongst these buildings there are also the military buildings scattered throughout Portugal. In this work the CANIFA military buildings will be focused, on. These military buildings from the 1950's are outdated from the nowadays concerns regarding energy consumption and environment comfort conditions.

The present work intends to stress the need for energy rehabilitation for buildings, and intends to study a particular CANIFA military building, the Artillery Regiment nr 4 (RA4). In this study a proposal for rehabilitating this building will be made in order to enhance its energy performance and to make it more sustainable. In order to do this, first the building will be studied in its current conditions without any intervention whatsoever, then, using a minimal cost methodology, an optimal insulation thickness will be determined. This minimal cost methodology will be based on the application cost of the insulation and on the energy spent by the building throughout a given period. Once the rehabilitation proposal is fully defined with the several insulation materials and thicknesses, the building will undergo a new analysis with the goal of determining if the changes made update the building to the nowadays thermal and energy behaviour standards.

Keywords: CANIFA, Energy Rehabilitation, RA4, Minimal Cost Methodology

Índice Geral

1.	Introdução.....	1
1.1.	Enquadramento	1
1.2.	Objetivos e Metodologia	2
1.3.	Plano de Trabalhos	3
2.	Reabilitação energética de edifícios.....	5
2.1.	Dependência energética.....	5
2.2.	Necessidade de reabilitação energética de edifícios em Portugal.....	6
2.3.	Principal legislação.....	8
3.	Caracterização dos edifícios CANIFA	9
3.1.	Resenha Histórica	9
3.2.	Organização dos Quartéis CANIFA	12
3.3.	Caracterização do Edifício de Comando de Leiria	13
3.3.1.	Localização.....	14
3.3.2.	Plantas.....	16
3.4.3.	Aspetos construtivos	19
4.	Caso de estudo	23
4.1.	Metodologia de Análise	23
4.2.	Modelação	24
4.2.1.	Geometria do Edifício	24
4.2.2.	Parâmetros de Simulação	25
4.2.3.	Localização.....	25
4.2.4.	Período de simulação.....	26
4.2.5.	Horários	26
4.2.6.	Zonas Térmicas	27
4.2.7.	Elementos Construtivos.....	28
4.2.8.	Dispositivos de Sombreamento.....	30
4.2.9.	Temperatura do Solo.....	32
4.2.10.	Ganhos internos	33
4.2.11.	Controlo de luminosidade.....	35
4.2.12.	Infiltrações de ar	37
4.2.13.	Termostato.....	39
5.	Análise dos resultados para o Edifício original.....	41
5.1.	Coeficientes de transmissão térmica	41

5.2.	Perdas de calor	42
5.2.1.	Rés-do-chão	43
5.2.2.	1ºAndar	44
6.	Soluções de Reabilitação Térmica.....	47
6.1.	Isolamento térmico de paredes	47
6.2.	Isolamento térmico da cobertura	48
6.3.	Isolamento térmico do pavimento do piso térreo	49
6.4.	Isolamento do pavimento em contacto com o exterior.....	50
7.	Determinação da espessura ótima.....	51
7.1.	Metodologia adotada para a determinação da espessura ótima	51
7.2.	Espessuras adotadas	56
7.2.1.	Espessura de isolamento das paredes exteriores	56
7.2.2.	Espessura de isolamento do teto em contacto com a cobertura	59
7.2.3.	Espessura de isolamento do pavimento em contacto com o exterior	62
7.2.4.	Espessura de isolamento do pavimento em contacto com o solo	64
8.	Análise dos resultados após reabilitação	67
8.1.	Coeficientes de Transmissão térmica	67
8.2.	Necessidades energéticas	70
9.	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	75
	Referências Bibliográficas	79

Índice de Figuras

Figura 1 - Percentagem de consumo total de energia proveniente de fontes renováveis em 2012 [2]..	5
Figura 2 - Percentagem de consumo energético, com os diferentes sectores, nos E.U.A [3]	6
Figura 3 - RI 15 Tomar, exemplo de Quartel CANIFA [9]	11
Figura 4 - Núcleos funcionais de uma unidade militar [10]	12
Figura 5 - Posicionamento relativo dos núcleos funcionais [10]	13
Figura 6- Regimento de Artilharia nº 4 [11]	14
Figura 7 - Localização do edifício [12].....	14
Figura 8 - Localização do edifício de comando dentro do RA4	15
Figura 9 - Orientação do edifício de comando do RA4	15
Figura 10 - Planta do 1º piso	16
Figura 11 - Planta do 2º piso	16
Figura 12 - Alçado frontal do edifício.....	16
Figura 13 - Alçado traseiro do edifício.....	17
Figura 14 - Alçado lateral do edifício.....	17
Figura 15 - Piso térreo da área modelada com as respetivas utilizações	18
Figura 16 - Piso 1 da área modelada com as respetivas utilizações	18
Figura 17 - Pormenor da abertura de ventilação onde se pode verificar que as paredes são de Basalto	19
Figura 18 - Vidros duplos que se encontram atualmente no edifício.....	21
Figura 19 - Porta exterior do edifício	22
Figura 20 - Geometria modelada com recurso ao <i>Google Sketchup</i>	24
Figura 21 - Zonas térmicas do 1º piso	27
Figura 22 – Zonas térmicas do 2º piso.....	27
Figura 23 - Zonas térmicas modeladas com recurso ao <i>Google Sketchup</i>	28
Figura 24 - Internal mass das zonas 12, 13 e 14	28
Figura 25- Estores presentes no edifício.....	30
Figura 26 - Períodos de tempo em que os dispositivos de sombreamento estão ativados (durante 2 dias), exemplo para os vãos envidraçados da zona 11	31
Figura 27 - Radiação solar incidente e radiação solar limite para a ativação dos estores para 2 dias, exemplo para os vãos envidraçados da zona 11	31
Figura 28 - Modelo no Slab	32
Figura 29- Iluminação presente no edifício de comando	33
Figura 30 - Equipamento tipo nos gabinetes.....	34
Figura 31 - Exemplo de sensor <i>Daylight Control</i> , na zona térmica 4.....	36
Figura 32 - Nível de luminosidade captado pelos sensores ao longo de dois dias	36
Figura 33 - Períodos em que as luzes estão ligadas ao longo de dois dias	37
Figura 34 - Temperaturas para a estação de aquecimento	38
Figura 35 - Temperaturas para a estação de arrefecimento.....	38
Figura 36 - Percentagem de perdas, da zona 1, que ocorrem por diferentes elementos	43

Figura 37 - Percentagem de perdas, da zona 12, que ocorrem por diferentes elementos	44
Figura 38 - Percentagem de perdas, da zona 4, que ocorrem por diferentes elementos	44
Figura 39 - Percentagem de perdas, da zona 14, que ocorrem por diferentes elementos	45
Figura 40 - Percentagem de perdas, da zona 11, que ocorrem por diferentes elementos	46
Figura 41 - Exemplo de sistema ETICS à base de lâ-de-rocha [16].....	48
Figura 42 – Exemplo de isolamento adotado para a cobertura [16]	48
Figura 43 - Exemplo de isolamento interior do piso [18]	49
Figura 44 - Exemplo de isolamento sob a laje [16]	50
Figura 45 - Definição da função custo de isolamento ($C_{iso}(X)$)	52
Figura 46 - Exemplo de aparelho de aquecimento elétrico [20].....	53
Figura 47 - Função $N(x)$, que descreve as necessidades energéticas em função da espessura de isolamento x	54
Figura 48 – Exemplo de traçado de uma função $C(x)$	56
Figura 49 - Determinação da função custo do isolamento em função da espessura x (cm)	57
Figura 50 - Necessidades energéticas de aquecimento associada às paredes exteriores da zona 1 em função da espessura de isolamento x (cm).....	58
Figura 51 - Determinação da função custo do isolamento em função da espessura X (cm)	60
Figura 52 – Necessidades energéticas de aquecimento associadas ao teto da zona 9 em função da espessura de isolamento x (cm)	61
Figura 53 - Determinação da função custo do isolamento em função da espessura x (cm)	63
Figura 54 - Necessidades energéticas de aquecimento associadas ao pavimento da zona 11 em função da espessura de isolamento x (cm)	64
Figura 55 - Necessidades de aquecimento das zonas 12 e 13, para diferentes espessuras de isolamento no piso térreo.....	66

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Edifícios e alojamentos em 1991, 2001 e 2011 [4].....	7
Tabela 2 - Percentagem de edifícios construídos em diferentes datas com necessidade de renovação [4].....	7
Tabela 3 - Características climáticas de Leiria.....	15
Tabela 4 - Constituição dos elementos construtivos.....	20
Tabela 5 - Vidros originais do edifício	21
Tabela 6 - Vidros duplos após a intervenção.....	21
Tabela 7 - Dados de localização do edifício.....	25
Tabela 8 - Materiais e características dos mesmos.....	29
Tabela 9 - Temperaturas médias do solo para os diferentes meses do ano.....	33
Tabela 10 - Quantidade de equipamentos em cada zona térmica	34
Tabela 11 - Número de pessoas em cada zona térmica	35
Tabela 12 - Condutâncias térmicas e coeficientes de transmissão térmica dos diferentes elementos construtivos do edifício de comando do Regimento de Artilharia nº4.....	41
Tabela 13 - Resistências térmicas superficiais	42
Tabela 14 - Coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis para a envolvente opaca exterior de edifícios de comércio e serviços [W/m ² .°C] [7].....	42
Tabela 15 - Características térmicas associadas à lâ-de-rocha	48
Tabela 16 - Características térmicas associadas ao EPS	49
Tabela 17 - Características térmicas associadas ao XPS	50
Tabela 18 - Custos de isolamento das paredes exteriores da Zona 1 para diferentes espessuras.....	57
Tabela 19 - Necessidades energéticas associadas às paredes exteriores da zona 1 para diferentes valores de espessura de isolamento.....	58
Tabela 20 - Espessura ótima de isolamento das paredes exteriores para diferentes números de anos do horizonte de projeto.....	59
Tabela 21 - Custos de isolamento do teto em contacto com a cobertura da Zona 9 para diferentes espessuras	60
Tabela 22 - Necessidades energéticas associadas à cobertura da zona 9 para diferentes valores de espessura de isolamento.....	61
Tabela 23 - Espessura ótima de isolamento do teto para diferentes números de anos do horizonte de projeto.....	62
Tabela 24 - Custos de isolamento do pavimento em contacto com o exterior da Zona 11 para diferentes espessuras	62
Tabela 25 - Necessidades energéticas associadas ao pavimento exterior da zona 11 para diferentes valores de espessura de isolamento.....	63
Tabela 26 - Espessura ótima de isolamento do pavimento em contacto com o exterior para diferentes números de anos do horizonte de projeto.....	64
Tabela 27 - Valores das necessidades energéticas de aquecimento das zonas 12 e 13 para diferentes espessuras de isolamento no pavimento.....	65

Tabela 28 - Coeficientes térmicos dos elementos construtivos reabilitados	68
Tabela 29 - Coeficientes de transmissão térmica de referência para superfícies opacas e para vãos envidraçados (REH) [3]	69
Tabela 30 - Coeficientes de transmissão térmica de referência para superfícies opacas e para vãos envidraçados (RECS) [7].....	69
Tabela 31 - Necessidades energéticas de aquecimento, arrefecimento e totais associadas à situação de origem.....	71
Tabela 32 - Necessidades de aquecimento, arrefecimento e totais associadas à situação reabilitada	71
Tabela 33 - Necessidades de energéticas de aquecimento, arrefecimento e totais associadas à situação de referência.....	72
Tabela 34 - Necessidades energéticas de todo o modelo do <i>EnergPlus</i> para a situação de origem, reabilitada e de referência	77

Abreviaturas

RSECE – Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios

RCCTE – Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios

SCE – Sistema de Certificação Energética

REH – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação

RECS – Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços

CANIFA – Comissão Administrativa para as Novas Infraestruturas das Forças Armadas

CANIE – Comissão Administrativa para as Novas Infraestruturas do Exército

RA4 – Regimento de Artilharia nº4

ETICS – *External Thermal Insulation Composite Systems*

EPS – Poliestireno Expandido

XPS – Poliestireno Extrudido

Simbologia

ρ – Densidade (kg/m^3)

C – Calor específico (J/kg.K)

U – Coeficiente de transmissão térmica ($\text{W/m}^2.\text{K}$)

K_p – Condutância Térmica ($\text{W/m}^2.\text{K}$)

x – Espessura (cm)

C_{iso} – Custo do Isolamento (€)

C_{ene} – Custo da Energia (€/kWh)

F – Fator de atualização de custos (ano)

n – número de anos do horizonte de projeto

N – Necessidades energéticas (kWh)

N_{aquec} – Necessidades energéticas de aquecimento (kWh)

N_{arref} – Necessidades energéticas de arrefecimento (kWh)

η – Rendimento

$N(x)$ – Necessidades energéticas associadas a um elemento

$N_{\text{total},x}$ – Necessidades energéticas de uma zona térmica associadas a uma espessura de isolamento x do elemento em estudo

N_{adiab} – Necessidades energéticas de uma zona térmica com o elemento em estudo adiabático

a – Taxa de Atualização

i – Taxa de Inflação

CAPÍTULO I

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Atualmente, a necessidade de racionalização e otimização de recursos é uma preocupação cada vez mais presente nas sociedades modernas, nomeadamente no que concerne aos recursos energéticos. A produção energética mundial assenta maioritariamente em recursos fósseis não renováveis, o que implica que os recursos energéticos sejam em grande parte limitados, e portanto a sua gestão e utilização devem ser muito criteriosas. No âmbito do problema dos recursos energéticos, uma das abordagens consiste em limitar ao máximo a necessidade de utilização destes recursos, tornando assim a ocupação humana mais sustentável, em particular a vida nas cidades. Para a existência do Homem se poder perpetuar em equilíbrio com os recursos do planeta, tem que ser feita uma caminhada no sentido da auto-suficiência energética da atividade humana.

Uma das principais fontes de consumo de recursos energéticos é a indústria. Como tal deve ser efetuado um esforço no sentido de reduzir o consumo de recursos energéticos nesta área. Além das atividades relacionadas com a indústria existem também inúmeras atividades humanas dependentes dos recursos energéticos, que se desenvolvem nos edifícios. Os edifícios, independentemente da sua função, seja edifícios relacionados com a indústria, habitacionais ou de outro tipo, são das estruturas criadas pelo homem que mais recursos consomem. Sendo os edifícios uma componente tão importante da atividade humana, e tendo estes uma incidência tão preponderante no consumo de recursos energéticos, é natural que seja sobre eles que deva surgir uma intervenção no sentido de minimizar o consumo de recursos, ou mesmo no sentido de os tornar auto-sustentáveis (edifícios de energia quase nula). Ao conceberem-se edifícios com consumos de energia menores ou nulos, obtêm-se ganhos em dois sentidos: por um lado diminui-se a dependência de recursos esgotáveis, por outro, reduz-se o consumo de recursos cuja produção assenta em grande parte na emissão de CO₂ e outros produtos poluentes, que são causa de deterioração do ambiente e qualidade da vida.

Em Portugal, segundo a Base de Dados de Portugal Contemporâneo (PORDATA), o consumo de energia elétrica por parte dos edifícios em 2011 foi 33.5% [1] do consumo total, diminuindo ligeiramente relativamente a anos anteriores, mas encontrando-se ainda num patamar bastante elevado.

No âmbito da legislação tem-se verificado preocupação com a melhoria do desempenho energético dos edifícios, tanto a nível da adaptação dos edifícios às condições climáticas do local onde são implantados, como em relação à diminuição dos consumos energéticos para realizar a climatização interior dos edifícios (conforto térmico). A nível da União Europeia surgiu em 2002 a Diretiva 2002/91/CE, do parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro de 2002, relativamente ao desempenho energético dos edifícios, tendo esta diretiva sido transposta para a legislação Portuguesa através do Decreto-Lei nº78/2006, de 4 de Abril, respeitante ao Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios, juntamente com o Decreto-Lei nº79/2006 relativo

ao Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), e com o Decreto-Lei nº80/2006 relativo ao Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Em 2010, surgiu também da parte do Parlamento Europeu e do Conselho, a Diretiva nº2010/31/EU, que veio revogar os anteriores decretos-lei relativos às exigências energéticas e de qualidade do ar, aumentando estes níveis de exigência e incentivando a conceção de edifícios com necessidades quase nulas de energia. Em Portugal esta diretiva foi transportada para a legislação nacional através do Decreto-Lei nº118/2013, de 20 de Agosto de 2013, que vem aprovar a nova legislação relativa ao desempenho térmico e energético dos edifícios, constituída pelo Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento de Desempenhos Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS).

Esta mudança de paradigma relativa à eficiência energética dos edifícios encontra na sua aplicação um grande obstáculo nos edifícios já existentes, que se encontram muito desenquadrados face às novas exigências e, deste modo, necessitando de grandes adaptações para cumprirem a regulamentação atual, as quais devem estar previstas pelo menos em caso de grandes remodelações. Os edifícios militares tipo CANIFA constituem um bom exemplo de desfasamento face às atuais exigências de desempenho térmico e energético. Este tipo de edifícios foi largamente construído em Portugal por volta das décadas de 50 e 60, altura em que as exigências energéticas e de conforto térmico de edifícios eram inexistentes, pelo que atualmente se encontram completamente desenquadrados face à regulamentação vigente. Os edifícios militares tipo CANIFA são edifícios que a breve prazo poderão necessitar de uma profunda reabilitação. Ora, no âmbito desta reabilitação seria de todo o interesse efetuar um estudo do comportamento térmico, e das necessidades energéticas desses edifícios, no sentido de propor modalidades de ação para melhoria do seu desempenho. Esta melhoria do comportamento térmico e de redução das necessidades energéticas conduziria diretamente a uma diminuição dos gastos energéticos do edifício e a uma melhoria das suas condições de habitabilidade, passando assim os edifícios tipo CANIFA a estar em linha com a tendência atual de redução dos consumos e custos com a energia.

1.2. Objetivos e Metodologia

A dissertação de mestrado que aqui se apresenta tem como principal objetivo avaliar o comportamento térmico do Edifício de Comando de uma unidade CANIFA, e apresentar propostas de melhoria dos seus níveis de isolamento térmico com base numa análise económica que entre em conta com os custos de investimento e com os custos energéticos para climatização. O Edifício de Comando em estudo nesta dissertação será o Edifício de Comando do Regimento de Artilharia nº4 em Leiria, uma vez que esta unidade é um bom exemplo de unidade CANIFA.

O estudo térmico do edifício será efetuado em regime dinâmico utilizando para o efeito o programa *EnergyPlus*, que é um programa de simulação computacional do comportamento térmico e energético de edifícios muito utilizado em análises energéticas. Primeiramente o edifício será estudado nas condições em que se encontra atualmente, permitindo assim perceber quais os seus problemas a nível energético e térmico, e como intervir para mitigar possíveis deficiências neste domínio. Posteriormente serão estudadas possibilidades de isolamento térmico com vista à melhoria do

comportamento térmico do edifício, em que, para avaliar a qualidade de cada solução, serão contabilizados os custos de investimento e energéticos a ela associados, procurando-se com esta metodologia obter a solução ótima, ou seja, aquela que conduz a um custo global mínimo.

Numa fase final será também efetuada uma análise da qualidade térmica deste edifício à luz do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) e do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS), procurando-se assim retirar ilações ao nível da legislação corrente.

1.3. Plano de Trabalhos

A presente dissertação é constituída por 9 capítulos. Neste primeiro capítulo faz-se uma introdução geral ao tema a tratar, procurando-se enquadrar a sua importância e definir os objetivos e metodologias adotadas.

No capítulo 2 faz-se uma introdução à reabilitação térmica de edifícios e à sua importância no contexto atual, procurando enquadrá-la através das diretivas e normas produzidas neste âmbito, bem como através do paradigma vigente da poupança de energia.

O Capítulo 3, por sua vez, pretende apresentar os edifícios CANIFA, desde a sua razão histórica à sua organização funcional, bem como os aspetos construtivos associados aos mesmos; neste capítulo serão também apresentadas as características referentes ao edifício em estudo nesta dissertação.

O caso de estudo propriamente dito é introduzido no capítulo 4, capítulo este que pretende explicar a metodologia de estudo adotada, bem como a modelação efetuada para o edifício em questão.

No capítulo 5 analisam-se os resultados obtidos para o edifício em questão na sua situação atual, antes de se efetuar qualquer tipo de intervenção.

No capítulo 6 são apresentadas as soluções de reabilitação possíveis e quais aquelas que serão preconizadas para os diferentes elementos construtivos do edifício.

O capítulo 7, por sua vez, é dedicado à avaliação das espessuras de isolamento a adotar para os diferentes elementos construtivos do caso de estudo, explicando-se previamente a metodologia adotada para efetuar esta avaliação.

À semelhança do capítulo 5, no capítulo 8 é efetuada uma análise dos resultados obtidos, sendo que neste capítulo a análise incidirá nas soluções de reabilitação propostas.

Por fim, o capítulo 9 apresentará as conclusões referentes ao estudo efetuado e algumas propostas de estudos futuros.

CAPÍTULO II

2. Reabilitação energética de edifícios

2.1. Dependência energética

A energia é atualmente a base da economia de qualquer país, uma vez que quase todas as atividades humanas dependem deste recurso para se desenvolver. Em qualquer cidade a dependência humana da energia é visível, seja no contexto habitacional, em que cada alojamento tem um gasto de energia diário resultante das tarefas da vivência doméstica, seja no contexto de edifícios de escritórios, em que os seus gastos energéticos estão associados à utilização intensiva de equipamentos, ou mesmo no contexto industrial, em que os gastos energéticos estão associados à produção de bens que fazem parte do quotidiano. Esta energia pode ter diversas proveniências: energias renováveis, que têm um impacto bastante reduzido no planeta, ou energias convencionais, que têm um impacto elevado no planeta. As energias renováveis são formas de gerar energia que não assentam em recursos finitos (energia eólica, energia solar, energia hídrica, energia das ondas e marés, etc.), no entanto na generalidade dos países a dependência energética de recursos não renováveis é ainda muito grande. Na Figura 1 mostra-se a dependência europeia de recursos energéticos não renováveis.

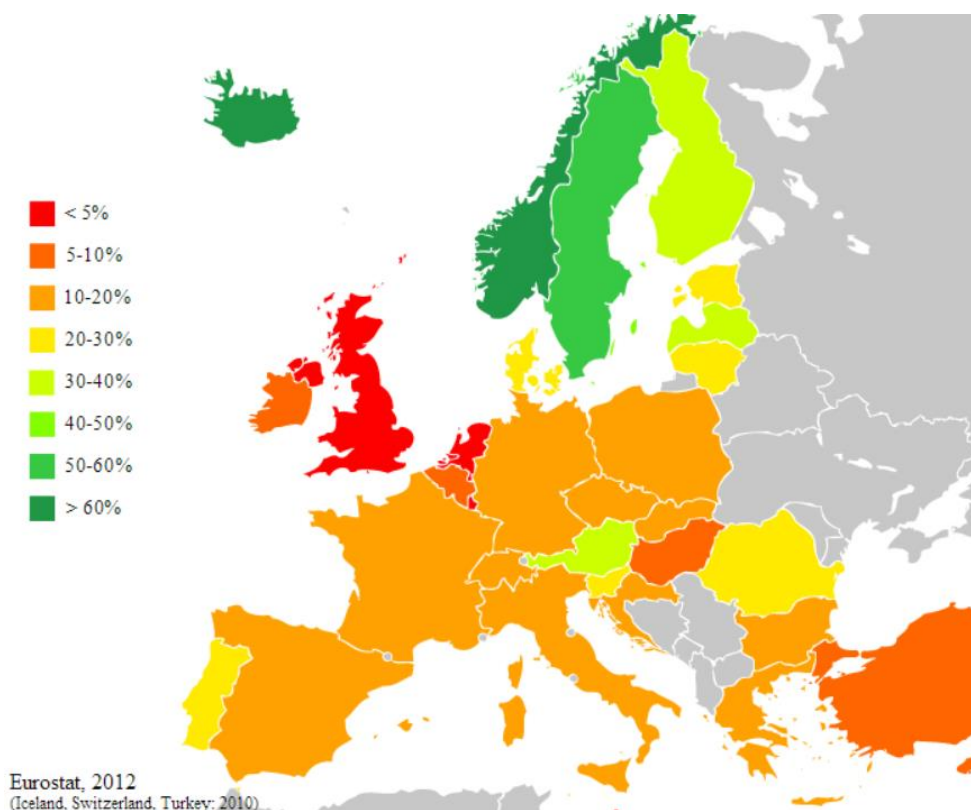


Figura 1 - Percentagem de consumo total de energia proveniente de fontes renováveis em 2012 [2]

É visível que na generalidade dos países a percentagem de consumo de energia derivada de fontes renováveis é baixa, ou seja, a maioria dos países da Europa está dependente de fontes de energia não renováveis. O facto de existir uma dependência elevada das energias não renováveis, que

são baseadas em recursos finitos, aliado ao facto da produção de energia com recurso a fontes não renováveis ser altamente poluente, leva a que se instale o paradigma atual, que aponta para a necessidade de redução dos gastos energéticos, na procura de um futuro mais sustentável. A produção de energia com recurso a fontes não renováveis é uma fonte direta de emissões de CO₂, o que diminui gravemente a longevidade do planeta, comprometendo o futuro das gerações vindouras.

Numa cidade comum os edifícios, tanto de comércio e serviços como residenciais, são responsáveis por uma grande parte do consumo energético, sendo que a indústria e os transportes representam também um gasto significativo. Na Figura 2 é possível observar a preponderância que os edifícios têm no consumo de energia, segundo o *Center for Climate and Energy Solutions* [3].

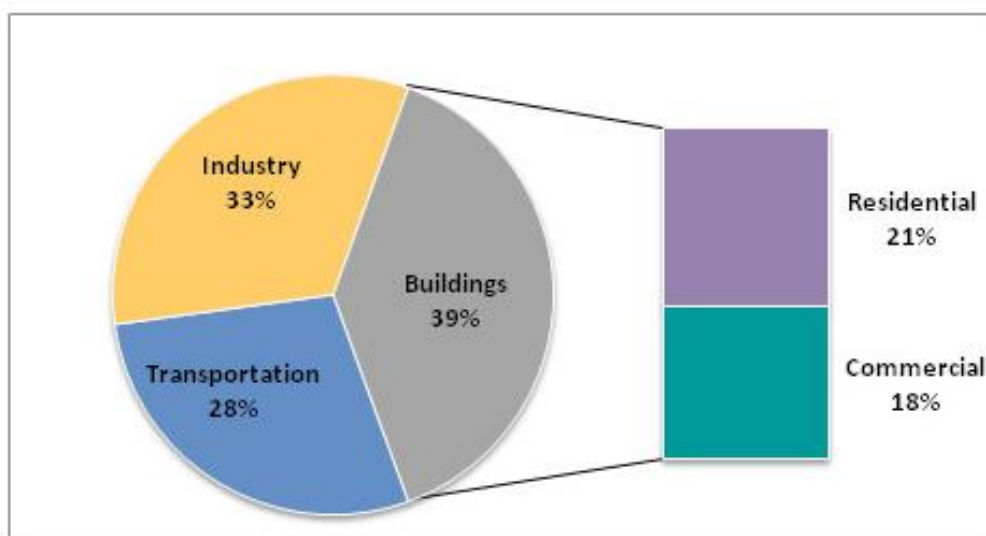


Figura 2 - Percentagem de consumo energético, com os diferentes sectores, nos E.U.A [3]

Os edifícios representam uma grande fatia dos gastos energéticos. Como tal, se a intenção é efetivamente reduzir as emissões de CO₂ e procurar diminuir a dependência humana em relação aos recursos finitos, há que tornar a ocupação humana sustentável reduzindo significativamente o consumo de energia, devendo-se intervir também no consumo de energia dos edifícios, de forma a torná-los mais eficientes.

2.2. Necessidade de reabilitação energética de edifícios em Portugal

Em Portugal, a necessidade de reduzir o consumo energético é também uma realidade. Tendo em conta que o consumo elétrico dos edifícios em Portugal representa cerca de 33.5% [1] do consumo total, faz todo o sentido procurar mitigar os gastos energéticos com os edifícios.

Além das preocupações energéticas, as exigências de conforto dentro dos edifícios têm vindo a aumentar, as quais passam por garantir que o edifício assegura determinados parâmetros de conforto térmico.

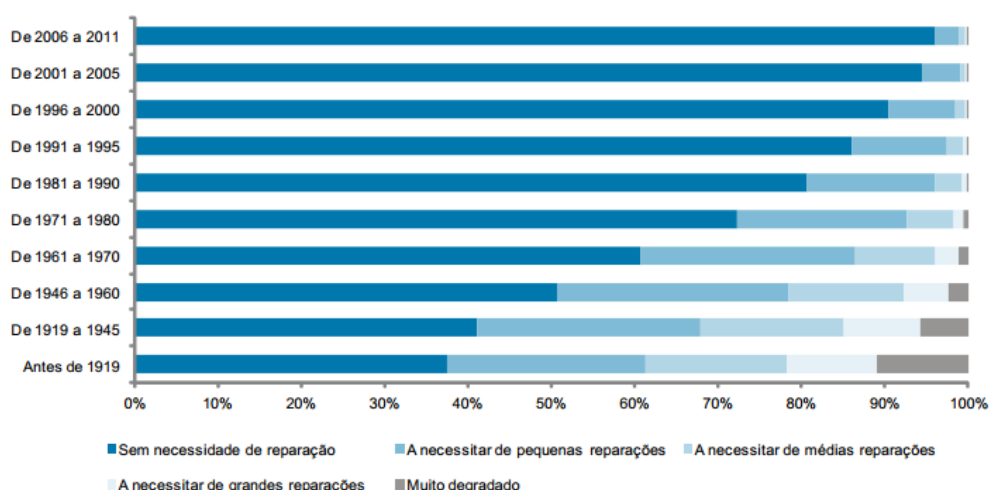
A maioria dos edifícios construídos em Portugal foram edificados há algumas décadas atrás e, como tal, encontram-se desenquadrados com o paradigma da economia de energia e melhoria do conforto térmico, uma vez que à data da construção da maioria destes edifícios tais preocupações não eram uma realidade. Na Tabela 1 lista-se o número de edifícios existentes em três datas distintas.

Tabela 1 - Edifícios e alojamentos em 1991, 2001 e 2011 [4]

	Alojamentos (continente)	Edifícios (continente)
Censos 1991	4029445	2712766
Censos 2001	4866373	2997659
Censos 2011	5638503	3352829

Como se pode observar na tabela, a maioria dos edifícios em Portugal são bastante antigos, estando portanto desatualizados no que toca às preocupações de poupança de energia e melhoria do conforto térmico. Muitos destes edifícios foram construídos em alturas em que as preocupações energéticas eram muito poucas ou inexistentes, o que leva a que exista uma elevada necessidade de reabilitação energética e de conforto, com vista a torna-los mais eficientes. Aliada à necessidade de reabilitação energética, junta-se também a necessidade reabilitação estrutural e construtiva, para fazer face ao desgaste e degradação que atinge muitos destes edifícios, dada a sua antiguidade e ausência de manutenção regular, como se pode verificar na Tabela 2.

Tabela 2 - Percentagem de edifícios construídos em diferentes datas com necessidade de renovação [4]



Pela observação da Tabela 2, é imediato concluir que seria de todo desejável desenvolver programas de reabilitação integrados, dirigidos não apenas para as reparações construtivas mas também para a melhoria do desempenho energético e condições de conforto, caminhando assim no sentido de um futuro mais sustentável, com menor dependência energética de recursos finitos e com menores emissões de CO₂.

Os edifícios de habitação e os edifícios de comércio e serviços correntes, são naturalmente domínios em que a intervenção no sentido de mitigar os gastos energéticos é essencial. Além destes edifícios existem também infraestruturas do estado, nomeadamente infraestruturas da instituição militar, que dada a sua data de construção, não foram alvo destas preocupações, e por isso apresentam também necessidades de reabilitação térmica. É no âmbito dos edifícios militares, nomeadamente os edifícios CANIFA, que esta dissertação se insere, com o objetivo de efetuar uma análise das suas necessidades energéticas e apresentar propostas de intervenção que possam contribuir para a redução dos consumos energéticos e melhoria das condições de conforto térmico. O edifício alvo de estudo neste trabalho será o Regimento de Artilharia nº4 de Leiria (RA4). Este edifício é representativo de

muitos outros edifícios CANIFA em Portugal, sendo por essa razão um bom exemplo de estudo. No Capítulo 3, serão mais aprofundados os principais aspetos relativos a este tipo de edifícios.

2.3. Principal legislação

Dada a cada vez maior escassez de recursos e aumento da emissão de poluentes devido à utilização intensiva de energia, nos últimos anos as preocupações em relação à poupança de energia têm vindo a aumentar, tanto a nível mundial, como a nível europeu e nacional. Estas preocupações estendem-se também, naturalmente, ao sector dos edifícios. Neste sector esta preocupação tem-se traduzido através de legislação própria, sendo que a primeira diretiva europeia respeitante à redução do consumo energético e redução das emissões de gases de efeito de estufa foi a Diretiva Europeia 2002/91/CE. Esta mesma Diretiva foi transposta para a legislação portuguesa através dos seguintes Decretos-Lei: Decreto-Lei nº78/2006 de 4 de Abril - Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE); Decreto-Lei nº79/2006 de 4 de Abril - Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização em Edifícios (RSECE); Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de Abril - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [5]. Este sistema de certificação visou assegurar um desempenho energético dos edifícios que permitisse obter as condições de conforto térmico desejáveis com uma diminuição dos consumos energéticos considerável.

Apesar dos passos dados pelo Sistema Nacional de Certificação Energética, as exigências relativas à poupança energética e redução de emissão de poluentes continuaram a aumentar, sendo que a 19 de Maio de 2010 foi publicada a Diretiva Europeia nº 2010/31/EU, que veio introduzir novos elementos aumentando as exigências associadas ao desempenho energético dos edifícios. Esta Diretiva Europeia foi transposta para a regulamentação portuguesa através do Decreto-Lei nº118/2013 de 20 de Agosto, que aprova o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, e assenta no cumprimento do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) [6] e do Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) [7]. Esta nova regulamentação veio portanto substituir os anteriores SCE, RSECE o RCCTE.

Neste trabalho não será efetuada uma análise fundamentada na regulamentação, nomeadamente no que respeita aos seus métodos de cálculo, pois foi opção a realização de uma análise dinâmica baseada nas capacidades do programa *EnergyPlus*. No entanto, a regulamentação, por fornecer parâmetros e termos de comparação que permitem validar ou invalidar uma determinada solução de reabilitação, foi utilizada nesta dissertação com este objetivo específico.

CAPÍTULO III

3. Caracterização dos edifícios CANIFA

3.1. Resenha Histórica

Após a segunda guerra mundial assistiu-se a uma tendência global de modernização das forças armadas, tendo sido Portugal, também, alvo dessa tendência. Este processo estendeu-se não só à modernização dos equipamentos mas também das infraestruturas. É neste âmbito que nos finais dos anos 40 o Ministério das Obras Públicas e das Comunicações cria a CANIFA (Comissão Administrativa para as Novas Infraestruturas das Forças Armadas) e dependendo desta, a CANIE (Comissão Administrativa para as Novas Infraestruturas do Exército).

Desde os finais dos anos 40 estas comissões projetaram e desenvolveram vários quartéis, construídos maioritariamente na década de 50, que ainda hoje se encontram em funcionamento. São exemplos destes quartéis o RI 1 Amadora, o RI 2 Abrantes e o RI3 Beja.

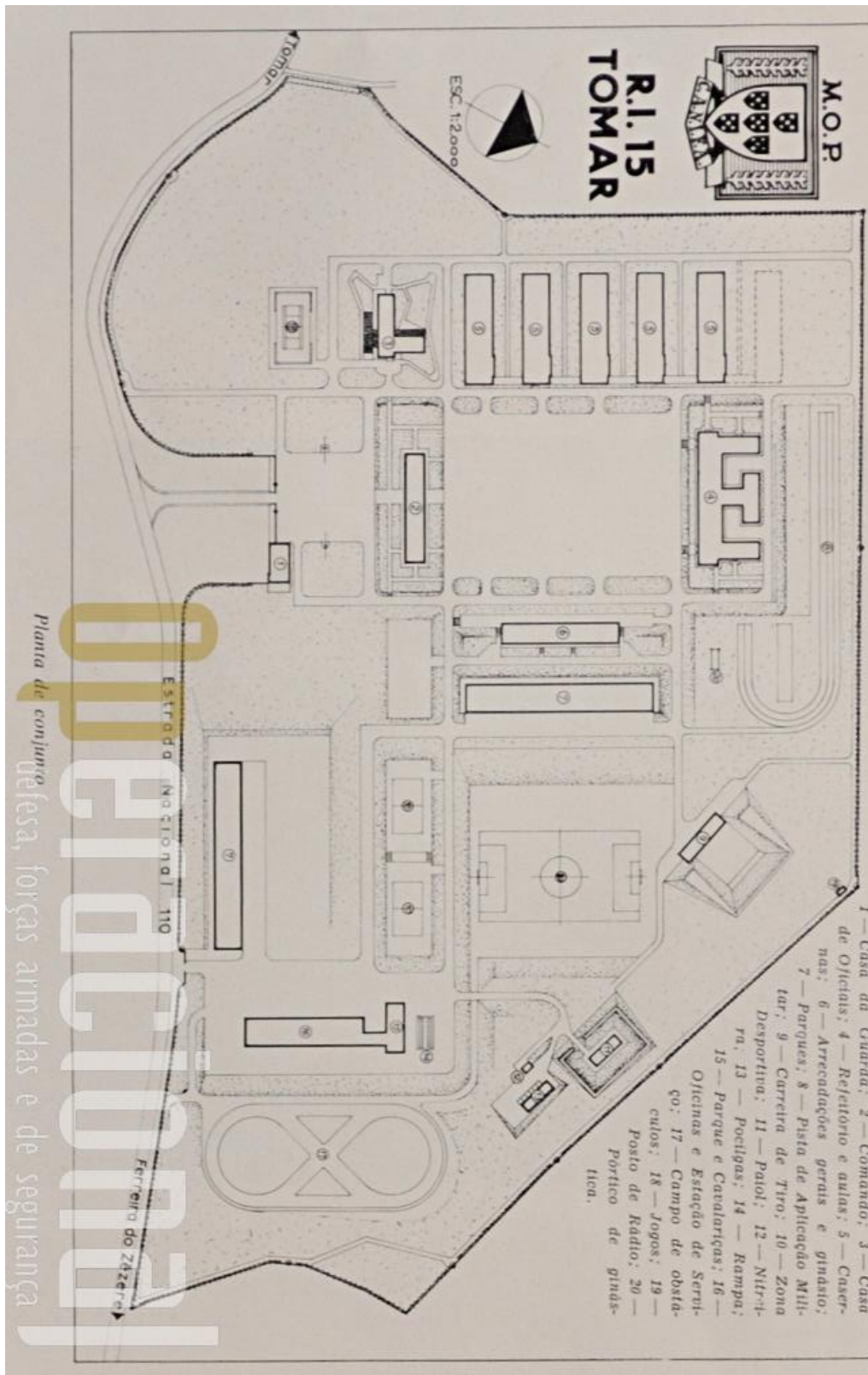
Os edifícios criados sob a alçada da CANIFA caracterizavam-se por traços arquitetónicos característicos tanto no exterior como no interior, e pela sua organização espacial dentro da unidade militar, sendo que esta organização era a mesma para as várias unidades “CANIFA”.

No relatório apresentado a 31 de Dezembro de 1960, pela CANIFA/CANIE, eram referidos os seguintes quartéis com esta organização [8]:

- Quartéis Construídos:
 - RI1 Amadora (1955)
 - RI 2 Abrantes (1955)
 - RI 3 Beja (1956)
 - Novo Quartel da Encarnação (1960)
 - RI 5 Caldas (1952)
 - RI 6 Porto (1950)
 - RI 7 Leira (1955)
 - RI 8 Braga (1955)
 - RI 10 Chaves (1958)
 - RI 13 Vila-Real (1952)
- Quartéis em Construção:
 - RI 15 Tomar
 - RI 19 Funchal
- Quartéis em estudo
 - RI 9 Lamego
 - RI 11 Setúbal
 - RC 8 Castelo Branco
 - BI 18 Ponta Delgada
 - Bcaç 2 Covilhã

- Bcaç 3 Bragança
- RC 6 Guimarães
- Remodelações em curso
 - EPC Santarém
 - EPC (antiga) Torres Novas
 - EPA Vendas Novas
 - Centro Militar da Amadora (RI 1, RAAA 1, Academia militar e RC 7)
 - HMR 1 Porto
 - BA 3 (edifícios) Tancos
 - RArt Pes 1 Sacavém
 - Quartel de Infantaria 12 Coimbra
 - Bat Caç 6 Castelo Branco
 - Bat Inf 17 Angra do Heroísmo
 - Quartel de Cav 6 Porto
 - RE 1 (Pontinha) Lisboa
- Remodelações em Estudo
 - Q G 3ª RM Tomar
 - HMP Lisboa
 - Hosp Mil Évora
 - RA 5 Penafiel

Como é possível verificar, a influência da CANIFA é notória num elevado número de unidades militares espalhadas pelo país, sendo que a organização interior das unidades em questão segue sempre os mesmos princípios e objetivos. Na Figura 3 é possível observar a organização de uma unidade militar CANIFA tipo.



Planta de conjunto defesas, forças armadas e de segurança

Figura 3 - RI 15 Tomar, exemplo de Quartel CANIFA [9]

3.2. Organização dos Quartéis CANIFA

Relativamente à organização das unidades, estas dividem-se em 14 núcleos funcionais, em relação aos quais existem proximidades relativas que devem ser tidas em conta no que toca à conceção da unidade militar. As unidades militares CANIFA eram concebidas tendo em vista este posicionamento espacial dos diferentes núcleos. Na Figura 4 apresentam-se os núcleos funcionais.



Figura 4 - Núcleos funcionais de uma unidade militar [10]

Para cada um destes níveis funcionais existem posicionamentos relativos que devem ser respeitados, devendo nomeadamente ter-se em atenção a proximidade do núcleo de apoio moral e dos serviços de apoio energético ao núcleo de comando e de oficiais e sargentos. O núcleo de aplicação militar e treino físico deve estar sempre próximo do núcleo dos espaços verdes. Por fim, é de extrema importância que o núcleo de Armazenamento de Explosivos esteja distanciado de todos os outros núcleos funcionais.

As relações de proximidade entre os diferentes núcleos funcionais apresentam-se também descritas na Figura 5.

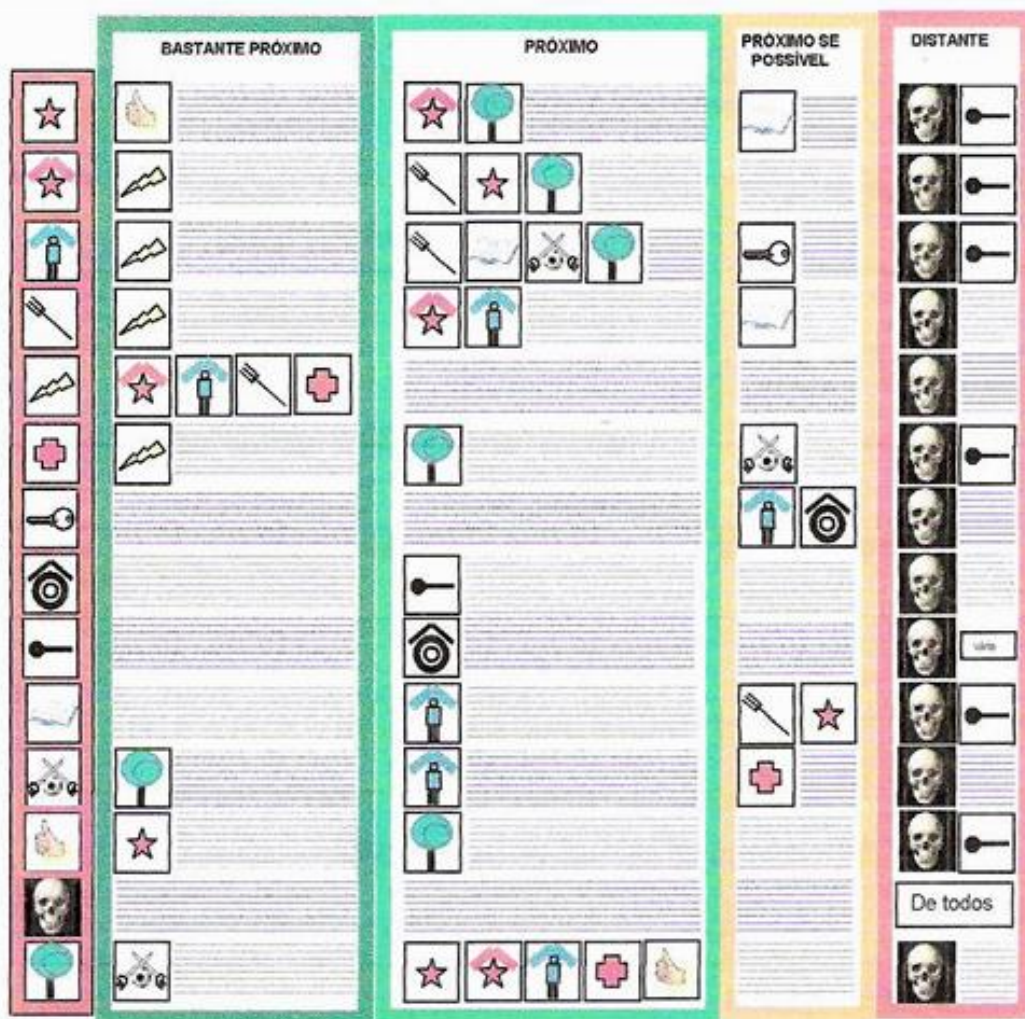


Figura 5 - Posicionamento relativo dos núcleos funcionais [10]

Os quartéis CANIFA permitiram a aplicação dos princípios acima descritos em diferentes unidades de forma eficiente, sendo que a disposição destas unidades se encontrava pré-definida de acordo com estes princípios.

3.3. Caracterização do Edifício de Comando de Leiria

O caso de estudo abordado neste trabalho é o Edifício de comando do Regimento de artilharia nº4 em Leiria. Este edifício foi construído em 1955, tem dois pisos acima do solo, e é em tudo semelhante a muitos outros existentes no país, e portanto também nos seus aspetos construtivos, razão pela qual se optou por tomá-lo como o caso de estudo deste trabalho. Na Figura 6 pode-se observar uma imagem do Regimento de Artilharia nº 4.



Figura 6- Regimento de Artilharia nº 4 [11]

3.3.1. Localização

Como acima referido, o edifício encontra-se no Regimento de Artilharia nº4 em Leiria. Pode-se identificar na Figura 7 a sua localização em Portugal.



Figura 7 - Localização do edifício [12]

Mais concretamente, na Figura 8, é possível observar a localização do Regimento de Artilharia nº4, bem como a localização do edifício de comando em questão dentro da unidade militar.



Figura 8 - Localização do edifício de comando dentro do RA4

As características climáticas associadas a esta zona do país, de acordo com Despacho nº15793-F/2013 [13], são as que se apresentam na Tabela 3.

Tabela 3 - Características climáticas de Leiria

Localização do edifício	Leiria
Zona climática de Inverno	I1
Zona climática de Verão	V1
Número de graus-dias (GD) (°C.dias)	1298
Duração da estação de aquecimento (meses)	6
Temperatura externa do Projecto (°C)	31
Amplitude Térmica (°C)	12
Altitude (m)	100

É também importante referir a orientação do edifício, ou seja, o ângulo que o edifício faz com o norte. Este ângulo foi obtido através do *Google Earth*, como em seguida se mostra na Figura 9.

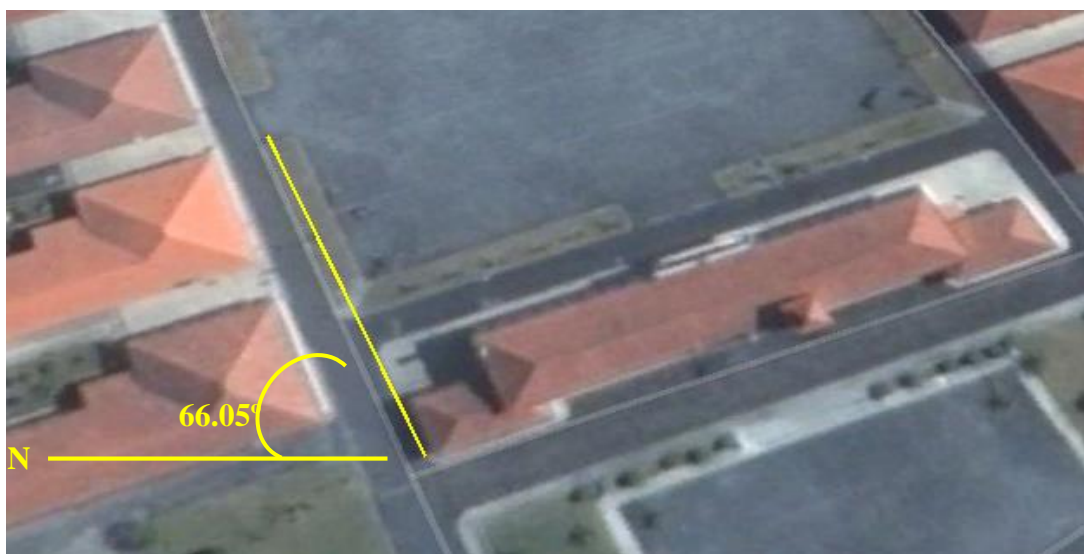


Figura 9 - Orientação do edifício de comando do RA4

3.3.2. Plantas

O edifício de comando do RA4 apresenta dois pisos, cujas plantas se podem ver na Figura 10 e Figura 11 e cujos alçados se podem ver na Figura 12, Figura 13 e Figura 14.

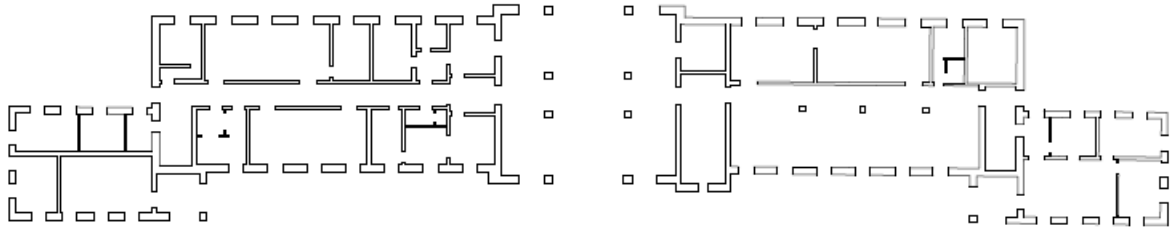


Figura 10 - Planta do 1º piso

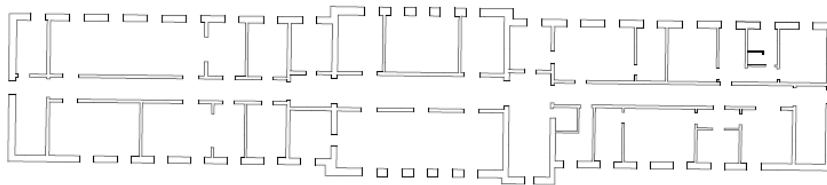


Figura 11 - Planta do 2º piso

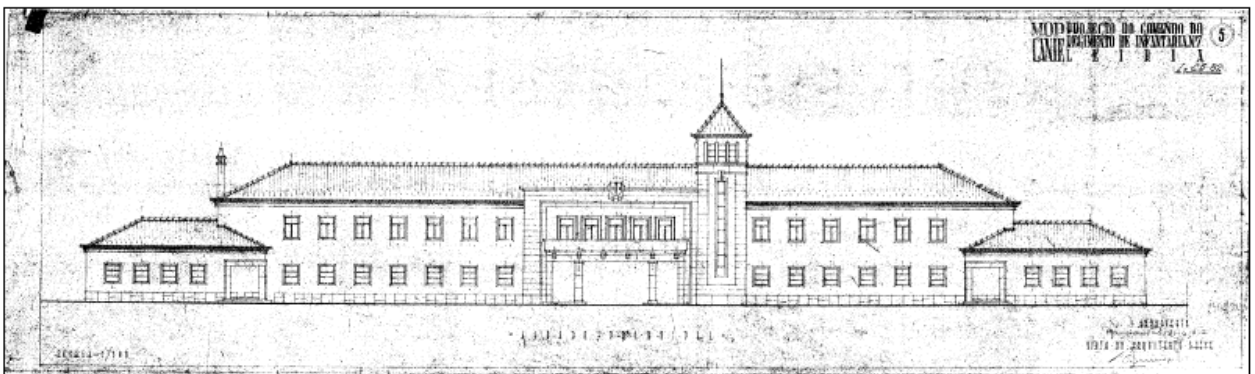


Figura 12 - Alçado frontal do edifício

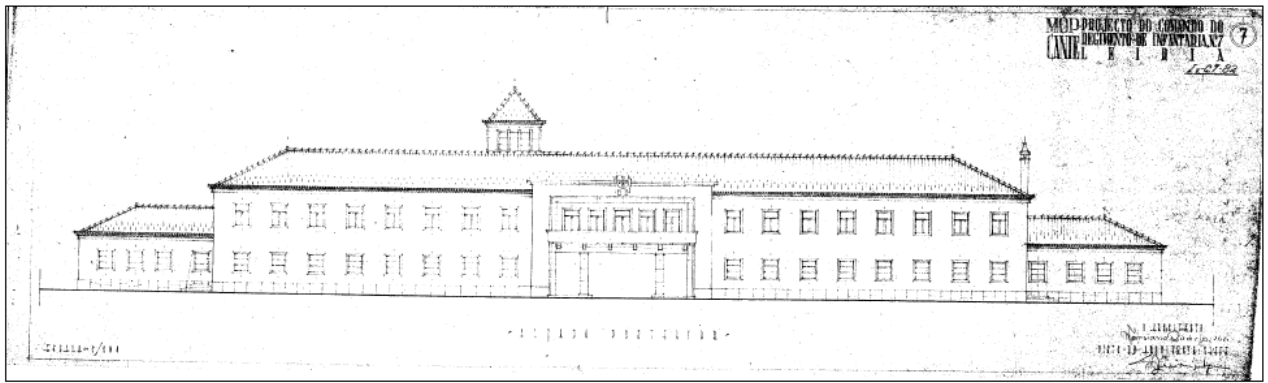


Figura 13 - Alçado traseiro do edifício

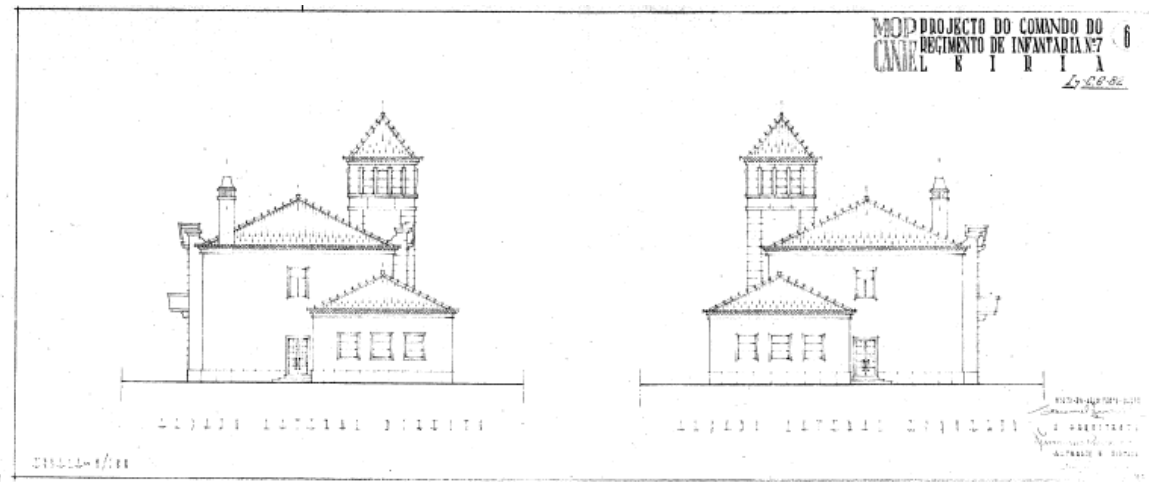


Figura 14 - Alçado lateral do edifício

Mais à frente este edifício de comando será modelado no *EnergyPlus*. Para efetuar essa modelação, e por uma questão de simplicidade, optou-se apenas por inserir parte do edifício, uma vez que este é bastante extenso, o que consequentemente levaria a um elevado volume de dados, tornando assim o tratamento dos dados e a análise dos resultados um processo excessivamente complicado. Uma vez que apresenta simetria em relação ao seu eixo médio transversal, decidiu-se modelar apenas metade do edifício, incidindo também a modelação na nave central e numa das alas laterais. Foram também desprezadas as partes laterais, dado que estas não possuem segundo piso e porque também são de reduzida dimensão. Com esta modelação pretendeu-se apenas extrair as zonas do edifício que representam bem o seu comportamento térmico. Seguidamente apresenta-se a parte do edifício que foi modelada no *EnergyPlus*, bem como as utilizações dos espaços presentes nesta parte do edifício. Na Figura 15 apresenta-se as zonas do piso térreo que foram modeladas, bem como as utilizações que lhes estão destinadas.

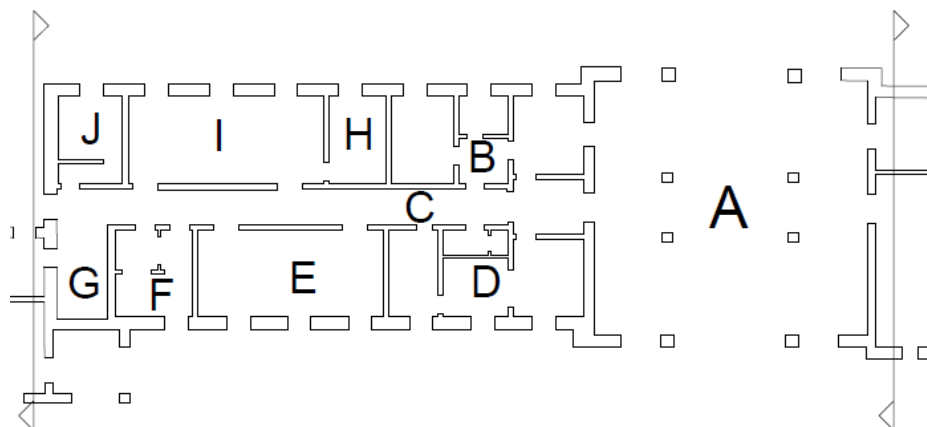


Figura 15 – 1º Piso da área modelada com as respetivas utilizações

Legenda:

- A – Zona de passagem
- B – Gabinete do Oficial de Dia (incluindo casa de banho e quarto)
- C – Corredor
- D – Central telefónica
- E – Transmissões
- F – WC
- G – Escadaria
- H – Arrecadação
- I – Museu de Sapadores
- J – Secção de Cifra

Na Figura 16, por sua vez, apresentam-se as zonas do primeiro piso com as respetivas utilizações.

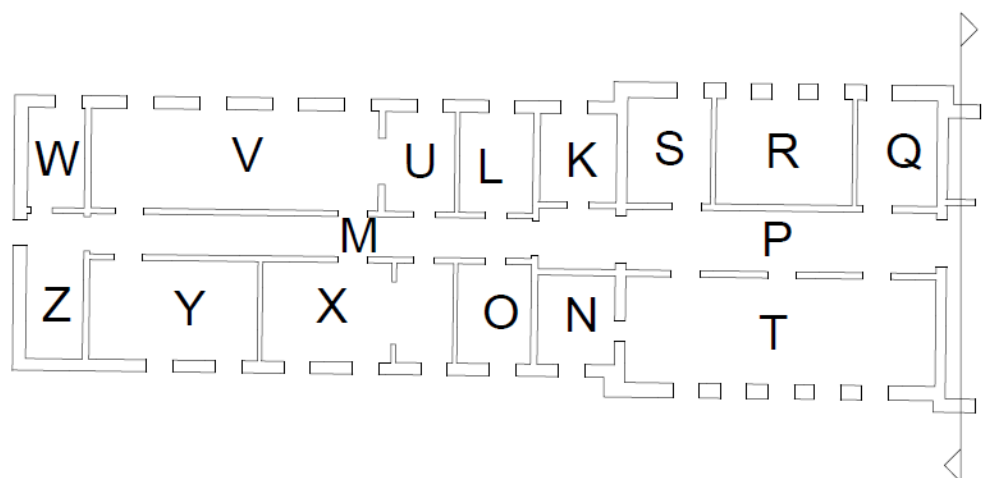


Figura 16 – 2º Piso da área modelada com as respetivas utilizações

Legenda:

- K – Ordenança
- L – Major
- M – Corredor
- N – Anexo
- O – Gabinete de Major
- P – Corredor de Comando
- Q – Gabinete do 2º Comandante
- R – Gabinete do Comandante
- S – Sala de espera
- T – Biblioteca
- U – Arrecadação
- V – Projeção e esgrima
- W – Autos
- X – Secção Técnica
- Y – Estudos tácticos
- Z – Autos

3.4.3. Aspetos construtivos

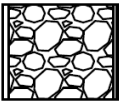
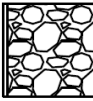







O levantamento dos aspetos construtivos relativos a este edifício foi feito com base no conhecimento do oficial responsável pelas infraestruturas no RA4. A maior incógnita relativa à caracterização dos elementos construtivos deste edifício esteve no tipo de rocha utilizada na construção das paredes de pedra. No entanto, com recurso a uma abertura para ventilação na fachada do edifício foi possível concluir que a pedra em questão é Basalto. O pormenor da abertura na parede pode ser visto na Figura 17.



Figura 17 - Pormenor da abertura de ventilação onde se pode verificar que as paredes são de Basalto

Seguidamente apresenta-se na Tabela 4 a constituição dos diversos elementos construtivos opacos do edifício de comando

Tabela 4 - Constituição dos elementos construtivos

	Material	e(m)
<p>Parede exterior 0.60</p> <p>Ext  Int</p> <p>(1) (2) (3) (4)</p>	<p>(1)Reboco</p> <p>(2)Pedra Basalto</p> <p>(4)Reboco</p> <p>(3) Estuque</p>	<p>0.03</p> <p>0.555</p> <p>0.01</p> <p>0.005</p>
<p>Parede exterior 0.50</p> <p>Ext  Int</p> <p>(1) (2) (3) (4)</p>	<p>(1)Reboco</p> <p>(2)Pedra Basalto</p> <p>(4)Reboco</p> <p>(3) Estuque</p>	<p>0.03</p> <p>0.455</p> <p>0.01</p> <p>0.005</p>
<p>Parede exterior 0.40</p> <p>Ext  Int</p> <p>(1)(2)(3)(4)</p>	<p>(1)Reboco</p> <p>(2)Pedra Basalto</p> <p>(4)Reboco</p> <p>(3) Estuque</p>	<p>0.03</p> <p>0.355</p> <p>0.01</p> <p>0.005</p>
<p>Parede interior 0.25</p> <p>Int  Int</p> <p>(1)(2)(3)(4)(5)</p>	<p>(1)Estuque</p> <p>(2)Reboco</p> <p>(3)Tijolo Furado</p> <p>(4)Reboco</p> <p>(5) Estuque</p>	<p>0.005</p> <p>0.01</p> <p>0.22</p> <p>0.01</p> <p>0.005</p>
<p>Parede interior 0.15</p> <p>Int  Int</p> <p>(1)(2)(3)(4)(5)</p>	<p>(1)Estuque</p> <p>(2)Reboco</p> <p>(3)Tijolo Furado</p> <p>(4)Reboco</p> <p>(5) Estuque</p>	<p>0.005</p> <p>0.015</p> <p>0.11</p> <p>0.015</p> <p>0.005</p>
<p>Pavimento Intermédio</p> <p>(1) Int</p> <p>(2)  Int</p> <p>(3)</p> <p>(4) Int</p> <p>(5)</p>	<p>(1)Rev. Cerâmico</p> <p>(2)Argamassa</p> <p>(3)Laje Betão</p> <p>(4)Reboco</p> <p>(5)Estuque</p>	<p>0.015</p> <p>0.01</p> <p>0.15</p> <p>0.01</p> <p>0.005</p>
<p>Tecto do ultimo piso</p> <p>(1) Int</p> <p>(2)  Int</p> <p>(3) Int</p>	<p>(1)Laje Betão</p> <p>(2)Reboco</p> <p>(3)Estuque</p>	<p>0.15</p> <p>0.015</p> <p>0.005</p>
<p>Pavimento térreo</p> <p>(1) Int</p> <p>(2)  Int</p> <p>(3) Ext</p>	<p>(1)Rev. Cerâmico</p> <p>(2)Argamassa</p> <p>(3)Laje Betão</p>	<p>0.015</p> <p>0.01</p> <p>0.15</p>
<p>Cobertura inclinada</p> <p>(1) Ext</p> <p></p> <p>Int</p>	<p>(1)Telha</p>	<p>0,03</p>

Como se pode verificar pela constituição dos elementos construtivos, não existe qualquer tipo de preocupação com os aspetos relacionados com o desempenho térmico, sendo que na altura em que este edifício foi construído, tais preocupações não eram tidas em conta.

Relativamente aos envidraçados que se encontram neste edifício, são constituídos por vidro duplo com caixa-de-ar de 7mm. No entanto estes envidraçados não são os originais. Os vidros duplos que se encontram instalados foram colocados numa intervenção recente, sendo que os vidros originais eram vidros simples de 4mm de espessura. Estes mesmos envidraçados encontram-se visíveis na Figura 18.



Figura 18 - Vidros duplos que se encontram atualmente no edifício

As características dos vidros simples e duplos apresentam-se na Tabela 5 e na Tabela 6.

Tabela 5 - Vidros originais do edifício

Vidro Simples	
e (mm)	4
Caixilharia	Aluminio
Vidro	Transparente

Tabela 6 - Vidros duplos após a intervenção

Vidro Duplo	
e (mm)	4
e_{ar} (mm)	7
Caixilharia	Aluminio
Vidro	Transparente

Uma vez que os envidraçados foram objeto de uma intervenção recente, as propostas de reabilitação nesta dissertação apenas incidirão sobre os elementos opacos. Refira-se também que a importância dos vãos envidraçados no comportamento global do edifício não é muito preponderante, como se verá no capítulo 5.

Também neste edifício é visível que as portas interiores são de madeira, com uma espessura de 3,5 centímetros. As portas exteriores do edifício são portas de ferro com uma grande área de envidraçados, tal como se pode verificar na Figura 19.



Figura 19 - Porta exterior do edifício

Dado o facto de grande parte da porta exterior ser de vidro e por motivos de simplificação na modelação da mesma, esta foi efetuada considerando que a totalidade da porta era constituída por vidro.

CAPÍTULO IV

4. Caso de estudo

O alvo de estudo desta dissertação de mestrado é o edifício de comando do regimento de artilharia nº4. Neste edifício pretende-se definir uma solução de reabilitação térmica que permita minimizar os custos energéticos e de aplicação dos materiais.

No presente capítulo será explicada sumariamente a metodologia usada para identificar os elementos a isolar termicamente e determinar a espessura do material a utilizar, após o que serão apresentados os aspetos particulares da modelação deste edifício no *EnergyPlus*.

4.1. Metodologia de Análise

A análise do edifício efetuou-se em duas fases e recorreu em ambas a um modelo de análise térmica dinâmica criado com recurso ao *EnergyPlus*. Numa primeira fase modelou-se o edifício no *EnergyPlus*, com as condições visíveis no local. Com recurso a este modelo determinou-se a percentagem de perdas térmicas associada aos diferentes elementos construtivos, o que permitiu a sua ordenação em termos do impacto térmico produzido no edifício. Numa segunda fase efetuou-se um estudo com base nas necessidades energéticas de aquecimento e no custo de colocação do isolamento para determinar a espessura ótima a adotar.

Pode não ser imediato avaliar quais os elementos construtivos da envolvente de um edifício que deverão ser alvo de reabilitação térmica. O nível de trocas de calor através de um elemento não depende apenas do seu coeficiente de transmissão térmica, mas também da sua orientação solar, da área que ocupa na envolvente, da sua massa térmica e, em ultima análise, da forma como se interrelaciona com os outros elementos da envolvente.

Por outro lado, a estimação do nível de isolamento ótimo de um elemento construtivo pressupõe o conhecimento da sua contribuição individual para as necessidades energéticas do edifício. Admitindo linearidade dos efeitos, tal significa que essa contribuição poderá ser obtida deduzindo as necessidades energéticas do edifício com a participação de todos os elementos, das necessidades energéticas do edifício sem a participação do elemento em causa, o que se pode fazer tornando-o adiabático, tendo sido esta a metodologia utilizada neste trabalho.

Dada a extensão do problema, optou-se nesta dissertação por estruturar o estudo nas duas fases acima referidas: primeiro identificar os elementos que devem ser isolados termicamente e só posteriormente determinar a espessura e o tipo de isolamento a aplicar.

Através do *EnergyPlus* é possível determinar as perdas totais de uma certa zona térmica, e também determinar as perdas que se processam através de cada elemento dessa mesma zona térmica. Com esta informação é possível apurar a percentagem de perdas que ocorre através de quaisquer elementos, incluindo portas e envidraçados, sendo que os elementos com maior percentagem de perdas serão os que, prioritariamente, deverão ser alvo de isolamento térmico.

Com base no *EnergyPlus* é também possível determinar as necessidades energéticas de aquecimento e de arrefecimento do edifício para um determinado período de tempo. Com base nestas necessidades é possível determinar o custo envolvido na climatização do edifício com a utilização de

dados equipamentos. Somando este custo ao custo do isolamento é possível, por minimização da função custo total assim obtida, determinar a espessura ótima do material adotado, para um determinado elemento construtivo do edifício. Mais á frente esta metodologia será melhor detalhada.

4.2. Modelação

A modelação do edifício de comando do RA4 foi feita com o auxílio do *Google Sketchup* através de um *plug in* do *EnergyPlus* para este mesmo programa. O *Google Sketchup* permite a introdução dos dados relacionados com a geometria do edifício e respetivos elementos construtivos (janelas, portas, paredes, coberturas, pavimentos) de forma bastante simplificada. O *EnergyPlus*, por seu lado, permite inserir os dados relacionados com os materiais e elementos construtivos, bem como com todos os aspetos relativos à utilização e funcionamento do edifício. Este programa possibilita um variado número de *outputs* que permitem ao utilizador analisar os mais variados aspetos relacionados com o comportamento térmico do edifício.

4.2.1. Geometria do Edifício

O *Google Sketchup* não permite modelar a espessura das paredes. Por essa razão a geometria do edifício foi modelada através do eixo das paredes do edifício, tendo sido também feitas algumas simplificações com vista a permitir simplificar os dados obtidos e as condições de fronteiras entre as diferentes zonas térmicas. O edifício de comando original apresenta a zona central um pouco sobressaída em relação ao resto do edifício, no entanto no *Google Sketchup* assumiu-se que toda a fachada se desenvolvia no mesmo plano. O corredor que dá acesso aos diferentes gabinetes no interior do edifício também apresenta alguns estreitamentos e alargamentos, no entanto na modelação foi considerado que este corredor mantinha sempre a mesma dimensão. Ambas estas alterações não originam imprecisões significativas e permitem a criação de um modelo menos complexo e mais fácil de analisar. Na Figura 20 apresenta-se a geometria do modelo construído no *Google Sketchup*.

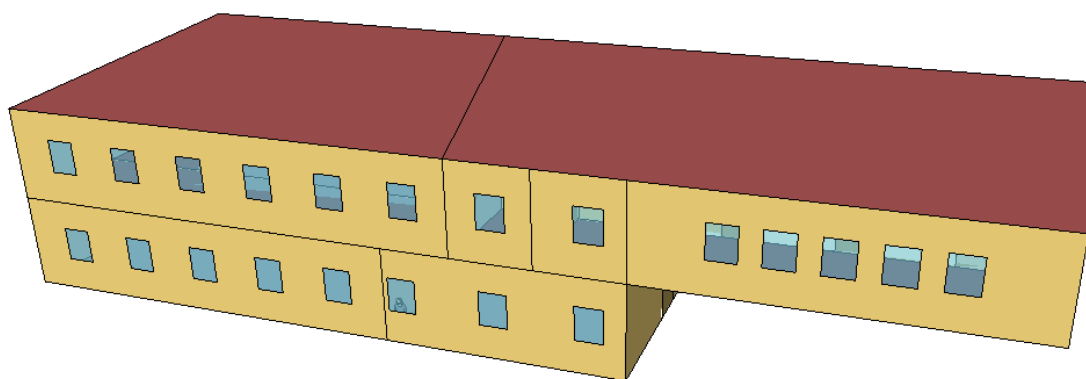


Figura 20 - Geometria modelada com recurso ao *Google Sketchup*

4.2.2. Parâmetros de Simulação

No primeiro módulo de entrada de dados do *EnergyPlus*, é possível verificar a versão do programa em utilização, neste caso a 7.1, bem como definir o tipo de simulação pretendida, neste caso para períodos de tempo associados a ficheiros climáticos, os algoritmos de cálculo de alguns mecanismos de transmissão de calor, o passo do tempo, as tolerâncias de convergência dos resultados, e algumas características gerais do edifício, como a orientação, o contexto envolvente, e a forma como é processada a distribuição da radiação solar recebida pelos envidraçados.

Relativamente a este último aspeto o programa permite 5 tipos de abordagem: *MinimalShadowing*, *FullExterior*, *FullInteriorAndExterior*, *FullExteriorWithReflection*, e *FullInteriorAndExteriorWithReflections*. No caso da abordagem *MinimalShadowing*, assume-se que não existe sombreamento exterior à exceção do produzido por reentrâncias (ressaltos) de janelas e portas. Além disso, considera-se que toda a radiação que entre numa determinada zona térmica cai sobre o pavimento e é absorvida de acordo com a absorção solar do mesmo. Qualquer radiação refletida pelo pavimento é assumida como radiação difusa e dividida proporcionalmente pelas várias superfícies interiores. As abordagens *FullExterior* e *FullExteriorWithReflections* assumem os mesmos princípios do *MinimalShadowing*, no entanto entram em conta com os sombreamentos produzidos por elementos exteriores à zona térmica em questão. Por fim, o *FullInteriorAndExterior* e *FullInteriorAndExteriorWithReflections* assentam nos mesmos pressupostos atrás referidos, no entanto em vez de assumirem que toda a radiação solar cai sobre o pavimento, é calculada por considerações geométricas a verdadeira parcela de radiação solar que atinge as diferentes superfícies interiores. No edifício em questão será utilizada a abordagem *FullInteriorAndExterior*, uma vez que esta permite uma maior precisão nos resultados obtidos.

Relativamente ao contexto em que se insere a envolvente, considerou-se um enquadramento urbano na medida em que o edifício objeto de estudo se encontra rodeado de outros edifícios. O *EnergyPlus* utiliza esta informação para assumir um perfil de velocidade do vento que depois terá importância na definição de coeficientes de pressão e de certos parâmetros de transferência de calor, como é o caso dos coeficientes associados às trocas de calor por convecção nas superfícies exteriores.

4.2.3. Localização

Como dados relativos à localização, o *EnergyPlus* requer que seja inserida a informação relativa à altitude, latitude, longitude, fuso horário e ângulo que o edifício faz com o norte (Tabela 7).

Tabela 7 - Dados de localização do edifício

Latitude (°)	39,43
Longitude (°)	8,43
Altitude (m)	100
Fuso Horário (h)	0
Orientação (°)	66.05

Foi também fornecida informação complementar sobre o local em questão, nomeadamente relacionada com o País onde se integra o edifício. Assim, no campo *RunPeriodControl:SpecialDays*, inseriu-se os feriados nacionais, uma vez que nesses dias a ocupação e uso do edifício será bastante

diferente dos restantes dias. Por sua vez, no campo *RunPeriodControl:DaylightSavingTime*, inseriu-se os períodos de mudança de hora, tendo neste caso sido usadas as datas referentes ao ano de 2014.

4.2.4. Período de simulação

O período de simulação (*Run Period*) compreende o espaço no tempo em que o programa irá efetuar a simulação térmica do edifício modelado. Esta simulação será efetuada para o período de aquecimento, que servirá de base para a estimação dos níveis de isolamento ótimos, e também para o período de arrefecimento, para avaliar o comportamento do edifício neste período com os níveis de isolamento propostos. A definição destes períodos pode ser encontrada na anterior regulamentação térmica (RCCTE) [5]. Assim, a estação convencional de aquecimento define-se como o período do ano com início no primeiro decêndio após 1 de Outubro em que, para cada localidade, a temperatura média diária é inferior a 15°C e com termo no último decêndio anterior a 31 de Maio em que a referida temperatura é ainda inferior a 15°C. Para a localidade em questão recorreu-se ao ficheiro climático utilizado, neste caso o de Coimbra, para aferir o início e o fim da estação de aquecimento, tendo-se concluído que esta tem início a 21 de Outubro e fim a 11 de Maio.

A estação convencional de arrefecimento é simplesmente constituída pelos quatro meses de Verão: Junho, Julho, Agosto e Setembro [5].

Ambas as estações foram utilizadas no *Run Period*, do *EnergyPlus*: a estação de aquecimento para avaliar as perdas térmicas e determinar as necessidades energéticas de aquecimento do edifício; a estação de arrefecimento para estimar as necessidades energéticas de arrefecimento do edifício.

4.2.5. Horários

Para o correto funcionamento do modelo é necessário a definição de horários (*Schedules*) para controlar diferentes tópicos referentes à utilização do edifício. No modelo em questão definiu-se horários de funcionamento para a iluminação artificial, para a ocupação humana, para os equipamentos elétricos do edifício, para os dispositivos de sombreamento e para os sistemas de regulação da temperatura (termostatos) do edifício.

O horário de funcionamento relativo à iluminação artificial, ocupação humana e equipamentos elétricos foi definido de acordo com o horário laboral normal, ou seja, definiu-se que entre as 8h e as 17h o edifício terá ocupação e as luzes e os equipamentos elétricos terão uma utilização corrente. Para períodos fora deste horário, entre as 17h e as 23 h, definiu-se uma ocupação e uma utilização mais reduzida para os equipamentos elétricos e iluminação artificial, e nas restantes horas considerou-se que não existe ocupação nem utilização de luzes e de equipamentos elétricos. Relativamente aos dispositivos de sombreamento, considerou-se apenas que estes poderiam ser ativados no horário laboral, das 8h às 17h.

Finalmente, no que toca aos horários dos termostatos de aquecimento e arrefecimento do edifício, estes permitem definir as temperaturas de conforto no edifício ao longo do dia, tanto para a situação de aquecimento como para a situação de arrefecimento. A definição destas temperaturas e a sua utilidade será detalhada mais a frente, sendo que o seu horário, nos períodos de maior utilização, garante que os níveis de conforto são mantidos e, fora desses períodos, onde as exigências são menores, permite condições ambiente muito menos restritivas.

4.2.6. Zonas Térmicas

A utilização do *Google Sketchup* permite a criação das diferentes zonas térmicas pretendidas. As zonas térmicas são espaços que efetuam trocas de calor com outros ambientes e onde a temperatura do ar interior se pode admitir uniforme. Dependendo da modelação e das hipóteses admitidas, uma zona térmica pode resumir-se a um compartimento ou pode estender-se a todo um piso. Quanto maior o número de zonas térmicas definidas, maior será a complexidade do modelo, no entanto também será maior o tempo necessário para simular o problema.

Na modelação deste edifício apenas foi selecionada uma parte representativa do mesmo tendo, dessa mesma parte, sido definidas 14 zonas térmicas. Com estas zonas térmicas pretendeu-se simular da forma mais precisa possível as condições reais do edifício. Como se pode observar na Figura 21 e na Figura 22, foram criadas as 11 primeiras zonas térmicas com o objetivo de detalhar o mais possível o comportamento térmico dos compartimentos, com vista a uma maior precisão na avaliação das trocas de energia térmica que aí se processam. No entanto, se o mesmo detalhe fosse usado para todo o edifício, o elevado número de zonas térmicas levaria a que o modelo fosse pouco ágil, demorando muito tempo a correr. Desta forma, optou-se por construir na parte restante do edifício zonas térmicas mais alargadas, abrangendo sempre mais do que um compartimento. Daqui resultaram as zonas 12, 13 e 14, que também se mostram na Figura 21 e na Figura 22. Nas zonas térmicas com divisórias interiores, a contribuição destas para o desempenho foi tida em conta apenas por via da massa térmica, a qual foi contabilizada e incluída no *EnergyPlus* através de campo próprio, como se mostra na Figura 24.

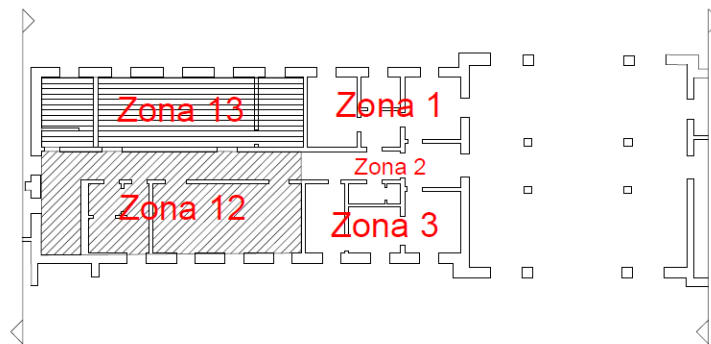


Figura 21 - Zonas térmicas do 1º piso

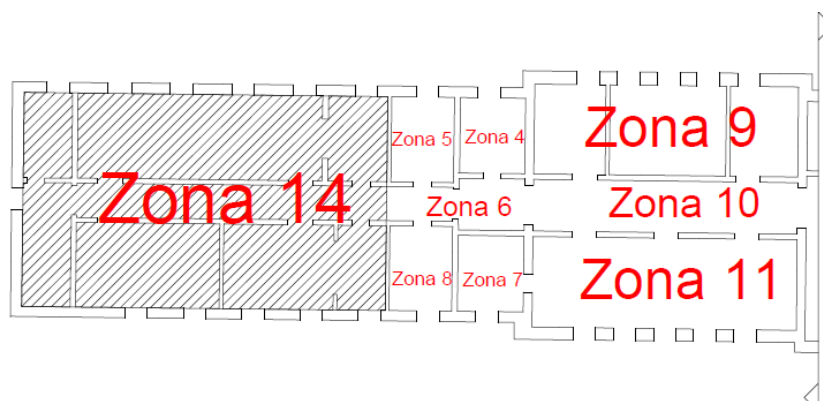


Figura 22 – Zonas térmicas do 2º piso

Para efeitos de simulação, a cobertura foi também modelada como duas zonas térmicas, uma por cima da zona mais detalhada do edifício e outra por cima da zona menos detalhada. Na Figura 23 é possível observar estes pormenores.

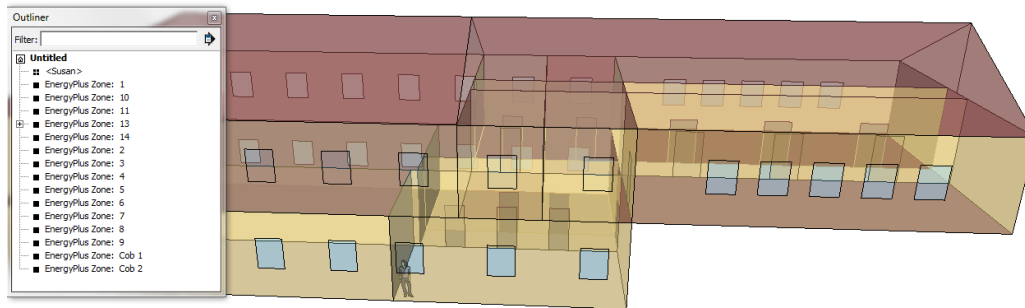


Figura 23 - Zonas térmicas modeladas com recurso ao *Google Sketchup*

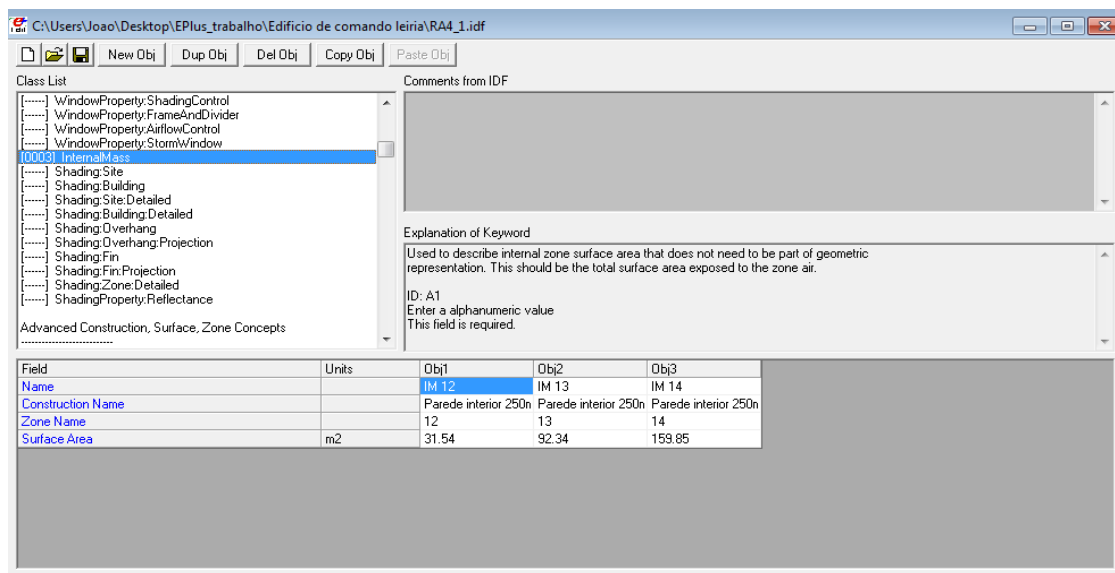
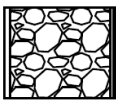
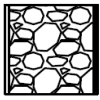
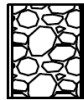



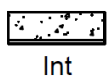
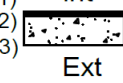



Figura 24 - Internal mass das zonas 12, 13 e 14

4.2.7. Elementos Construtivos

Para modelar os elementos construtivos há primeiro que criar os seus materiais constituintes e depois criar o elemento em si a partir destes materiais. Para cada material é necessário fornecer ao programa a espessura (m), condutividade térmica (W/m.K), peso volúmico (Kg/m³) e calor específico (J/Kg.K). Na Tabela 8 apresentam-se os diferentes elementos construtivos com os respetivos materiais constituintes.

Tabela 8 - Materiais e características dos mesmos

	Material	e(m)	λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	C (J/kg.K)
<p>Parede exterior 0.60</p> <p>Ext  Int</p> <p>(1) (2) (3) (4)</p>	<p>(1)Reboco</p> <p>(2)Pedra Basalto</p> <p>(4)Reboco</p> <p>(3) Estuque</p>	<p>0.03</p> <p>0.555</p> <p>0.01</p> <p>0.005</p>	<p>1.3</p> <p>1.1</p> <p>1.3</p> <p>0.4</p>	<p>1900</p> <p>2850</p> <p>1900</p> <p>1000</p>	<p>1000</p> <p>850</p> <p>1000</p> <p>1090</p>
<p>Parede exterior 0.50</p> <p>Ext  Int</p> <p>(1) (2) (3) (4)</p>	<p>(1)Reboco</p> <p>(2)Pedra Basalto</p> <p>(4)Reboco</p> <p>(3) Estuque</p>	<p>0.03</p> <p>0.455</p> <p>0.01</p> <p>0.005</p>	<p>1.3</p> <p>1.1</p> <p>1.3</p> <p>0.4</p>	<p>1900</p> <p>2850</p> <p>1900</p> <p>1000</p>	<p>1000</p> <p>850</p> <p>1000</p> <p>1090</p>
<p>Parede exterior 0.40</p> <p>Ext  Int</p> <p>(1)(2)(3)(4)</p>	<p>(1)Reboco</p> <p>(2)Pedra Basalto</p> <p>(4)Reboco</p> <p>(3) Estuque</p>	<p>0.03</p> <p>0.355</p> <p>0.01</p> <p>0.005</p>	<p>1.3</p> <p>1.1</p> <p>1.3</p> <p>0.4</p>	<p>1900</p> <p>2850</p> <p>1900</p> <p>1000</p>	<p>1000</p> <p>850</p> <p>1000</p> <p>1090</p>
<p>Parede interior 0.25</p> <p>Int  Int</p> <p>(1)(2)(3)(4)(5)</p>	<p>(1)Estuque</p> <p>(2)Reboco</p> <p>(3)Tijolo Furado</p> <p>(4)Reboco</p> <p>(5) Estuque</p>	<p>0.005</p> <p>0.01</p> <p>0.22</p> <p>0.01</p> <p>0.005</p>	<p>0.4</p> <p>1.3</p> <p>0.379</p> <p>1.3</p> <p>0.4</p>	<p>1000</p> <p>1900</p> <p>633</p> <p>1900</p> <p>1000</p>	<p>1090</p> <p>1000</p> <p>920</p> <p>1000</p> <p>1090</p>
<p>Parede interior 0.15</p> <p>Int  Int</p> <p>(1)(2)(3)(4)(5)</p>	<p>(1)Estuque</p> <p>(2)Reboco</p> <p>(3)Tijolo Furado</p> <p>(4)Reboco</p> <p>(5) Estuque</p>	<p>0.005</p> <p>0.015</p> <p>0.11</p> <p>0.015</p> <p>0.005</p>	<p>0.4</p> <p>1.3</p> <p>0.379</p> <p>1.3</p> <p>0.4</p>	<p>1000</p> <p>1900</p> <p>633</p> <p>1900</p> <p>1000</p>	<p>1090</p> <p>1000</p> <p>920</p> <p>1000</p> <p>1090</p>
<p>Pavimento Intermédio</p> <p>(1) Int</p> <p>(2)  Int</p> <p>(3)</p> <p>(4)</p> <p>(5) Int</p>	<p>(1)Rev. Cerâmico</p> <p>(2)Argamassa</p> <p>(3)Laje Betão</p> <p>(4)Reboco</p> <p>(5)Estuque</p>	<p>0.015</p> <p>0.01</p> <p>0.15</p> <p>0.01</p> <p>0.005</p>	<p>1.3</p> <p>1.3</p> <p>1.36</p> <p>1.3</p> <p>0.4</p>	<p>2300</p> <p>1900</p> <p>2150</p> <p>1900</p> <p>1000</p>	<p>840</p> <p>1000</p> <p>1080</p> <p>1000</p> <p>1090</p>
<p>Tecto do ultimo piso</p> <p>(1) Int</p> <p>(2)  Int</p> <p>(3)</p>	<p>(1)Laje Betão</p> <p>(2)Reboco</p> <p>(3)Estuque</p>	<p>0.15</p> <p>0.015</p> <p>0.005</p>	<p>1.36</p> <p>1.3</p> <p>0.4</p>	<p>2150</p> <p>1900</p> <p>1000</p>	<p>1080</p> <p>1000</p> <p>1090</p>
<p>Pavimento térreo</p> <p>(1) Int</p> <p>(2)  Ext</p> <p>(3)</p>	<p>(1)Rev. Cerâmico</p> <p>(2)Argamassa</p> <p>(3)Laje Betão</p>	<p>0.015</p> <p>0.01</p> <p>0.15</p>	<p>1.3</p> <p>1.3</p> <p>1.36</p>	<p>2300</p> <p>1900</p> <p>2150</p>	<p>840</p> <p>1000</p> <p>1080</p>
<p>Cobertura inclinada</p> <p>(1) Ext</p> <p></p> <p>Int</p>	<p>(1)Telha</p>	<p>0,03</p>	<p>0,34</p>	<p>200</p>	<p>920</p>

4.2.8. Dispositivos de Sombreamento

O edifício de comando de Leiria possui dispositivos de sombreamento em todos os envidraçados, como tal foram também incorporados na modelação. Os dispositivos de sombreamento considerados foram estores com alta capacidade de reflexão e baixa capacidade de transmissão de calor. Em seguida apresenta-se uma imagem dos estores existentes nos gabinetes do edifício de comando (Figura 25).



Figura 25- Estores presentes no edifício

Os estores podem estar ativos ou inativos. Para efeitos de modelação apenas se considerou que os estores estariam em funcionamento na estação de arrefecimento. A ativação dos estores depende diretamente do horário de funcionamento dos mesmos, horário esse que é semelhante ao da ocupação humana, da iluminação artificial e dos equipamentos. A ativação dos estores, além de ser regida pelo horário de funcionamento, depende também do nível de radiação solar exterior. Considerou-se que os estores seriam ativados na estação de arrefecimento sempre que a radiação solar incidente nos vãos excedesse 300 W/m^2 .

Como é possível verificar no exemplo da Figura 26 e da Figura 27, quando a radiação solar incidente excede 300 W/m^2 os estores são ativados atenuando assim o impacto dessa mesma radiação nas condições térmicas interiores. Os gráficos que se apresentam apenas mostram dois dias da estação de arrefecimento.

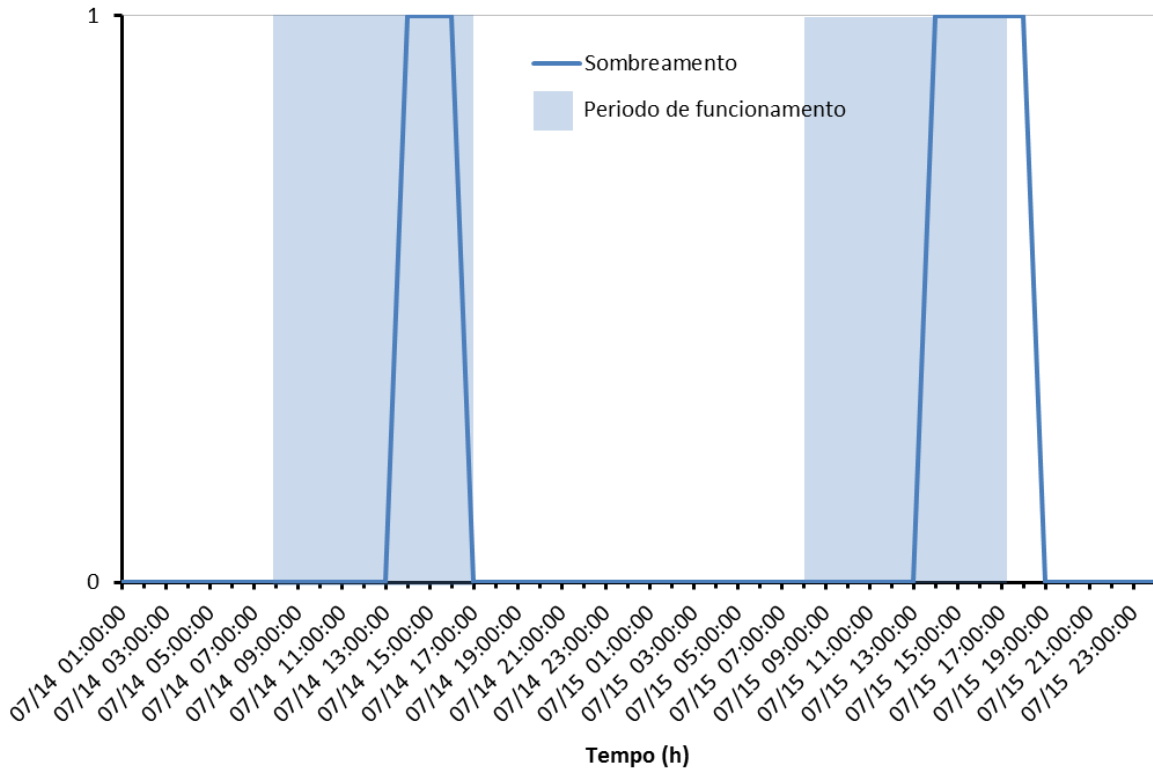


Figura 26 - Períodos de tempo em que os dispositivos de sombreamento estão ativados (durante 2 dias), exemplo para os vãos envidraçados da zona 11

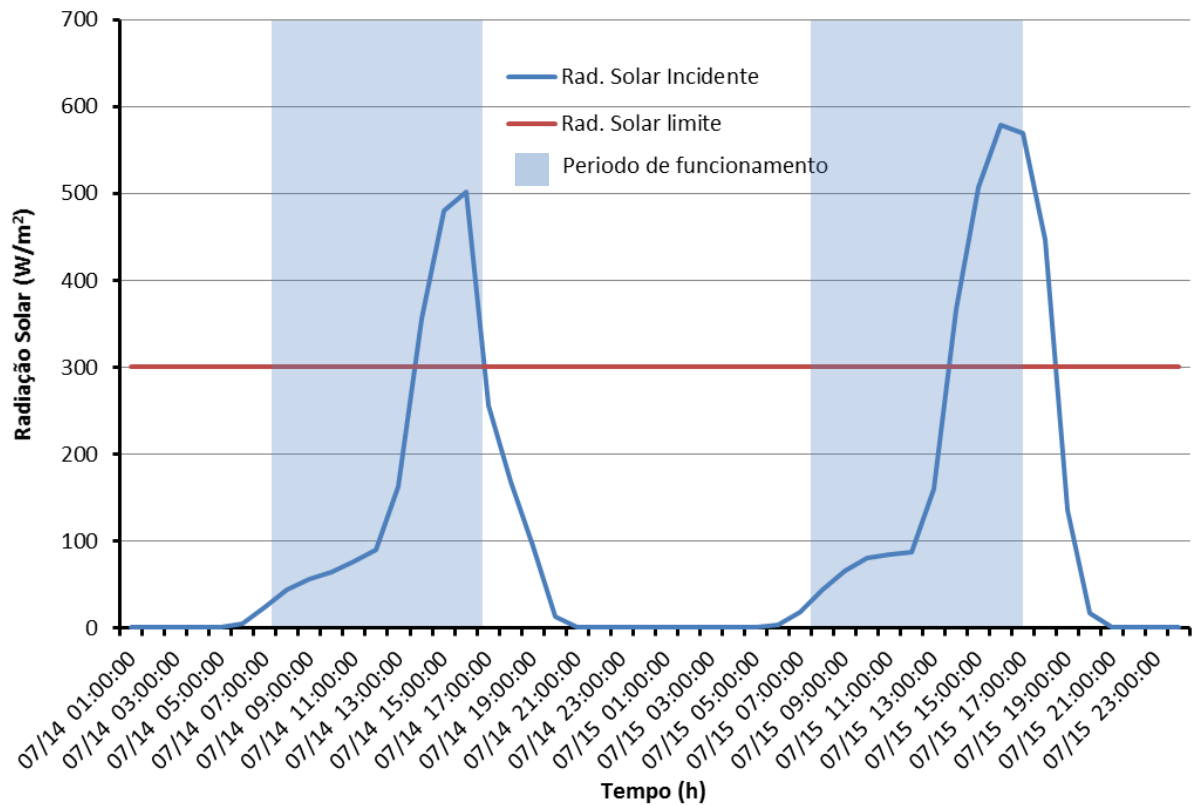


Figura 27 - Radiação solar incidente e radiação solar limite para a ativação dos estores para 2 dias, exemplo para os vãos envidraçados da zona 11

É visível nestes gráficos que efetivamente os estores apresentam um correto funcionamento, respeitando em simultâneo o horário estabelecido e o nível de radiação solar limite imposto.

4.2.9. Temperatura do Solo

A temperatura do solo ao longo dos vários meses da estação de aquecimento e de arrefecimento é bastante importante, pois vai ditar as trocas de calor entre a laje do piso térreo e o solo, influenciando assim os ganhos e as perdas de calor do edifício todo. Como tal, a correta avaliação desta temperatura irá conduzir a um modelo mais preciso.

Para obter a correta temperatura do solo nos diferentes meses do ano recorreu-se a um programa complementar do *EnergyPlus*, o *slab*. Este programa permite simular as variações de temperatura no solo com base no tipo de solo presente, tipo de laje e área de laje em contacto com o solo, recorrendo ao ficheiro climático do local. Na Figura 28 apresenta-se a modelação efetuada no *slab*. Os resultados obtidos no *slab* foram depois introduzidos no *EnergyPlus*.

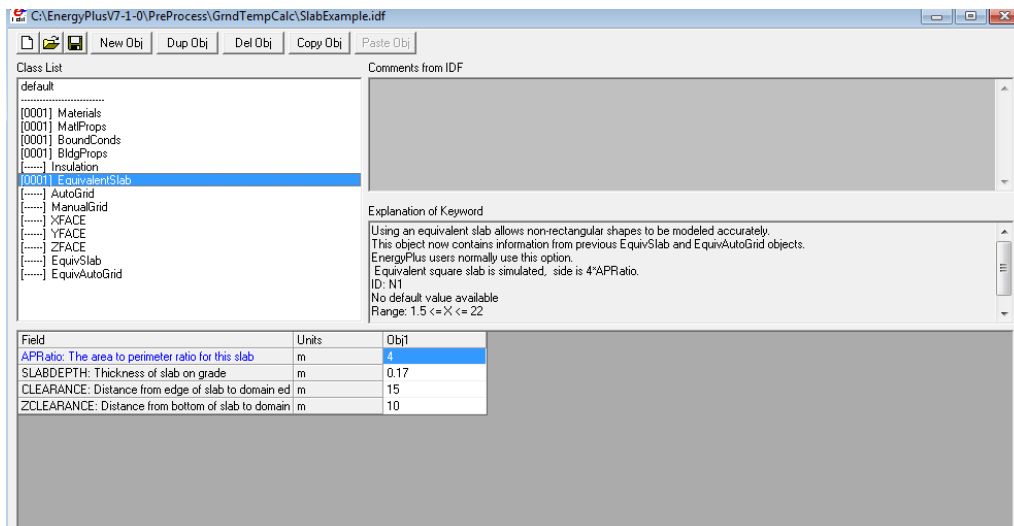


Figura 28 - Modelo no Slab

Na Tabela 9 apresenta-se as temperaturas médias do solo obtidas para os diferentes meses do ano.

Tabela 9 - Temperaturas médias do solo para os diferentes meses do ano

Temperatura do Solo °C	
Janeiro	17,04
Fevereiro	16,77
Março	16,77
Abril	18,27
Maiο	18,68
Junho	18,91
Julho	20,38
Agosto	20,48
Setembro	20,54
Outubro	20,57
Novembro	19,02
Dezembro	18,58

4.2.10. Ganhos internos

Para o cálculo dos ganhos internos são contabilizadas todas as fontes de energia térmica que se encontram dentro de uma determinada zona térmica. Estes ganhos internos compreendem as pessoas que habitam as zonas térmicas em questão, os equipamentos de iluminação e outros equipamentos elétricos, como computadores, impressoras, etc. Para cada zona térmica estimou-se estes ganhos com base no número de pessoas, luzes e equipamentos presentes. O tipo de luzes mais comum nos gabinetes e corredores é o que se apresenta na Figura 29.



Figura 29- Iluminação presente no edifício de comando

Uma vez que se tornou difícil confirmar as características de todos os dispositivos de iluminação existentes, optou-se por adotar um valor conservativo tipificado pelo candeeiro mostrado na Figura 29. Para este tipo de candeeiros foi considerado uma potência das lâmpadas de 75 W (*Lighting level*), em todas as zonas térmicas constituintes do modelo.

Relativamente ao funcionamento de equipamentos nos diferentes gabinetes, como se pode observar na Figura 30, a sua consideração é pouco relevante.

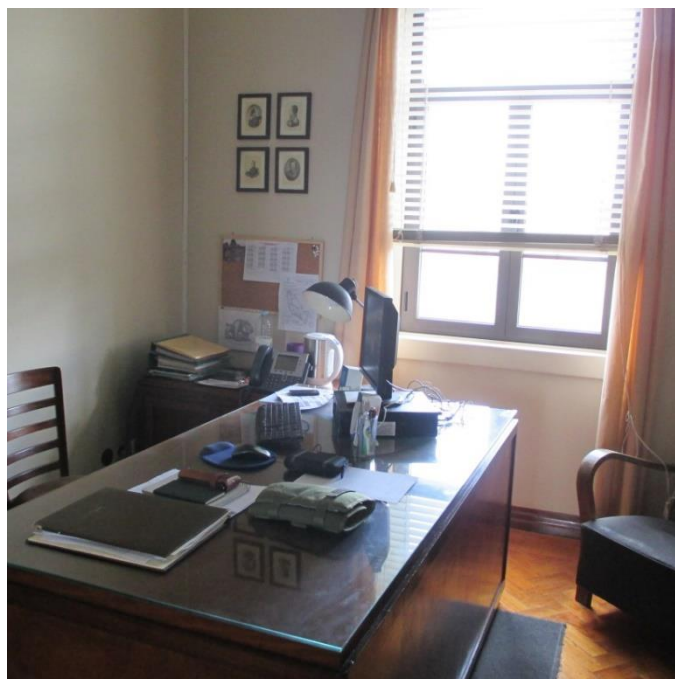


Figura 30 - Equipamento tipo nos gabinetes

Ainda assim, foi considerado um computador com uma potência de 125 W e uma impressora com uma potência de 150 W. Em função das características de utilização e ocupação de cada zona térmica, a distribuição destes equipamentos foi a que se apresenta na Tabela 10.

Tabela 10 - Quantidade de equipamentos em cada zona térmica

Zona	Computador	Impressora
1	1	0
3	1	1
4	1	1
5	1	1
8	1	1
9	1	1
11	1	1
12	1	1
13	1	1
14	2	2

Por fim, os ganhos térmicos devidos à atividade humana foram contabilizados com base no número de pessoas em cada zona térmica, tendo-se admitido que nos corredores o número de ocupantes é zero, uma vez que a utilização destes espaços é apenas momentânea e somente para efetuar a passagem de um gabinete para outro. Na Tabela 11 apresenta-se o número de pessoas em cada zona térmica.

Tabela 11 - Número de pessoas em cada zona térmica

Zona	Nº de ocupantes
1	1
2	0
3	2
4	1
5	1
6	0
7	1
8	1
9	1
10	0
11	2
12	2
13	2
14	4

4.2.11. Controlo de luminosidade

A função *Daylight Control* (Controlo de luminosidade) permite que se coloquem sensores em determinados pontos dentro de cada zona térmica, nos quais é possível definir o nível de luminosidade mínima (iluminância) abaixo do qual as luzes são ligadas. Este nível de luminosidade deverá também ser adequado ao trabalho de escritório.

O *EnergyPlus* permite a colocação de dois sensores de luminosidade em cada zona, no entanto por uma questão de simplicidade apenas se colocou um sensor em cada zona térmica. Para que seja possível que os sensores recebam a iluminância solar de forma adequada, estes foram colocados a um metro do chão em todas as zonas, sensivelmente ao nível de uma secretária de trabalho. Na Figura 31 apresenta-se um exemplo de um sensor de luminosidade.

Os sensores de luminosidade foram colocados em todas zonas térmicas com exceção dos corredores. O nível de iluminância que ativa os sensores e desliga as luzes foi estabelecido como 500 lux. O valor de 500 lux é considerado um valor de referência para o trabalho de escritório, de acordo com a norma alemã DIN 5035, que estabelece os níveis de iluminação com recurso a luz artificial [14].

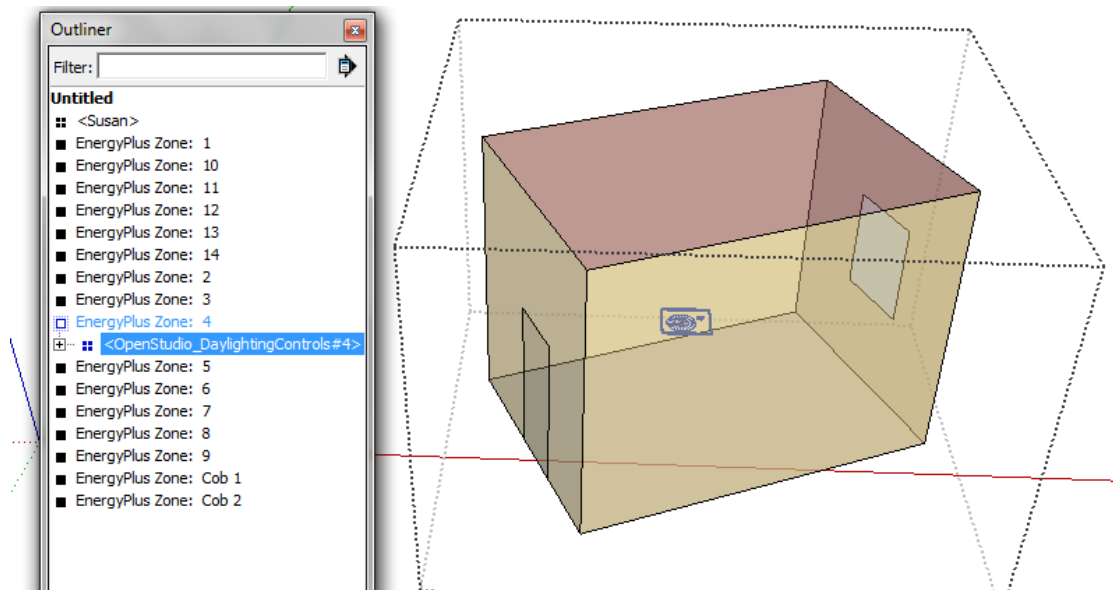


Figura 31 - Exemplo de sensor *Daylight Control*, na zona térmica 4

É também importante referir que as luzes apenas são ligadas ou desligadas quando tal é permitido pelo horário de funcionamento das luzes (*Office Light Schedule*). As especificações deste horário são prioritárias sobre os sensores de luminosidade, sendo que quando o horário determina que as luzes se encontram apagadas, elas desligam-se independentemente da existência de luminosidade insuficiente. Em seguida mostram-se dois gráficos (Figura 32 e Figura 33) que evidenciam o comportamento dos sensores de luminosidade ao longo de dois dias.

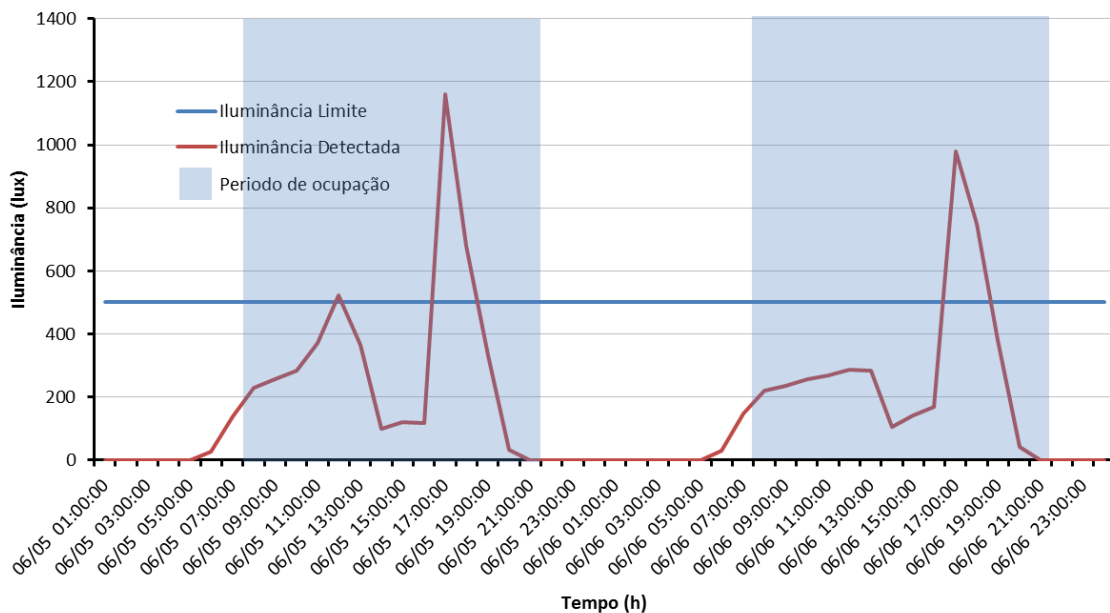


Figura 32 - Nível de luminosidade captado pelos sensores ao longo de dois dias

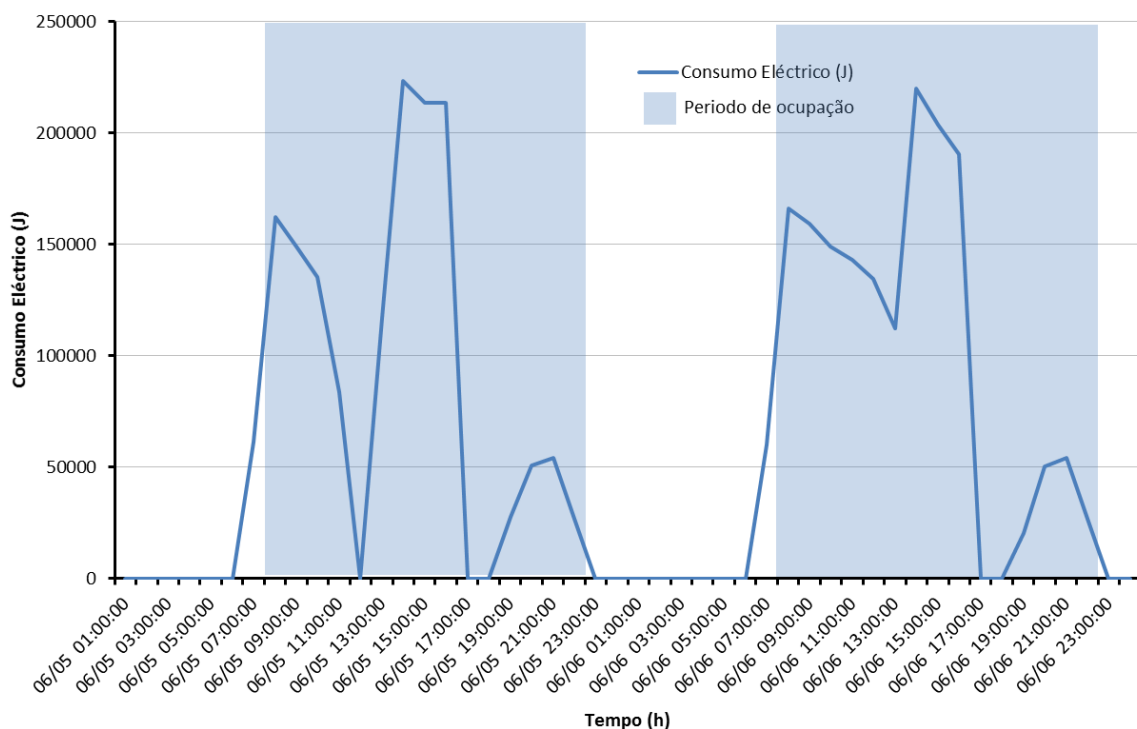


Figura 33 - Períodos em que as luzes estão ligadas ao longo de dois dias

Como é possível verificar na Figura 32 e na Figura 33, quando o nível de iluminação ultrapassa o valor de 500 lux as luzes desligam-se, dando lugar a iluminação natural. Isto é particularmente observável entre as 12 e as 13 horas do dia 5 de Junho. As luzes apagam-se também nos períodos noturnos a partir das 23 horas, hora a partir da qual se admite que não existe qualquer atividade nos gabinetes.

4.2.12. Infiltrações de ar

As infiltrações de ar podem ocorrer por diferentes vias, nomeadamente através de juntas de construção, frestas de janelas, de portas, etc. Estas infiltrações afetam as perdas e ganhos térmicos de uma determinada zona, e são difíceis de estimar, uma vez que este caudal de ar é incerto e depende de variados fatores, não só relacionados com o clima, como também com as características de permeabilidade da envolvente.

Por uma questão de simplicidade o caudal infiltrado foi estimado em renovações por hora de acordo com a metodologia expedita da anterior regulamentação térmica, o RCCTE [5]. Considerando uma classe de rugosidade do terreno correspondente a uma área urbana e considerando que a caixilharia do edifício em questão não se encontra classificada, obtém-se o valor de 0,9 renovações por hora. Este valor de renovações por hora foi adotado para todas as zonas térmicas, com exceção da cobertura.

Quanto à cobertura, as suas características construtivas permitem antever um espaço francamente ventilado, em que a sua temperatura se deve aproximar da que se verifica no exterior. Para avaliar o caudal de ar que induz este tipo de comportamento, foi efetuado com o *EnergyPlus* o estudo da variação da temperatura no desvão da cobertura em função do número de renovações por

hora imposto, tanto para a estação de aquecimento como para a estação de arrefecimento. Os resultados desse mesmo estudo são visíveis na Figura 34 e na Figura 35.

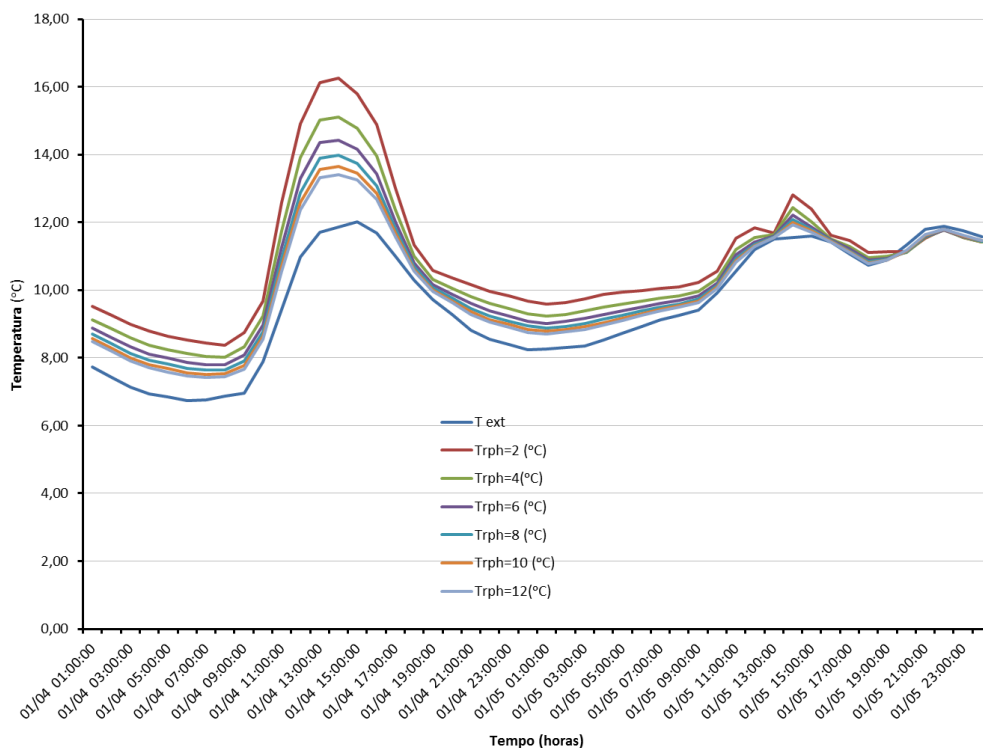


Figura 34 - Temperaturas para a estação de aquecimento

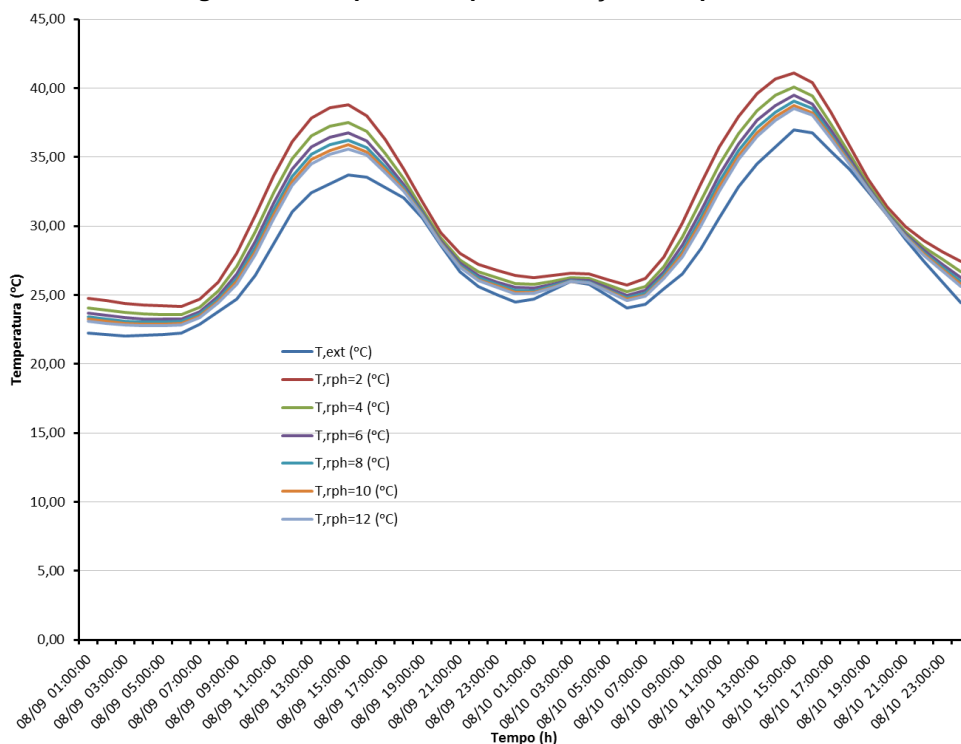


Figura 35 - Temperaturas para a estação de arrefecimento

Como é possível observar a partir dos gráficos da Figura 34 e da Figura 35, tanto na estação de aquecimento como de arrefecimento, verifica-se que a evolução da temperatura no espaço da cobertura tem um comportamento assintótico com o número de renovações por hora, tendendo para

a temperatura exterior à medida que este parâmetro aumenta. Em face dos resultados observados, optou-se por assumir o valor de 8 renovações por hora uma vez que para este valor a temperatura do desvão da cobertura já é suficientemente próxima da temperatura exterior, e o aumento das renovações por hora já não produz grandes alterações na temperatura.

4.2.13. Termostato

Para que o *EnergyPlus* consiga estimar as necessidades de aquecimento e arrefecimento de uma zona térmica é necessário fornecer-lhe os *Setpoints*, que são as temperaturas consideradas de conforto que devem ser mantidas, para a estação de aquecimento e para a estação de arrefecimento. Quando a temperatura da zona térmica se encontra abaixo do *Setpoint* de aquecimento é necessário fornecer energia para manter esse mesmo *Setpoint*. Situação equivalente acontece relativamente ao *Setpoint* de arrefecimento, em que deve ser fornecida energia para arrefecer a temperatura da zona térmica sempre que esta temperatura excede este *Setpoint*.

As temperaturas consideradas neste estudo para os *Setpoints*, são 20°C para o *Setpoint* de aquecimento e 25°C para o *Setpoint* de arrefecimento. Na modelação do *EnergyPlus*, definiram-se também horários para o funcionamento destes termóstatos, tanto para a estação de aquecimento como para a de arrefecimento. Assim, no período de utilização normal dos gabinetes devem ser mantidas as temperaturas de conforto referidas para a estação de aquecimento (*Heating Setpoint Schedule*) e para a estação de arrefecimento (*Cooling Setpoint Schedule*), sendo que fora desses períodos são permitidas temperaturas maiores no Verão e menores no Inverno, uma vez que quando o edifício não se encontra ocupado não é necessário manter temperaturas ambiente tão rigorosas.

CAPÍTULO V

5. Análise dos resultados para o Edifício original

Antes de se conceber qualquer solução de reabilitação térmica importa primeiro analisar o edifício nas suas condições atuais. Primeiramente analisou-se os coeficientes de transmissão térmica dos diferentes elementos construtivos do edifício, uma vez que estes são bons indicadores do seu desempenho térmico. Após esta análise procurou-se determinar, para algumas zonas térmicas representativas, quais os elementos com as maiores perdas de calor.

5.1. Coeficientes de transmissão térmica

Na presente dissertação não se pretende, como já antes referido, efetuar um estudo fundamentado na regulamentação vigente - Regulamento de Desempenho energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) - que impõe limites para um indicador de eficiência energética com base em métodos de avaliação padronizados e onde os equipamentos desempenham um papel fulcral. Neste trabalho procurou-se, antes, efetuar uma avaliação dirigida para a reabilitação térmica de determinados elementos da envolvente, com base numa metodologia de minimização de custos, que utilizou o programa *EnergyPlus* para a estimação das necessidades energéticas, mas sem enfoque especial nos sistemas de climatização e correspondente distribuição de energia. Apesar de não ter sido aplicada a metodologia de verificação regulamentar, em alguns casos a regulamentação foi utilizada para efetuar algumas verificações expeditas. Um dos parâmetros que permite, de alguma forma, avaliar a adequação de um edifício às exigências regulamentares, é o valor do coeficiente de transmissão térmica dos seus elementos construtivos [7].

Tendo sido definidos todos os materiais constituintes dos diferentes elementos construtivos do edifício de comando, é possível calcular os respetivos coeficientes de transmissão térmica (U), que se mostram na Tabela 12.

Tabela 12 - Condutâncias térmicas e coeficientes de transmissão térmica dos diferentes elementos construtivos do edifício de comando do Regimento de Artilharia nº4

Elementos	K_p (W/m ² .K)	U (W/m ² .K)
Parede exterior 600 mm	1,83	1,39
Parede exterior 500 mm	2,19	1,60
Parede exterior 400 mm	2,73	1,87
Parede interior 250 mm	1,61	1,26
Parede interior 150 mm	1,59	1,25
Pavimento intermédio	6,68	3,45
Tecto do último piso	7,44	3,65
Pavimento térreo	7,72	2,95

Os coeficientes de transmissão térmica aqui apresentados foram calculados com base nas condutâncias térmicas dos diversos elementos construtivos (K_p) e com base nos seguintes valores de resistência térmica superficial interior e exterior que se mostram na Tabela 13.

Tabela 13 - Resistências térmicas superficiais

Fluxo		Resistência térmica Superficial ($m^2.K/W$)	
		Exterior (R_{se})	Interior (R_{si})
Horizontal		0.04	0.13
Vertical	Ascendente	0.04	0.1
	Descendente	0.04	0.17

No que toca aos coeficientes de transmissão térmica, o RECS apresenta limites máximos que não devem ser ultrapassados pelos elementos da envolvente opaca exterior [7]. Na Tabela 14 apresenta-se os valores máximos para o coeficiente de transmissão térmica de elementos opacos verticais e horizontais deste regulamento.

Tabela 14 - Coeficientes de transmissão térmica máximos admissíveis para a envolvente opaca exterior de edifícios de comércio e serviços [$W/m^2.°C$] [7]

Elemento em zona corrente da envolvente	Zona climática		
	I1	I2	I3
Elemento opaco vertical	1,75	1,60	1,45
Elemento opaco horizontal	1,25	1,00	0,90

Sendo que o edifício de comando do RA4, situando-se em Leira, cuja altitude média é de 113 metros, pertencente à zona climática I1 ($GD \leq 1300$) de acordo com a nova regulamentação em vigor [13], o coeficiente de transmissão térmica máximo admissível, no caso de elementos verticais é de 1,75 $W/m^2.°C$, e no caso de elementos horizontais é de 1,25 $W/m^2.°C$. Como se pode verificar pelos coeficientes transmissão térmica dos elementos do edifício, a parede exterior de 400 mm não cumpre o limite máximo admissível, nem qualquer dos elementos horizontais cumpre o máximo valor permitido para o seu coeficiente de transmissão térmica.

5.2. Perdas de calor

À partida existem no edifício em estudo elementos de que se espera que tenham mais perdas térmicas que outros. As paredes exteriores, a cobertura e o pavimento em contacto com o exterior são exemplos de elementos dos quais se esperam grandes perdas térmicas. Com o objetivo de aferir se efetivamente as maiores perdas térmicas se verificam através destes elementos, e qual a percentagem de perdas que apresentam em relação ao total da zona térmica, procedeu-se à contabilização das perdas que ocorrem em cada elemento para algumas zonas térmicas selecionadas. As perdas totais aqui referidas correspondem às perdas que se verificam através de toda a envolvente opaca e translúcida.

No rés-do-chão, as zonas térmicas selecionadas para efetuar esta análise foram as zonas 1 e 12, uma vez que são zonas com dimensões diferentes e permitem obter informação importante sobre o nível de perdas através dos elementos em contacto com o solo. No 1º andar selecionou-se as zonas térmicas 4 e 14, devido também ao facto destas terem dimensões consideravelmente diferentes, e porque ambas possuem um teto que se encontra em contacto com a zona da cobertura. Analisou-se

também a zona térmica 11, uma vez que esta tem o pavimento em contacto direto com o ambiente exterior e apresenta uma área envidraçada elevada.

A análise da transmissão de calor pelos diferentes elementos incidiu apenas sobre as perdas térmicas, que são mais condicionantes para as necessidades energéticas, e portanto foi apenas efetuada para a estação de aquecimento.

5.2.1. Rés-do-chão

As duas zonas do rés-do-chão apresentam ambas duas paredes exteriores e duas paredes interiores. Ambas as zonas encontram-se em contacto com o solo, cuja temperatura pode diferir bastante da temperatura do ar interior.

Na Figura 36 apresenta-se a percentagem de perdas, relativamente ao total da zona térmica, que fica associada a cada um dos elementos da zona térmica 1.

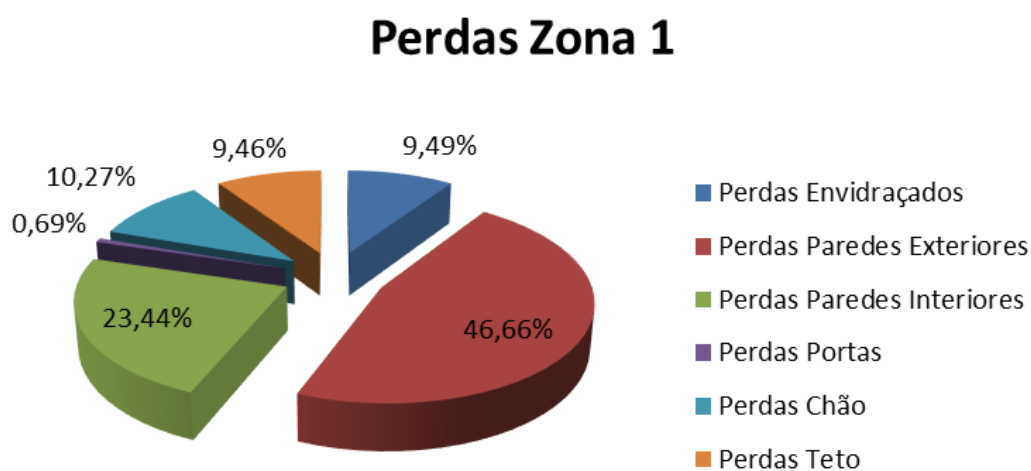


Figura 36 - Percentagem de perdas, da zona 1, que ocorrem por diferentes elementos

Como é visível através da Figura 36, para esta zona a maioria das perdas processa-se através das paredes exteriores. Ao contrário do que seria de esperar, as paredes interiores (paredes de separação entre zonas térmicas) no presente caso também possuem uma percentagem significativa de perdas térmicas. O facto das perdas pelas paredes interiores serem significativas deve-se também à área que apresentam comparativamente a outros elementos.

Para a zona térmica 12 os resultados obtidos vão mais ao encontro do que à partida seria de esperar, como é observável no gráfico da Figura 37. Esta zona térmica possui uma área de pavimento elevada e paredes divisórias interiores que foram modeladas com recurso à função *internal mass*.

Perdas Zona 12

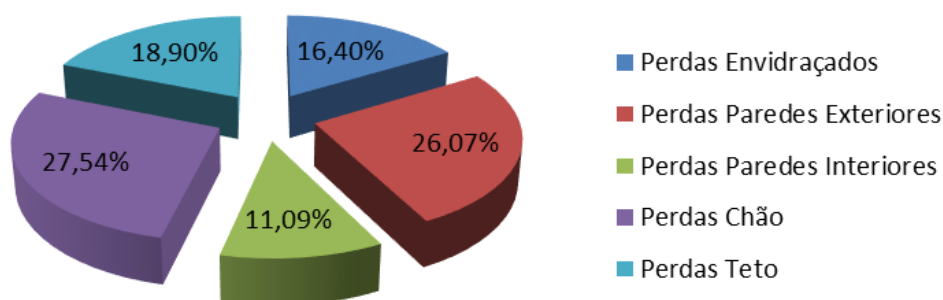


Figura 37 - Percentagem de perdas, da zona 12, que ocorrem por diferentes elementos

É visível na Figura 37 que para esta zona térmica as maiores perdas ocorrem para as paredes exteriores e para o pavimento em contacto com solo. Neste caso os elementos com menores perdas são as paredes da envolvente interior. É portanto visível que os elementos que preferencialmente devem ser isolados são as paredes exteriores e o pavimento em contacto com solo.

5.2.2. 1ºAndar

As três zonas analisadas deste piso encontram-se em contacto com a cobertura através do teto, no entanto a zona 4 apenas possui uma parede em contacto com o exterior, enquanto a zona 14 tem 3 das suas 4 paredes em contacto com o exterior. A zona 11 tem a particularidade de ter uma grande área de envidraçados e possuir um pavimento em contacto com o exterior. Na Figura 38 apresentam-se as perdas relativas à zona 4.

Perdas Zona 4

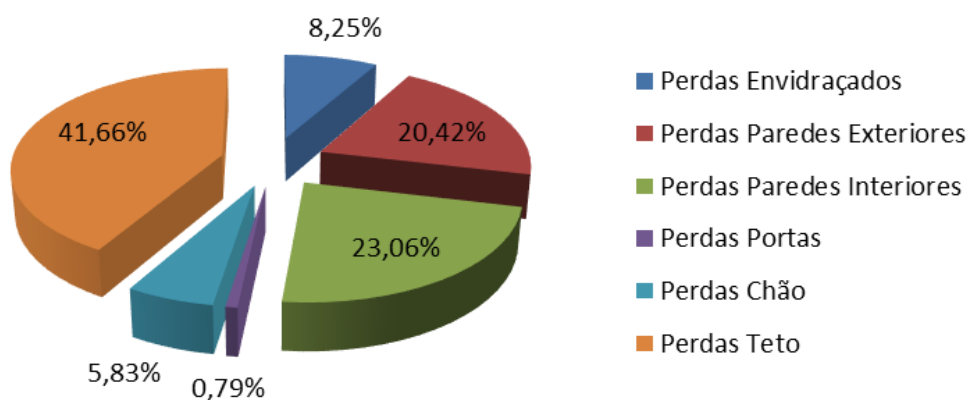


Figura 38 - Percentagem de perdas, da zona 4, que ocorrem por diferentes elementos

Como se observa na Figura 38, as maiores perdas ocorrem pelo teto, como seria de esperar, e as paredes exteriores e interiores apresentam níveis muito parecidos de perdas, devendo-se isto ao facto de, apesar da temperatura exterior originar à partida um volume de perdas maior que a temperatura dos espaços interiores adjacentes, a área de parede exterior é bastante inferior à área de parede interior, o que contrabalança os efeitos. Quanto aos envidraçados, pavimento do piso intermédio e portas, as percentagens de perdas são baixas. Seguidamente apresentam-se as perdas relativas à zona 14 (Figura 39).

Perdas Zona 14

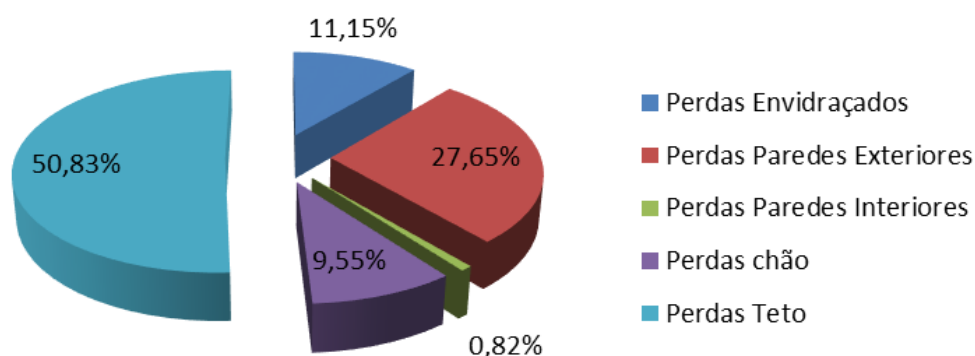


Figura 39 - Percentagem de perdas, da zona 14, que ocorrem por diferentes elementos

Para a zona 14 indubitavelmente as maiores perdas ocorrem através do teto, mas também as perdas pelas paredes exteriores ocupam uma parcela importante no total de perdas térmicas desta zona. O pavimento, os envidraçados e as paredes interiores, têm pouca importância neste caso.

Finalmente analisam-se as perdas da zona 11 (Figura 40), que é uma zona particularmente interessante, uma vez que contém muitos elementos propícios a grandes perdas de calor.

Perdas Zona 11

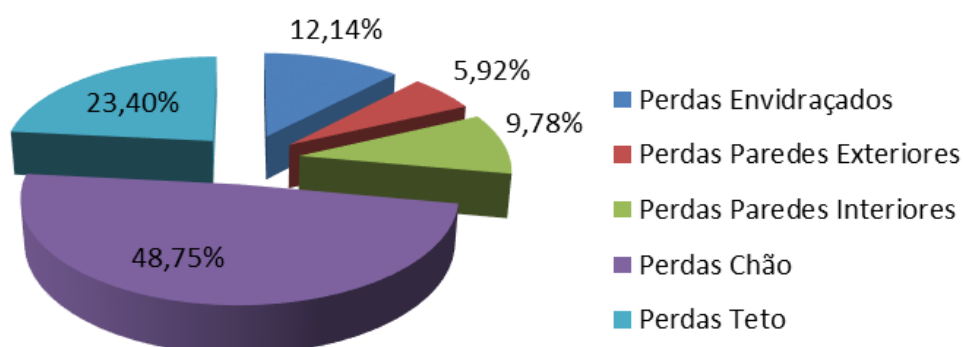


Figura 40 - Percentagem de perdas, da zona 11, que ocorrem por diferentes elementos

Como seria de esperar o pavimento em contacto com o exterior é responsável pela grande maioria das perdas térmicas desta zona. Os envidraçados têm também aqui uma grande preponderância, devido ao facto de ser grande a área dos mesmos e devido ao facto de até as portas desta zona, que estão voltadas para o interior do edifício, serem de vidro.

A partir dos resultados da análise efetuada, decidiu-se proceder à reabilitação térmica, por reforço do nível de isolamento, das lajes dos tetos em contacto com a cobertura, dos pavimentos em contacto com o solo e em contacto com o ambiente exterior, e finalmente, de todas as paredes exteriores. No capítulo 7 proceder-se-á à determinação das espessuras de isolamento a adotar em cada um destes elementos. No próximo capítulo descreve-se o tipo de isolamento adotado para cada um destes elementos e respetiva forma de aplicação.

CAPÍTULO VI

6. Soluções de Reabilitação Térmica

No que toca ao isolamento térmico da envolvente opaca do edifício, o ideal seria a sua aplicação em todos os elementos da mesma. A substituição dos envidraçados e caixilharias existentes por outras soluções com melhores características térmicas e de estanquidade ao ar também seria vantajosa, no entanto optou-se por não proceder a alterações nestes elementos, tendo em conta que a solução existente já constitui uma medida de melhoria relativamente à solução original e, também, pelo facto da sua preponderância nas perdas térmicas, na maior parte dos casos não ser muito significativa. Para se efetuar uma reabilitação térmica eficiente, procurando minimizar os gastos monetários, são os elementos com perdas térmicas mais críticas que devem sobretudo ser alvo de reforço térmico, os quais foram já identificados no capítulo anterior. Assim, optou-se por isolar termicamente o pavimento térreo, o teto das zonas em contacto com a cobertura, as paredes exteriores e o pavimento exposto às condições exteriores. Seguidamente apresentam-se as soluções de reabilitação adotada para os diferentes elementos.

6.1. Isolamento térmico de paredes

O isolamento térmico das paredes é colocado pelo exterior recorrendo-se a um sistema do tipo *External Thermal Insulation Composite Systems* (ETICS) [15]. Este género de sistemas tem a vantagem de não implicar a demolição parcial de paredes, sendo que são bastante adequados para situações de reabilitação. Os maiores problemas associados a soluções do tipo ETICS dizem respeito à resolução dos pormenores das fachadas, como elementos decorativos, panos de peito, enquadramento dos vãos de janelas, portas, etc. No entanto, no edifício em questão, as fachadas têm uma geometria bastante regular, pelo que não são esperadas dificuldades na aplicação do sistema. Outro problema é o facto de os sistemas ETICS serem sensíveis a impactos, ou seja, a sua resistência mecânica é baixa, o que os torna particularmente vulneráveis a ações de vandalismo. Numa unidade militar, no entanto, não se espera que o edifício de comando, ou qualquer outro edifício, venha a sofrer danos deste tipo. Os sistemas ETICS são constituídos por uma sobreposição de diversas camadas de materiais, desde a camada de fixação ao suporte até à camada de acabamento exterior, cada uma com a sua função particular no sistema. Uma das camadas é o isolamento térmico, que pode ser de vários tipos, como Lã-de-Rocha, Poliestireno Expandido (EPS), Polistireno Extrudido (XPS), Cortiça, etc. No presente estudo optou-se por adotar Lã-de-Rocha nas paredes. Um exemplo da solução adotada pode ser visto na Figura 41.

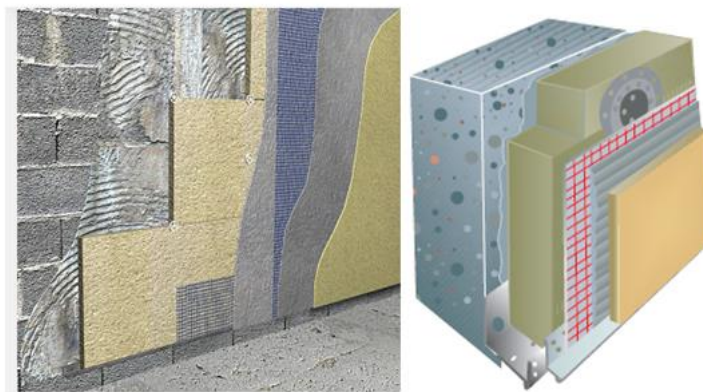


Figura 41 - Exemplo de sistema ETICS à base de lâ-de-rocha [16]

Como é visível na Figura 41 os sistemas ETICS são compostos por diversas camadas, no entanto, por uma questão de simplicidade apenas se considerou para a simulação a camada de isolamento em lâ-de-rocha e a argamassa de revestimento, uma vez que são estas que intervêm maioritariamente no comportamento térmico. Apresenta-se na Tabela 15 as principais propriedades físicas da lâ-de rocha que foram utilizadas na simulação com o *EnergyPlus*.

Tabela 15 - Características térmicas associadas à lâ-de-rocha

Lã de Rocha		
ρ (kg/m ³)	100	
λ (W/m.K)	0,04	
C (J/kg.°C)	735	

6.2. Isolamento térmico da cobertura

No que toca ao isolamento térmico da cobertura, este pode ser colocado ao longo das vertentes ou sobre o pavimento do desvão. Como no edifício de comando este espaço não se encontra ocupado e se assumiu atrás que é francamente ventilado, optou-se pela segunda solução, que foi a de colocar o isolamento sobre o teto do segundo piso. Na Figura 42 apresenta-se um exemplo desta forma de colocação do isolamento.

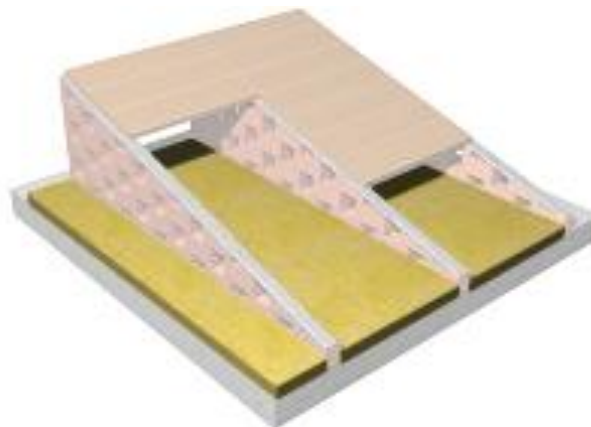



Figura 42 – Exemplo de isolamento adotado para a cobertura [16]

O tipo de isolamento adotado para a cobertura foi EPS (Poliestireno Expandido), dada a simplicidade da sua aplicação na forma de painéis rígidos e do custo reduzido que está associado a este sistema. Na Tabela 16 apresentam-se as características físicas deste material que foram utilizadas na simulação com o *EnergyPlus*.

Tabela 16 - Características térmicas associadas ao EPS

EPS		
ρ (kg/m ³)	15	
λ (W/m.K)	0,042	
C (J/kg.°C)	1550	

6.3. Isolamento térmico do pavimento do piso térreo

Idealmente o pavimento térreo deveria ser isolado pelo exterior para que a sua massa térmica pudesse ser integralmente aproveitada em benefício das condições térmicas do espaço adjacente. No entanto, tratando-se aqui de uma situação de reabilitação, isso obrigaria a demolir a laje do piso térreo, o que naturalmente não é viável. Como tal, optou-se neste caso por proceder ao isolamento do piso térreo por aplicação do material sobre o pavimento. Para que esta solução seja aplicável há que garantir que o isolamento tem resistência mecânica suficiente para suportar o peso dos ocupantes e outras sobrecargas. A lã de rocha não possui resistência mecânica suficiente, pelo que se recorreu ao XPS (Poliestireno Extrudido), que apresenta uma resistência mínima á compressão de 200 KPa [17], adequada para o fim que se pretende. Na Figura 43 apresenta-se um exemplo de isolamento com recurso a XPS.




Figura 43 - Exemplo de isolamento interior do piso [18]

As propriedades físicas do XPS importantes para o seu desempenho térmico são semelhantes às do EPS, apresentando-se na Tabela 17 os dados que foram introduzidos no *EnergyPlus* para a simulação do caso de estudo.

Tabela 17 - Características térmicas associadas ao XPS

XPS	
ρ (kg/m ³)	33
λ (W/m.K)	0,037
C (J/kg.°C)	1550



6.4. Isolamento do pavimento em contacto com o exterior

Para este pavimento optou-se por proceder ao isolamento pelo exterior, uma vez que é bastante mais simples aplicá-lo desta forma, por não interromper o normal funcionamento do edifício, e porque assim, também, a massa térmica interior, importante para a regulação das condições térmicas interiores, mantém-se ativa. O isolamento é colocado em painéis fixados por meios mecânicos á parte de baixo do pavimento em questão. Na Figura 44 apresenta-se um exemplo deste tipo de isolamento. No presente caso optou-se pela aplicação de painéis de lâ-de-rocha.



Figura 44 - Exemplo de isolamento sob a laje [16]

CAPÍTULO VII

7. Determinação da espessura ótima

Primeiramente apresenta-se a metodologia adotada para a determinação da espessura ótima, seguindo-se posteriormente o cálculo desta espessura para o isolamento das paredes exteriores, da laje do último piso, laje do pavimento térreo e laje do pavimento em contacto com o exterior.

7.1. Metodologia adotada para a determinação da espessura ótima

Para a determinação da espessura ótima é necessário entrar em conta com o custo do isolamento e com os custos associados aos gastos energéticos do edifício durante um determinado horizonte de projeto (em anos):

$$C(x, n) = C_{iso}(x) + F(n) \cdot C_{ene} \cdot \frac{N(x)}{\eta} \quad (8.1)$$

em que:

$C_{iso}(x)$ – Custo de instalação do isolamento no elemento em estudo em função da espessura x (€);

$F(n)$ – Fator de atualização de custos, incluindo ou não a inflação, em função do número de anos do horizonte de projeto n (ano);

C_{ene} – Custo unitário do tipo de energia utilizada reportado ao ano de investimento (€/kW.h);

$N(x)$ – Necessidades energéticas da zona térmica associadas ao elemento em estudo em função da espessura x (kWh/ano);

η – Rendimento do equipamento fornecedor de energia;

x – Espessura do isolamento (cm);

n – Número de anos do horizonte de projeto.

O custo associado à reabilitação de um determinado elemento construtivo possui duas parcelas, uma associada ao custo da mão-de-obra e outra associada ao custo do material em si. O montante despendido com o material é tanto maior quanto maior for a espessura de isolamento aplicada. Desta forma, o custo do isolamento pode ser descrito por uma função do tipo:

$$C_{iso}(x) = \alpha x + \beta \quad (8.2)$$

Os parâmetros a e b devem ser calibrados em função do tipo de isolamento. Os seus valores dependem da mão-de-obra e da quantidade de material. Se o custo do material isolante e da sua aplicação forem conhecidos para várias espessuras, é possível traçar uma linha de tendência e assim determinar os parâmetros a e b e, portanto, a equação da função custo pretendida (Figura 45).

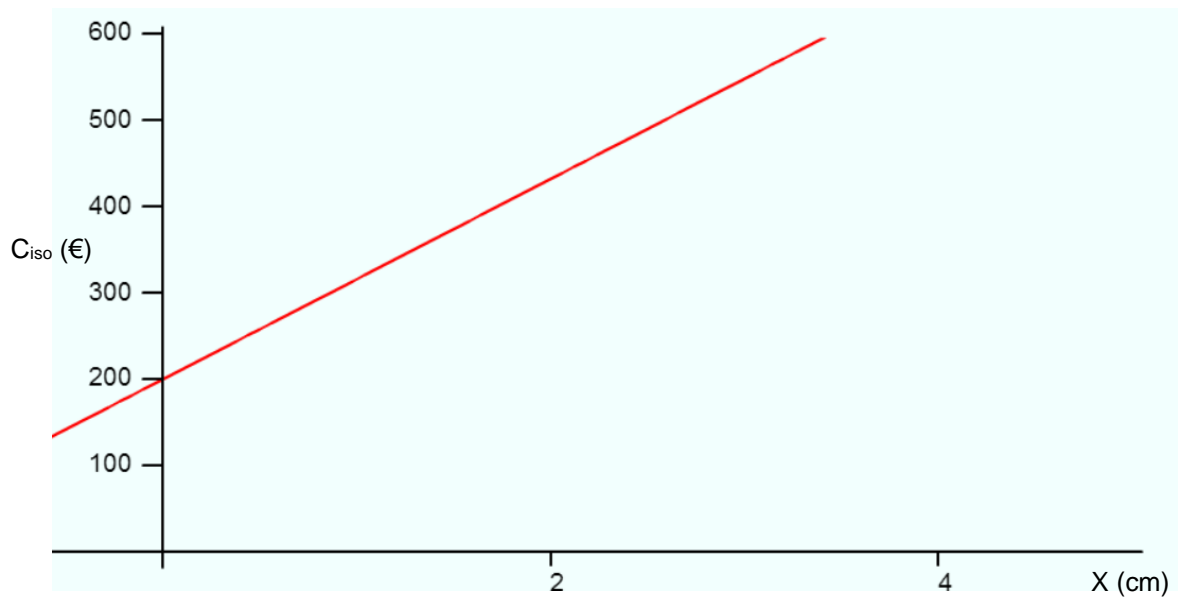


Figura 45 - Definição da função custo de isolamento ($C_{iso}(X)$)

A parcela das necessidades energéticas adstrita ao elemento em estudo, $N(x)$, é construída com base no programa *EnergyPlus*, em que para uma zona térmica escolhida, fazendo variar a espessura do isolamento desse elemento, é possível, por ajuste de uma curva aos diversos valores de necessidades obtidos, obter a respetiva função custo em função da espessura do material.

Na contabilização das necessidades energéticas optou-se por apenas entrar em conta com a parcela relativa ao aquecimento, determinada para a situação de Inverno (estação de aquecimento), uma vez que esta é a componente mais condicionante.

As necessidades energéticas terão que ser supridas por algum tipo de aparelho com capacidade de gerar calor. No presente caso considerou-se que o aparelho em questão seria elétrico. Os aparelhos elétricos de aquecimento apresentam um rendimento de 100% [19], ou seja, a energia fornecida ao aparelho coincide com a energia emitida para suprir as necessidades de aquecimento ($\eta=1$).

Na Figura 46 apresenta-se um exemplo de aparelho elétrico de aquecimento que pode ser utilizado nos gabinetes do edifício de comando.



Figura 46 - Exemplo de aparelho de aquecimento elétrico [20]

O programa apenas permite obter as necessidades energéticas totais de uma zona térmica, ou seja, não permite determinar qual a parcela dessas necessidades energéticas que corresponde ao elemento em questão. Para obter a parcela que se deve exclusivamente ao elemento em estudo há que subtrair às necessidades energéticas totais da zona térmica, as necessidades dessa mesma zona com o elemento em questão a funcionar como adiabático, ou seja, com o mesmo incluído na simulação sem participação nas trocas de calor entre ambientes. Com esta metodologia é portanto possível isolar as necessidades energéticas imputáveis ao elemento que se pretende estudar:

$$N(x) = N_{total,x} - N_{adiab} \quad (8.3)$$

em que:

$N(x)$ – Necessidades energéticas da zona térmica associadas ao elemento em estudo para uma determinada espessura de isolamento x ;

$N_{total,x}$ – Necessidades energéticas totais da zona térmica para uma espessura de isolamento x no elemento em estudo;

N_{adiab} – Necessidades totais da zona térmica com o elemento em estudo adiabático.

Para se constituir o N_{adiab} das paredes exteriores modelou-se um material com uma condutibilidade térmica anormalmente baixa, permitindo assim simular uma situação adiabática, uma vez que o *EnergyPlus* não permite estabelecer uma condição de fronteira adiabática para elementos com vão envidraçados. É também importante referir que a variação da espessura do isolamento foi

apenas feita para os elementos da zona térmica em estudo, ficando os elementos de outras zonas térmicas na forma original, sem isolamento.

Efetuada o cálculo com recurso ao *EnergyPlus*, obtém-se um conjunto de pontos que podem ser aproximados por uma função $N(x)$, correspondente às necessidades energéticas associadas ao elemento em análise, em função da espessura de isolamento. Esta função $N(x)$ pode ser uma função exponencial, uma função logarítmica ou mesmo um função potencial, devendo-se sempre adotar aquela que melhor se ajuste aos diferentes valores das necessidades obtidas. Na Figura 47 apresenta-se um exemplo dessa mesma função.

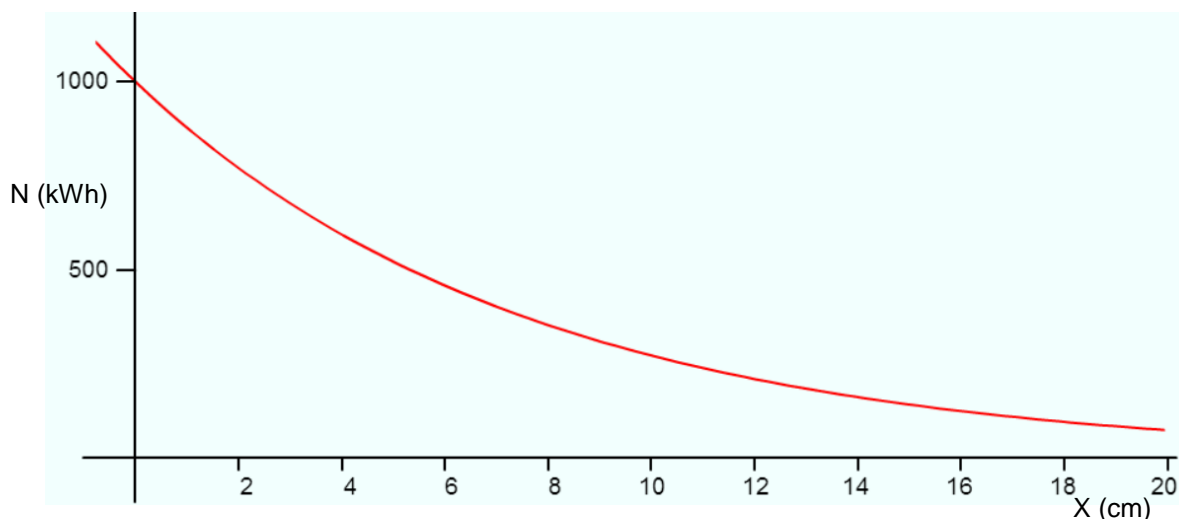


Figura 47 - Função $N(x)$, que descreve as necessidades energéticas em função da espessura de isolamento x

O custo anual associado às necessidades energéticas, que é função da forma de energia utilizada (gás, eletricidade, lenha, etc.) e das características do equipamento adotado, pode variar de ano para ano se for levada em conta a inflação de preços. Por outro lado, é sabido que uma quantia monetária no momento presente não tem o mesmo valor que essa mesma quantia no futuro. Por esta razão, a contabilização dos custos energéticos para um dado conjunto de anos só deve ser efetuada depois das parcelas correspondentes a cada um dos anos ser reportada, através de um fator de atualização, a uma data de referência, a qual, por comodidade, é geralmente tomada como o ano em que é realizado o investimento. Assim, considerando uma taxa de atualização a , que pode ser vista como a rendibilidade que o investidor exige para implementar dado projeto de investimento, a atualização para o ano de referência de um custo C , efetuado no ano seguinte, é obtida da forma que se indica:

$$C_0 = \frac{C}{(1 + a)} \quad (8.4)$$

Se o mesmo custo se estender a todo o horizonte de projeto, situação que acontece em caso de inexistência de inflação, o custo total, depois de atualizadas todas as parcelas, é obtido pelo somatório:

$$C_0^{Tot} = C \left(\frac{1}{1+a} + \frac{1}{(1+a)^2} + \frac{1}{(1+a)^3} + \dots + \frac{1}{(1+a)^n} \right) \quad (8.5)$$

que tem como resultado:

$$C_0^{Tot} = C \left(\frac{1 - (1+a)^{-n}}{a} \right) \quad (8.6)$$

Se for importante incluir o efeito da inflação, traduzido por uma taxa i , o somatório anterior pode escrever-se:

$$C_0^{Tot} = C \left(\frac{1}{1+a} + \frac{1+i}{(1+a)^2} + \frac{(1+i)^2}{(1+a)^3} + \dots + \frac{(1+i)^{n-1}}{(1+a)^n} \right) \quad (8.7)$$

ou, de uma forma condensada:

$$C_0^{Tot} = C \sum_{j=1}^n \frac{(1+i)^{j-1}}{(1+a)^j} \quad (8.8)$$

Aplicando estas considerações ao problema em causa, é fácil concluir que o fator $F(n)$ corresponde a um dos somatórios anteriores – Equações 8.8 e 8.6 -, consoante se considere ou não o efeito da inflação. Nesta análise será considerado o efeito da inflação, pelo que a função custo será:

$$C(x, n) = \alpha \cdot x + \beta + C_{ene} \cdot \frac{N(x)}{\eta} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{(1+i)^{j-1}}{(1+a)^j} \quad (8.9)$$

Uma vez completamente determinada a função custo com todas as suas parcelas, a espessura ótima para um dado horizonte de projeto, será aquela que minimiza a função, ou por outras palavras, que anula a função derivada:

$$\frac{\partial C(x, n)}{\partial x} = \alpha + \frac{dN(x)}{dx} \cdot \frac{C_{ene}}{\eta} \cdot \sum_{j=1}^n \frac{(1+i)^{j-1}}{(1+a)^j} \quad (8.10)$$

$$\frac{\partial C(x, n)}{\partial x} = 0 \Rightarrow x_{opt} \quad (8.11)$$

Na Figura 48 apresenta-se um exemplo de uma função custo $C(x, n)$, sendo que apenas os valores positivos de espessura são tidos em conta.

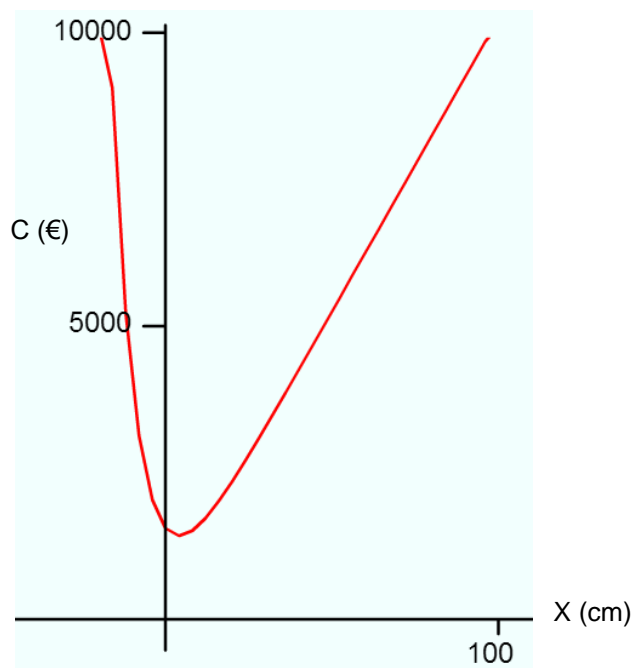


Figura 48 – Exemplo de traçado de uma função $C(x)$

No presente estudo foi utilizado um custo unitário da energia de 0,153 €/KWh, que corresponde à tarifa da EDP para uma instalação de potência superior a 2,3 KVA [21]. Quanto à taxa de inflação e taxa de atualização, adotaram-se respetivamente os valores de 1.5% e 6%.

7.2. Espessuras adotadas

A metodologia acima apresentada foi adotada para determinar as espessuras de isolamento para todos os elementos com exceção do pavimento em contacto com solo. Para este caso a espessura de isolamento foi determinada de forma simplificada, como se explica mais á frente.

7.2.1. Espessura de isolamento das paredes exteriores

Através da metodologia acima exposta procedeu-se à determinação da espessura ótima de isolamento para as paredes exteriores. Primeiramente averiguou-se os gastos relacionados com a colocação do isolamento. Para tal recorreu-se a um gerador de preços de isolamentos [16], que permite determinar o custo de instalação de isolamento por m^2 , para variadas espessuras desse mesmo isolamento. Multiplicando-se o custo para uma determinada espessura pela área a isolar obtém-se o custo de isolamento para um determinado elemento. Para a determinação da espessura ótima de isolamento das paredes exteriores recorreu-se à zona 1, uma vez que esta zona térmica possui uma área elevada de parede exterior. Na Tabela 18 apresentam-se os custos obtidos para as espessuras disponibilizadas pelo gerador de preços acima referido.

Tabela 18 - Custos de isolamento das paredes exteriores da Zona 1 para diferentes espessuras

Lã de Rocha (P. Ext Z1)		
Espessura (cm)	Preço (€/m ²)	Preço (€)
5	59,34	2926,35
6	61,87	3051,12
8	66,44	3276,49

Com base nos valores da Tabela 18 é possível construir uma linha de tendência que fornece a relação entre a espessura x (cm) e o preço de instalação do isolamento (€), como se mostra na Figura 49.

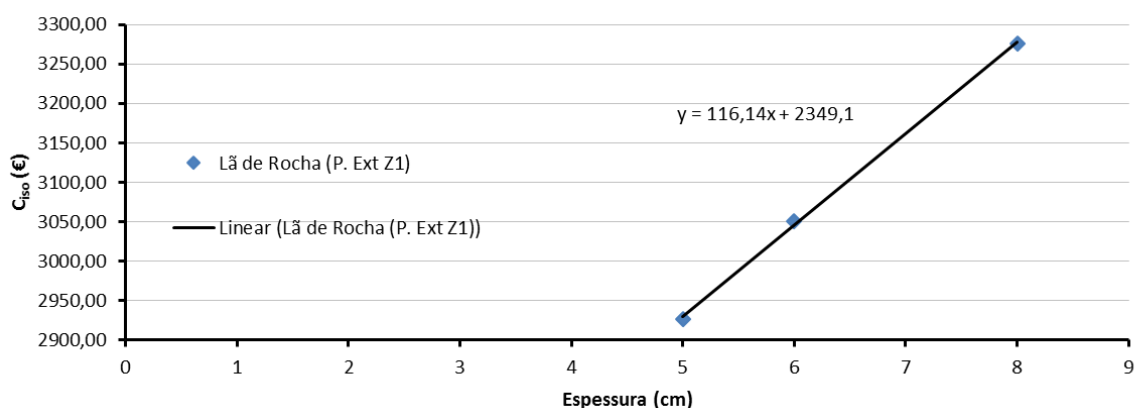


Figura 49 - Determinação da função custo do isolamento em função da espessura x (cm)

Através do *EnergyPlus* determinou-se, primeiro, as necessidades energéticas de aquecimento da zona térmica 1 para diferentes valores de espessura da lã de rocha. Seguidamente efetuou-se o mesmo cálculo das necessidades energéticas mas agora com as paredes exteriores (parte opaca) tornadas adiabáticas. Subtraindo este segundo cálculo ao primeiro obtém-se, para cada espessura, a parcela das necessidades exclusivamente devida às paredes exteriores, como se pretende. Na Tabela 19 mostram-se os resultados.

Tabela 19 - Necessidades energéticas associadas às paredes exteriores da zona 1 para diferentes valores de espessura de isolamento

Zona 1		
Espessura (cm)	N _{aquec} (kWh)	Parcela das Paredes Exteriores (kWh)
0	2972,43	979,58
1	2740,83	747,98
2	2613,56	620,71
3	2531,57	538,72
4	2474,85	482,00
5	2432,91	440,06
6	2400,90	408,05
7	2375,31	382,46
8	2354,69	361,83
9	2337,92	345,07
10	2323,61	330,76
11	2311,42	318,57
12	2301,13	308,28
13	2291,97	299,12
14	2283,88	291,03
15	2276,76	283,91

Com base nestes valores de necessidades energéticas imputadas às paredes exteriores é possível criar uma função aproximada das necessidades energéticas em função da espessura de isolamento, como se mostra na Figura 50.

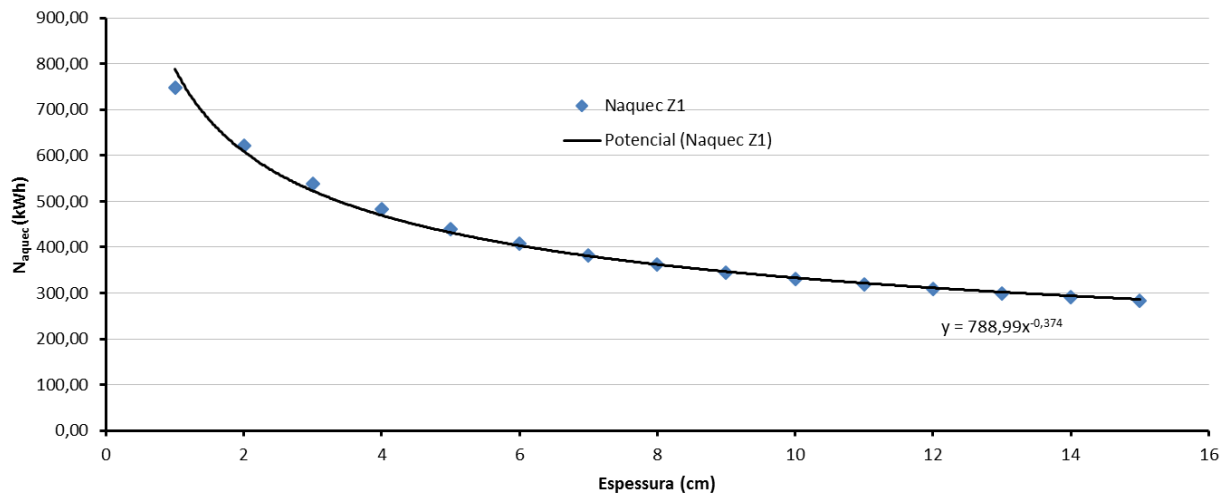


Figura 50 - Necessidades energéticas de aquecimento associada às paredes exteriores da zona 1 em função da espessura de isolamento x (cm)

Neste caso a função que melhor se ajusta aos resultados das necessidades energéticas é uma função potencial, resultando para a função custo a equação seguinte:

$$C(x, n) = 116.14x + 2349.1 + C_{ene} * F(n) * (788.99x^{-0.374}) \quad (8.12)$$

Derivando a equação 8.12 em relação à espessura, e igualando a zero obtém-se para a espessura ótima a seguinte expressão:

$$x_{opt} = 1.9712 * (C_{ene} * F(n))^{0.727802} \quad (8.13)$$

Na Tabela 20 apresenta-se os valores da espessura ótima que resultam desta expressão para os três horizontes de projeto aí indicados, 10, 20 e 30 anos.

Tabela 20 - Espessura ótima de isolamento das paredes exteriores para diferentes números de anos do horizonte de projeto

n (anos)	Factor de actualização (F)	Xopt (cm)
10	7,82	2,25
20	12,89	3,23
30	16,17	3,81

O horizonte de projeto de 20 anos é uma boa meta a atingir, pelo que se adota para a solução de reabilitação das paredes exteriores uma espessura de isolamento pelo exterior de 3cm. Poder-se-ia esperar uma espessura maior para este isolamento, no entanto deve-se ter em conta que as paredes existentes, apesar de serem de basalto, são bastante espessas, o que confere algum isolamento térmico e, em resultado da sua elevada massa, têm uma inercia térmica elevada, que pode ter um efeito importante nas condições térmicas interiores em termos de redução das necessidades energéticas. Há também que ter em conta o facto do custo de instalação deste isolamento ser significativo, o que também conduz a espessuras menores de isolamento.

7.2.2. Espessura de isolamento do teto em contacto com a cobertura

Para a determinação da espessura ótima de isolamento do teto optou-se por analisar a zona 9. Esta zona tem uma área razoável de teto em contacto com a cobertura, o que a torna representativa das necessidades energéticas induzidas por este elemento.

Primeiramente determinou-se o custo associado à instalação do isolamento na área de teto da zona em questão, para diferentes espessuras de isolamento, obtendo-se os valores indicados na Tabela 21.

Tabela 21 - Custos de isolamento do teto em contacto com a cobertura da Zona 9 para diferentes espessuras

EPS (Cob Z9)		
Espessura (mm)	Preço (€/m ²)	Preço (€)
3	6,14	431,64
4	6,53	459,06
5	7,24	508,97
6	7,93	557,48
7	8,62	605,99
8	9,33	655,90

Com base nesta tabela é possível definir uma função afim que permite estabelecer uma relação direta entre as espessuras de isolamento e o custo, em €, desse mesmo isolamento para a área de teto da zona 9 (Figura 51).

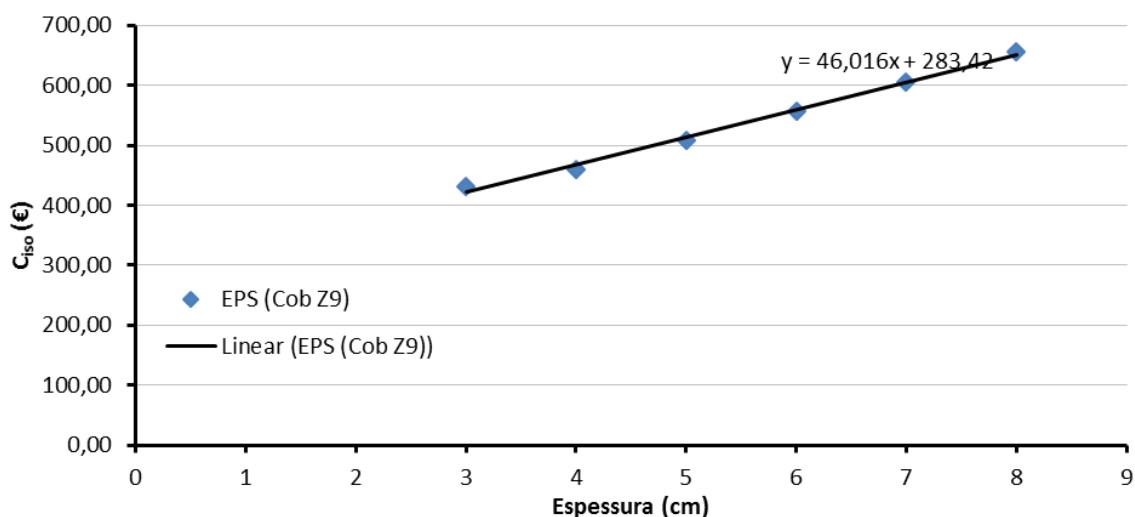


Figura 51 - Determinação da função custo do isolamento em função da espessura X (cm)

Depois de determinada a parcela dos custos associada à instalação do isolamento, há que determinar a parcela associada aos gastos energéticos. Para tal determinou-se as necessidades energéticas anuais da zona 9, com e sem a contribuição da laje do teto, e com estas obteve-se as necessidades energéticas que resultam exclusivamente da laje do teto. Estes cálculos foram realizados para diferentes valores de espessura de isolamento e os resultados mostram-se na Tabela 22.

Tabela 22 - Necessidades energéticas associadas à cobertura da zona 9 para diferentes valores de espessura de isolamento

Zona 9		
Espessura (cm)	N _{aquec} (kWh)	Parcela tecto (kWh)
0	11102,58	3311,27
1	9925,62	2134,32
2	9363,63	1572,32
3	9017,79	1226,49
4	8780,74	989,44
5	8607,56	816,25
6	8475,88	684,57
7	8371,54	580,24
8	8287,15	495,85
9	8217,40	426,10
10	8159,20	367,90
11	8109,13	317,83
12	8066,22	274,91
13	8028,45	237,15
14	7995,34	204,03
15	7966,00	174,69

A partir destes valores de necessidades energéticas de aquecimento associadas ao teto é possível definir uma linha de tendência que aproxima esta variação das necessidades com a espessura de isolamento colocado. No presente caso a função que melhor aproxima os valores calculados é uma função exponencial (Figura 52).

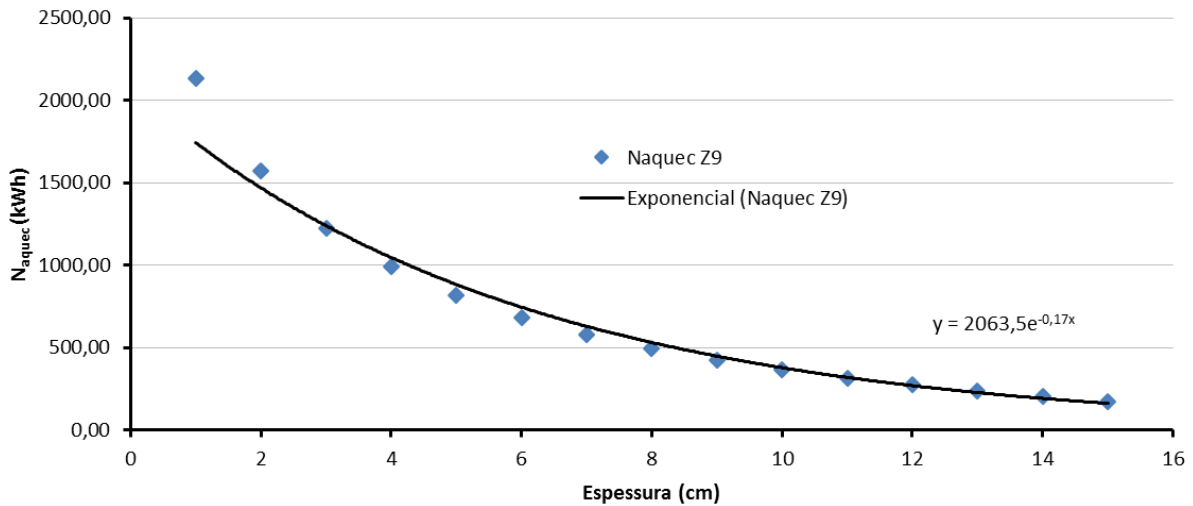


Figura 52 – Necessidades energéticas de aquecimento associadas ao teto da zona 9 em função da espessura de isolamento x (cm)

Com base nas duas funções anteriormente definidas é possível então construir a função custo associada ao isolamento do teto da zona 9:

$$C(x, n) = 46.016x + 238.42 + C_{ene} * F(n) * (2063.5e^{-0.17x}) \quad (8.14)$$

Derivando esta função em ordem a x, e igualando a zero, obtém-se a expressão que fornece o valor da espessura ótima em função do número de anos do horizonte de projeto.

$$x_{opt} = 5.88235 * (\ln(C_{ene} * F(n)) + 2.03121) \quad (8.15)$$

Na Tabela 23 apresentam-se os valores da espessura ótima para os horizontes de projeto aí indicados, 10, 20 e 30 anos.

Tabela 23 - Espessura ótima de isolamento do teto para diferentes números de anos do horizonte de projeto

n (anos)	Factor de actualização (F)	Xopt (cm)
10	7,82	13,00
20	12,89	15,94
30	16,17	17,28

Da mesma forma adota-se para este caso a espessura ótima para o horizonte de projeto de 20 anos, que toma o valor de 16 cm. Este nível de espessura deve-se à grande percentagem de perdas que ocorrem pelo teto, e deve-se também ao facto do custo de instalação deste isolamento sobre a laje do teto do último piso ser relativamente baixo, conduzido assim a espessuras elevadas. Este valor de espessura de isolamento é elevado mas é coerente com outros valores obtidos em estudos semelhantes, como o estudo do nível ótimo de isolamento efetuado por J. D. M. Dinis [22].

7.2.3. Espessura de isolamento do pavimento em contacto com o exterior

Para o estudo da espessura de isolamento do pavimento em contacto com o exterior, optou-se por recorrer à zona térmica correspondente ao gabinete do comandante da unidade (zona 11), uma vez que esta zona térmica é das zonas mais nobres do edifício e também porque o nível de perdas térmicas pelo pavimento, como se observou no capítulo anterior, é muito elevado.

O custo associado à colocação do isolamento (Lã de Rocha) apresenta-se na Tabela 24 para a área de pavimento em contacto com o exterior da zona 11, para diferentes valores de espessura do isolamento.

Tabela 24 - Custos de isolamento do pavimento em contacto com o exterior da Zona 11 para diferentes espessuras

Lã de Rocha (Pav. Ext Z11)		
Espessura (cm)	Preço (€/m ²)	Preço (€)
3	8,43	580,78
4	9,73	670,34
5	11,23	773,68
6	12,63	870,13
8	15,45	1064,41

Mais uma vez, com base nestes custos de instalação do isolamento em função da espessura, define-se a função que caracteriza estes custos (Figura 53).

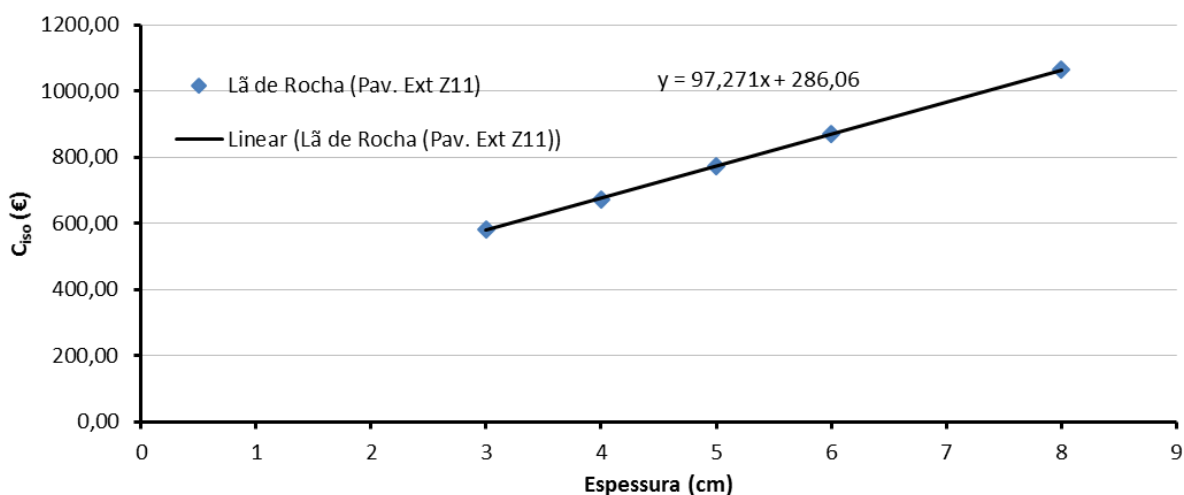


Figura 53 - Determinação da função custo do isolamento em função da espessura x (cm)

Da mesma forma que nos casos anteriores, foram calculadas as necessidades energéticas da zona 11 associadas ao pavimento em contacto com o exterior (Tabela 25).

Tabela 25 - Necessidades energéticas associadas ao pavimento exterior da zona 11 para diferentes valores de espessura de isolamento

Zona 11		
Espessura (cm)	N _{aquec} (kWh)	Parcela Pavimento (kWh)
0	11491,43	2617,17
1	10444,26	1570,00
2	10002,83	1128,58
3	9752,55	878,29
4	9590,95	716,69
5	9477,07	602,82
6	9393,21	518,95
7	9329,16	454,91
8	9278,22	403,97
9	9236,39	362,13
10	9201,48	327,22
11	9172,49	298,23
12	9148,38	274,12
13	9126,78	252,53
14	9108,64	234,38
15	9092,49	218,23

Com base nestes valores definiu-se a função que relaciona as necessidades com a espessura de isolamento, sendo no presente caso a função que melhor aproxima os valores calculados do tipo exponencial (Figura 54).

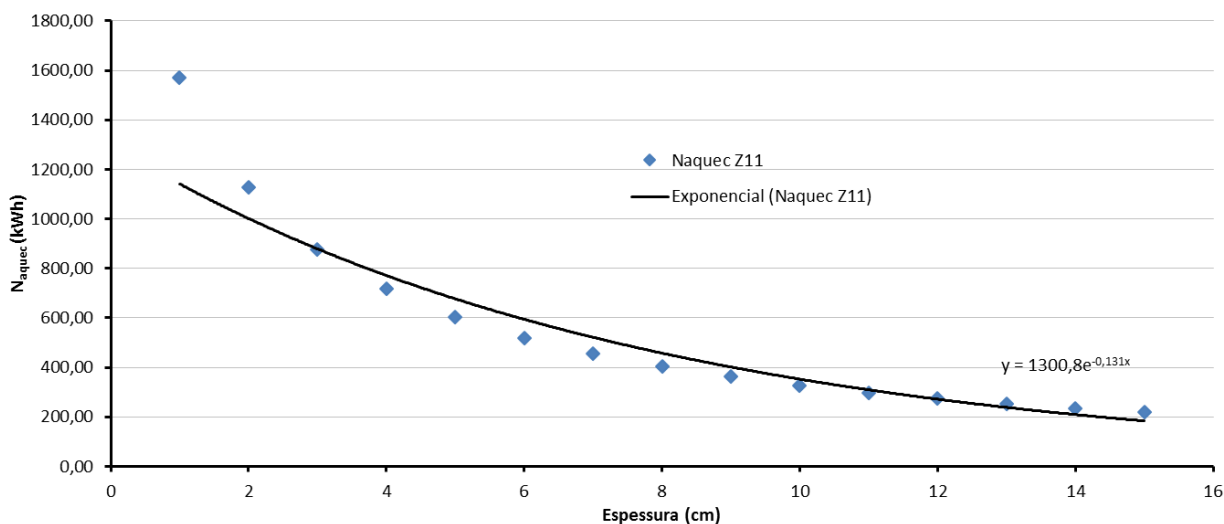


Figura 54 - Necessidades energéticas de aquecimento associadas ao pavimento da zona 11 em função da espessura de isolamento x (cm)

É possível então, com base nestas duas funções, constituir a função custo com todas as suas parcelas:

$$C(x, n) = 97.271x + 286.06 + C_{ene} * F(n) * (1300.8e^{-0.131x}) \quad (8.16)$$

Derivando a equação 8.16 em ordem à espessura x e igualando a zero obtém-se a espessura de isolamento que conduz ao custo mínimo para diferentes números de anos do horizonte de projeto (n).

$$x_{opt} = 7.63359 * (\ln(C_{ene} * F(n)) + 0.560676) \quad (8.17)$$

Os valores da espessura ótima que se obtêm para 10, 20 e 30 anos apresentam-se na Tabela 26.

Tabela 26 - Espessura ótima de isolamento do pavimento em contacto com o exterior para diferentes números de anos do horizonte de projeto

n (anos)	Factor de actualização (F)	X _{opt} (cm)
10	7,82	5,65
20	12,89	9,46
30	16,17	11,20

No presente caso adotou-se para solução de reabilitação a espessura de 10 cm, que é o arredondamento para cima do valor obtido para o horizonte de projeto de 20 anos. Mais uma vez este valor é coerente com os obtidos no estudo do nível ótimo de isolamento já referido [22].

7.2.4. Espessura de isolamento do pavimento em contacto com o solo

Para a determinação da espessura de isolamento a adotar para o pavimento em contacto com o solo optou-se por apenas entrar em consideração com as necessidades energéticas. Isto deve-se ao facto de os custos associados à colocação deste isolamento sobre a laje térrea não estarem

precisamente determinados e também ao facto de espessuras de isolamentos elevadas poderem conduzir a deformações do pavimento significativas.

Para a determinação desta espessura de isolamento térmico para o pavimento em contacto com o solo listou-se as necessidades energéticas de aquecimento para as duas zonas térmicas com maior área em contacto com o solo (Tabela 27)

Tabela 27 - Valores das necessidades energéticas de aquecimento das zonas 12 e 13 para diferentes espessuras de isolamento no pavimento

X (cm)	N_{aquec} Z12 (kWh)	N_{aquec} Z13 (kWh)
0	5840,42	7094,79
1	5725,71	7010,93
2	5689,63	6989,06
3	5671,10	6978,50
4	5659,77	6972,30
5	5652,38	6968,40
6	5647,07	6965,65
7	5642,93	6963,52
8	5639,72	6961,87
9	5637,16	6960,57
10	5635,05	6959,51
11	5633,29	6958,65
12	5631,80	6957,92
13	5630,48	6957,27
14	5629,41	6956,80
15	5628,63	6956,51

Seguidamente na Figura 55 apresenta-se graficamente a variação das necessidades de aquecimento para estas duas zonas, em função da espessura de isolamento.

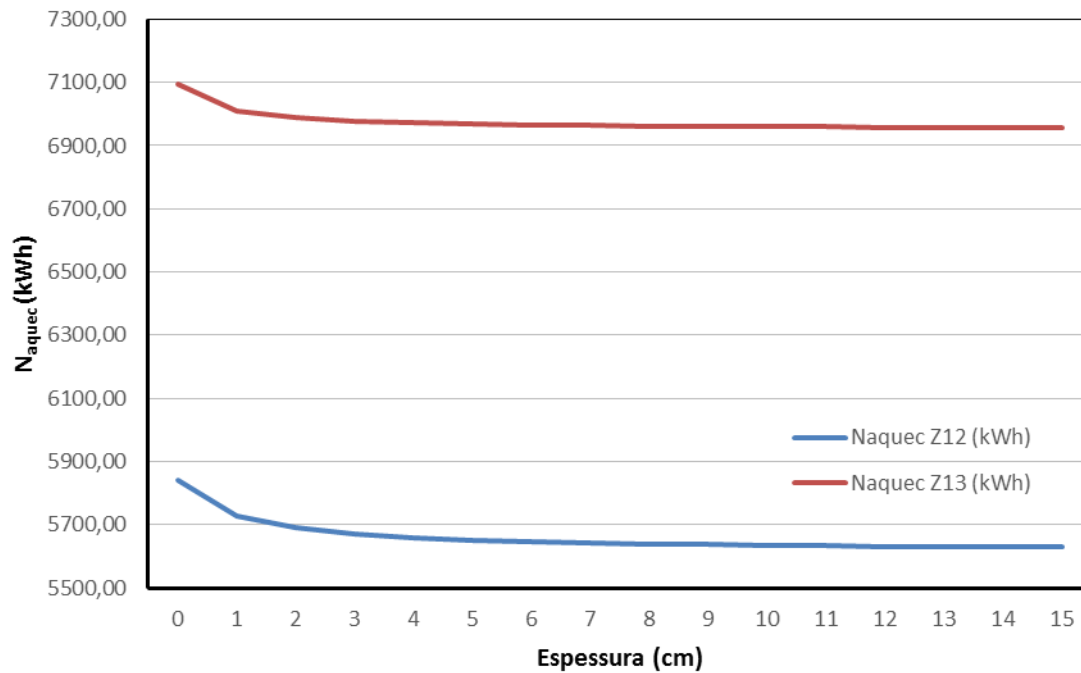


Figura 55 - Necessidades de aquecimento das zonas 12 e 13, para diferentes espessuras de isolamento no piso térreo

Para ambas as zonas térmicas é visível que o comportamento das necessidades energéticas é assintótico com o aumento da espessura de isolamento e que a partir dos 4 centímetros de isolamento térmico são mínimas as variações das necessidades energéticas. Como tal, optou-se pela solução de 4 cm de isolamento térmico para todos os pavimentos em contacto com o solo.

CAPÍTULO VIII

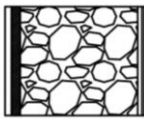
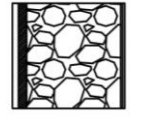
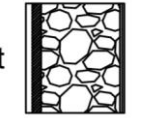
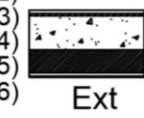
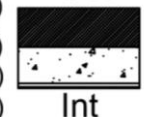
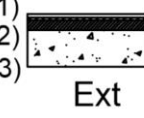
8. Análise dos resultados após reabilitação

Uma vez definidas as soluções de reabilitação, importa analisar o nível de adequação das soluções e os ganhos efetivos em termos de melhoria do comportamento térmico do edifício. Para efetuar esta verificação analisou-se essencialmente dois indicadores do desempenho térmico: os novos coeficientes de transmissão térmica do edifício e as novas necessidades energéticas do edifício, tendo desta vez em consideração não só as necessidades de aquecimento como também de arrefecimento.

8.1. Coeficientes de Transmissão térmica

Com a aplicação de isolamento térmico nos elementos do edifício já referidos, os respetivos coeficientes de transmissão térmica alteram-se significativamente. Estes novos coeficientes de transmissão térmica foram calculados com base nas resistências térmicas superficiais interiores e exteriores já apresentadas na Tabela 13 e encontram-se listados na Tabela 28. Se forem comparados estes novos coeficientes de transmissão térmica com os obtidos anteriormente, conclui-se desde logo que existe uma redução notória dos seus valores, o que antecipa uma melhoria do comportamento térmico do edifício com as soluções de isolamento térmico propostas para a sua envolvente. A melhoria da qualidade térmica das novas soluções pode ser verificada de uma forma simplificada comparando os valores dos seus coeficientes de transmissão térmica com os valores preconizados na regulamentação. Como já aqui foi referido, não é objetivo neste trabalho efetuar uma análise à luz do regulamento, no entanto, ao nível dos parâmetros térmicos fundamentais, como é o caso dos coeficientes de transmissão térmica, o regulamento, ao apresentar requisitos de comportamento, propicia uma forma expedita de avaliação da qualidade térmica das soluções construtiva, o que neste estudo se explora.

Tabela 28 - Coeficientes térmicos dos elementos construtivos rehabilitados

	Material	K_p (W/m ² .K)	U (W/m ² .K)
<p>Parede exterior 0.60</p> <p>Ext  Int</p> <p>(1)(2) (3) (4)(5)</p>	<p>(1)Reboco (2)Lã de Rocha (3)Pedra Basalto (4)Reboco (5) Estuque</p>	0,72	0,64
<p>Parede exterior 0.50</p> <p>Ext  Int</p> <p>(1)(2) (3) (4)(5)</p>	<p>(1)Reboco (2)Lã de Rocha (3)Pedra Basalto (4)Reboco (5) Estuque</p>	0,78	0,68
<p>Parede exterior 0.40</p> <p>Ext  Int</p> <p>(1)(2) (3) (4)(5)</p>	<p>(1)Reboco (2)Lã de Rocha (3)Pedra Basalto (4)Reboco (5) Estuque</p>	0,83	0,73
<p>Pavimento em vão</p> <p>(1) Int (2)  (3) (4) Ext (5) (6)</p>	<p>(1)Rev. Cerâmico (2)Argamassa (3)Laje Betão (4)Lã de Rocha (5)Reboco (6)Estuque</p>	0,34	0,32
<p>Tecto do ultimo piso</p> <p>(1) Cob (2)  (3) (4) Int</p>	<p>(1)EPS (2)Laje Betão (3)Reboco (4)Estuque</p>	0,21	0,20
<p>Pavimento térreo</p> <p>(1) Int (2)  (3) (4) Ext</p>	<p>(1)Rev. Cerâmico (2)Argamassa (3)XPS (4)Laje Betão</p>	0,83	0,70

Os novos coeficientes de transmissão térmica das soluções de reabilitação encontram-se todos abaixo dos valores máximos permitidos pelo RECS, como se verifica por consulta da Tabela 14 atrás apresentada, pelo que deste ponto de vista todas as soluções propostas são regulamentares. Entretanto, tanto o REH como o RECS preveem, na aplicação das respetivas metodologias de verificação, a utilização de coeficientes de transmissão térmica de referência, que podem ser tomados como indicadores de uma qualidade térmica desejável. Na Tabela 29 e na Tabela 30 mostram-se os

valores de referência que estes dois regulamentos consideram para os coeficientes de transmissão térmica.

Tabela 29 - Coeficientes de transmissão térmica de referência para superfícies opacas e para vãos envidraçados (REH) [3]

U_{ref} [W/(m ² .°C)]		Zona Climática					
Portugal Continental							
Zona corrente da envolvente:		Com a entrada em vigor do presente regulamento			31 de dezembro de 2015		
		I1	I2	I3	I1	I2	I3
em contacto com o exterior ou com espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas, $b_v > 0.7$	Elementos opacos verticais	0,50	0,40	0,35	0,40	0,35	0,30
	Elementos opacos horizontais	0,40	0,35	0,30	0,35	0,30	0,25
em contacto com outros edifícios ou espaços não úteis com coeficiente de redução de perdas, $b_v \leq 0.7$	Elementos opacos verticais	1,00	0,80	0,70	0,80	0,70	0,60
	Elementos opacos horizontais	0,80	0,70	0,60	0,70	0,60	0,50
Vãos envidraçados (portas e janelas) (U_w)		2,90	2,60	2,40	2,80	2,40	2,20
Elementos em contacto com o solo		0,50			0,50		

Tabela 30 - Coeficientes de transmissão térmica de referência para superfícies opacas e para vãos envidraçados (RECS) [7]

	Zona Climática		
Portugal Continental			
Zona corrente da envolvente	I1	I2	I3
Elementos opacos verticais exteriores ou interiores	0,70	0,60	0,50
Elementos opacos horizontais exteriores ou interiores	0,50	0,45	0,40
Vãos envidraçados exteriores (portas e janelas)	4,30	3,30	3,30

No presente caso o objeto de estudo é um edifício de serviços, pelo que é enquadrado pelo RECS, e localiza-se em Leira, que pertence à zona climática I1. Como tal, o coeficiente de transmissão térmica de referência para os elementos opacos em contacto com o exterior será 0,7 para os elementos verticais e de 0,5 para os elementos horizontais.

Como é possível observar, os coeficientes de transmissão térmica dos elementos horizontais do edifício em contacto com o exterior, cobertura e pavimento sobre caixa aberta, encontram-se abaixo dos respetivos coeficientes de transmissão térmica de referência, o que indica que a metodologia da espessura ótima utilizada neste estudo conduziu a uma solução com um nível de qualidade superior à preconizada pelo regulamento. Quanto ao pavimento em contacto com o solo, que não foi objeto da referida metodologia, o coeficiente de transmissão térmica resultante da aplicação de 4 cm de material isolante coincide com o valor de referência estipulado pelo RECS. Quanto aos elementos verticais verifica-se que, à exceção da parede de 0,4 m, todos têm um coeficiente de transmissão térmica superior aos valores de referência. Isto deve-se ao facto da espessura de isolamento térmico obtido para as paredes pela metodologia seguida neste trabalho ser relativamente baixo (3 cm) face ao que

começa a ser corrente em paredes de alvenaria de tijolo. No entanto, o nível de isolamento obtido pode ser justificável atendendo ao tipo de paredes existentes, de pedra e elevada espessura, o que lhes confere um comportamento térmico que apenas pode ser tratado em regime dinâmico, como foi efetuado neste trabalho e, como tal, requisitos deduzidos para este tipo de paredes pressupondo um regime permanente de transferência de calor podem não ser adequados.

Se em lugar dos coeficientes de transmissão térmica de referência do RECS forem tomados como termos de comparação os coeficientes de transmissão de referência do REH, as conclusões para os elementos horizontais são semelhantes às anteriormente obtidas, mas para os elementos verticais verifica-se que nenhuma das paredes exteriores apresenta valores de coeficientes de transmissão térmica inferiores aos de referência. É de notar que os coeficientes de transmissão térmica que são superiores aos de referência não estão muito longe dos preconizados pelo REH que, neste capítulo, é mais exigente do que o RECS.

Em conclusão, a análise efetuada revela que os coeficientes de transmissão térmica obtidos para as soluções de reabilitação do edifício, embora nalguns casos sejam superiores aos valores de referência do RECS e REH, encontram-se relativamente próximos destes, o que legitima a metodologia de cálculo adotada no presente trabalho.

8.2. Necessidades energéticas

Para além da análise efetuada no ponto anterior, é importante efetuar uma análise ao nível das necessidades e consumos energéticos, para avaliar em que medida as soluções de reabilitação propostas são vantajosas do ponto de vista da economia de energia. As necessidades energéticas serão novamente estimadas com recurso ao *EnergyPlus* e serão apuradas para três situações distintas: edifício com as soluções originais, edifício com as soluções de reabilitação térmica propostas e edifício com as soluções de referência preconizadas pelo RECS. Para além das necessidades de aquecimento serão também levantadas as necessidades de arrefecimento, o que permitirá avaliar o impacto que o reforço do isolamento térmico da envolvente, avaliado unicamente com base no período de aquecimento, tem no desempenho térmico do edifício na estação de arrefecimento.

Para efetuar uma análise global que envolva em simultâneo o aquecimento e o arrefecimento, as respetivas necessidades energéticas não podem ser simplesmente somadas, pois para a geração da energia podem estar em causa formas de energia diferentes e equipamentos distintos ao nível do seu rendimento. No caso geral ter-se-á que a energia total associada à manutenção do conforto nas estações de aquecimento e arrefecimento, convertida para energia primária será:

$$E_{total} = \frac{N_{aquec}}{\eta_{aquec}} F_{pu,aquec} + \frac{N_{arref}}{\eta_{arref}} F_{pu,arref} \quad (9.1)$$

No presente caso considerou-se a eletricidade como fonte de energia tanto para o aquecimento como para o arrefecimento, o que implica que a análise pode ser feita em termos desta fonte energética, não sendo necessária a conversão para energia primária através dos fatores $F_{pu,aquec}$ e $F_{pu,arref}$. Relativamente aos equipamentos, embora atualmente existam equipamentos que podem produzir, na mesma unidade, frio e calor (bomba de calor), consideram-se neste trabalho equipamentos distintos

para a emissão destes dois tipos de energia. Assim, admite-se que o aquecimento é obtido por resistência elétrica ($\eta_{\text{aquec}}=1$), e o arrefecimento através de máquina frigorífica (ciclo de compressão) com $\eta_{\text{arref}}=3$.

As energias de aquecimento e arrefecimento para as três situações referidas apenas foram calculadas para três zonas térmicas consideradas representativas do comportamento geral do edifício de comando. As três zonas térmicas escolhidas foram as zonas térmicas 1, 4 e 11. A zona térmica 1 foi escolhida pois representa bem o comportamento do edifício ao nível do rés-do-chão, a zona térmica 4 porque, apesar da sua área reduzida, encontra-se no primeiro piso e permite representar bem o desempenho deste nível do edifício, por fim a zona térmica 11 foi analisada essencialmente por apresentar o pavimento em contacto com o exterior. Listam-se primeiro as necessidades de energia de aquecimento e de arrefecimento associadas à situação de origem (Tabela 31).

Tabela 31 - Necessidades energéticas de aquecimento, arrefecimento e totais associadas à situação de origem

Situação de Origem			
kWh	Zona 1	Zona 4	Zona 11
N_{aquec}	2570,9	1712,8	10495,3
N_{arref}	9,8	145,2	651,0
N_{aquec,η_{aquec}=1}	2570,9	1712,8	10495,3
N_{arref,η_{arref}=3}	3,3	48,4	217,0
Total	2574,2	1761,2	10712,3

Os valores destas necessidades podem ser comparados com os da situação reabilitada, cujos valores se apresentam na Tabela 32.

Tabela 32 - Necessidades de aquecimento, arrefecimento e totais associadas à situação reabilitada

Situação Reabilitada			
kWh	Zona 1	Zona 4	Zona 11
N_{aquec}	1757,8	951,7	4473,3
N_{arref}	40,7	163,8	869,0
N_{aquec,η_{aquec}=1}	1757,8	951,7	4473,3
N_{arref,η_{arref}=3}	13,6	54,6	289,7
Total	1771,4	1006,3	4763,0

É visível que as necessidades de aquecimento diminuíram acentuadamente com a solução reabilitada, tendo por exemplo para a zona térmica 11 passado para cerca de metade. Efetivamente, em fases anteriores desta dissertação já se tinha verificado a influência da variação da espessura de isolamento nas necessidades energéticas de aquecimento, no entanto esta é a primeira vez que se aplicou o isolamento em todos os elementos a isolar de uma só vez, verificando-se assim esta diminuição significativa das necessidades de aquecimento.

No que toca às necessidades de arrefecimento, estas apresentam um comportamento bastante distinto no que toca às zonas 4 e 11 relativamente ao comportamento da zona térmica 1. De facto, quer na situação original quer na situação após reabilitação, é visível uma grande diferença de valores entre as zonas 4 e 11 e a zona 1, o que se explica pelo fato das primeiras estarem sob cobertura, ao contrário

da zona 1. Da situação original para a situação após reabilitação as necessidades de arrefecimento das zonas térmicas 4 e 11 permanecem quase inalteradas, embora apresentem um ligeiro aumento. No caso da zona térmica 1 as necessidades de arrefecimento, embora baixas, sobem da situação original para a situação após reabilitação. Isto deve-se à grande área opaca que a zona térmica 1 apresenta, relativamente à sua área de envidraçados, quando comparada com as zonas térmicas 4 e 11, que possuem uma maior percentagem de área de envidraçados. Uma maior percentagem de envidraçados facilita os fluxos de calor com o exterior e as perdas de calor quando a fachada não se encontra a receber calor, daí poderem resultar menores necessidades energéticas de arrefecimento. Quanto às necessidades totais, observa-se que para todas as zonas térmicas elas diminuem bastante na situação após reabilitação, apesar de no caso da zona térmica 1 as necessidades de arrefecimento subirem significativamente.

Através desta análise pode-se também confirmar, tal como se antecipou anteriormente, que as necessidades de aquecimento são as mais preponderantes, representando uma grande percentagem das necessidades energéticas totais. Isto valida a determinação da espessura ótima realizada, uma vez que esta foi efetuada apenas com base nas necessidades de aquecimento.

A análise efetuada permite supor que as soluções de reabilitação propostas podem conduzir a uma grande diminuição de custos energéticos a curto-médio prazo, dado que em alguns casos será possível afirmar que os gastos energéticos passam para metade, sendo exemplo disso a zona térmica 11. Seguidamente apresentam-se na Tabela 33 as necessidades associadas à situação de referência, que utiliza os coeficientes de transmissão térmica de referência do RECS.

Tabela 33 - Necessidades de energéticas de aquecimento, arrefecimento e totais associadas à situação de referência

	Situação de Referência		
kWh	Zona 1	Zona 4	Zona 11
N_{aquec}	1751,9	1040,7	5373,2
N_{arref}	100,1	185,5	1422,0
N_{aquec,η_{aquec}=1}	1751,9	1040,7	5373,2
N_{arref,η_{arref}=3}	33,4	61,8	474,0
Total	1785,3	1102,6	5847,2

Observando as necessidades obtidas quando se utiliza os coeficientes de transmissão térmica de referência, verifica-se que tanto as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento como as necessidades totais encontram-se bastante próximas das necessidades homólogas para a situação após reabilitação. Relativamente à zona térmica 1 verifica-se que a situação de referência apresenta menores necessidades energéticas totais apesar de ter maiores necessidades de arrefecimento. No caso da zona térmica 4, as necessidades energéticas da situação de referência e da situação após reabilitação são bastantes próximas, sendo no entanto as da situação de referência menores. Por fim, para a zona 11 verifica-se o oposto das duas outras zonas térmicas: para a zona térmica 11 as necessidades energéticas de aquecimento e totais, para a situação de referência, são superiores às necessidades energéticas de aquecimento e totais verificadas para a situação após reabilitação. Para a zona térmica 11 esta diferença ocorre essencialmente devido ao facto do pavimento em contacto com o exterior se encontrar muito bem isolado, com um coeficiente de transmissão térmica inferior ao da

situação de referência, o que juntamente com o isolamento dos restantes elementos origina perdas menores que as da situação de referência. Na zona térmica 4 existe uma elevada espessura de isolamento mas apenas no teto em contacto com a cobertura, que é o principal elemento sujeito a grandes perdas, o que leva a que as necessidades energéticas desta zona sejam bastante próximas das da situação de referência. Por sua vez, a zona térmica 1 apresenta espessuras de isolamento sempre reduzidas tanto no pavimento em contacto com o solo como nas paredes exteriores, daí o afastamento, entre as necessidades da situação de referência e as necessidades da situação reabilitada, ser superior ao que se verifica nas restantes duas zonas térmicas.

Analisando o problema como um todo, é possível concluir que as soluções de reabilitação propostas conduzem a grandes poupanças a nível energético, poupanças estas que são muito semelhantes às da situação de referência.

CAPÍTULO IX

9. Conclusões e desenvolvimentos futuros

A dissertação aqui apresentada centrou-se na análise do comportamento térmico e energético de um edifício do tipo CANIFA e na elaboração de propostas de melhoria do seu desempenho. O edifício alvo de estudo foi o edifício de comando do RA4. O objetivo da análise assentou essencialmente na procura de soluções de reabilitação térmica otimizadas em função de um custo generalizado que leva em conta não só o custo de investimento mas também o custo energético associado à manutenção das condições de conforto térmico.

Os edifícios militares do tipo CANIFA representam uma grande parte dos edifícios militares existentes em Portugal. Dado que estes edifícios foram construídos num período em que não existiam preocupações de conforto térmico nem de poupança energética, encontram-se atualmente muito desenquadrados neste domínio, carecendo de uma reabilitação energética para assegurar a sua adequabilidade às exigências atuais de consumo energético e de conforto.

O trabalho aqui efetuado desdobrou-se em duas fases distintas: análise do edifício nas suas condições atuais e determinação de uma solução de reabilitação otimizada. Para executar estas duas etapas recorreu-se ao programa *EnergyPlus*, no qual foi efetuada uma modelação cuidada do edifício que procurasse simular o melhor possível as condições reais de funcionamento.

Na primeira fase foram levantados os coeficientes de transmissão térmica dos diferentes elementos construtivos do edifício nas condições atuais. Estes valores dos coeficientes térmicos foram então comparados com os valores máximos admissíveis impostos pela regulamentação atual, tendo-se concluído que estes valores eram desadequados. Feita esta análise, o estudo prosseguiu com o levantamento, para diferentes zonas térmicas definidas na modelação do edifício, dos elementos construtivos com os maiores impactos nas perdas de calor, tendo-se confirmado os resultados já esperados, ou seja, que os elementos críticos são as paredes exteriores, o pavimento em contacto com solo, o pavimento em contacto com o ambiente exterior e o teto do último piso em contacto com a cobertura.

A segunda fase deste estudo consistiu em selecionar um tipo e uma espessura de isolamento para os elementos que, na fase anterior, apresentaram maior percentagem de perdas térmicas. O tipo de isolamento definido foi lâ-de-rocha para as paredes exteriores e para o pavimento em contacto com o exterior, XPS para o pavimento em contacto com o solo, e por fim EPS para o teto em contacto com a cobertura. Para a definição da espessura de isolamento adotou-se uma metodologia baseada na minimização do custo composto pelas parcelas de instalação do isolamento – material e aplicação – e da energia associada à manutenção das condições de conforto térmico durante n anos de horizonte de projeto. Para aplicar esta metodologia obteve-se as necessidades energéticas de aquecimento do edifício, visto serem estas as necessidades energéticas mais preponderantes. Fazendo variar as necessidades energéticas e o custo de instalação do isolamento em função de uma espessura de isolamento x , foi então possível determinar a espessura de isolamento que conduz ao mínimo custo global para o período de n anos. No caso particular do pavimento em contacto com o terreno optou-se apenas por determinar a espessura de isolamento com base na variação das necessidades energéticas

de aquecimento com a espessura. As espessuras de isolamento obtidas, para um horizonte de projeto de 20 anos, foram as seguintes: 3 cm para as paredes exteriores, 4 cm para o pavimento em contacto com o solo, 10 cm para o pavimento em contacto com o exterior e 16 cm para o teto em contacto com a cobertura.

A metodologia aplicada permitiu ter uma clara percepção da influência dos gastos energéticos e do custo de instalação do isolamento no dimensionamento de uma solução de reabilitação energética. Num caso em que o custo de instalação se apresente bastante reduzido em relação ao custo associado à energia despendida em n anos, a espessura de isolamento será bastante significativa. Tal ficou patente na espessura de isolamento obtida para o teto do último piso. Ao invés, caso o custo de instalação se apresente bastante superior ao resultante dos gastos energéticos durante n anos de horizonte de projeto, verifica-se que a espessura de isolamento ótima obtida será claramente reduzida.

Uma vez determinadas as soluções de reabilitação a adotar procedeu-se ao levantamento dos novos coeficientes de transmissão térmica, os quais foram depois comparados com os valores de referência da nova regulamentação. Esta comparação permitiu concluir que as soluções são adequadas uma vez que a grande maioria dos coeficientes de transmissão térmica da situação reabilitada são inferiores aos coeficientes de transmissão térmica de referência. Finalmente comparou-se, para 3 zonas térmicas representativas, as necessidades tanto de arrefecimento como de aquecimento para 3 situações distintas: a situação com o edifício nas condições originais, a situação com o edifício reabilitado e por fim a situação do edifício com os coeficientes de transmissão térmica de referência aplicados em todos os elementos. Com este estudo rapidamente se concluiu que a situação reabilitada apresenta necessidades de aquecimento muito mais baixas que a situação original e também mais baixas que a situação de referência. Quanto às necessidades de arrefecimento, verificou-se que a situação reabilitada apresenta valores superiores aos da situação original e inferiores aos da situação de referência. Foi também observado, em todas as situações, que as necessidades de aquecimento apresentam uma ordem de grandeza muito superior à das necessidades de arrefecimento, e que em relação às necessidades energéticas totais, as da situação reabilitada são também muito inferiores às da situação original.

As espessuras obtidas neste estudo assim como as elações acerca da qualidade térmica do edifício em questão são também coerentes com a análise efetuada na dissertação de mestrado: Comportamento térmico e energético de unidades CANIFA e propostas de melhoria. Caso de estudo: Edifício de Caserna, realizada por C. Bom [23].

Nos estudos efetuados nesta dissertação apenas se utilizaram determinadas zonas térmicas características do modelo, tomadas como representativas do comportamento geral do edifício. No entanto, os resultados são semelhantes para as necessidades energéticas da totalidade das zonas térmicas do edifício, como se pode ver na Tabela 34.

Tabela 34 - Necessidades energéticas de todo o modelo do *EnergPlus* para a situação de origem, reabilitada e de referência

Situação	Necessidades energéticas (kWh)		
	Original	Reabilitada	Referência
Naquec, $\eta_{aquec}=1$	61268,38	32582,75	35025,19
Narref, $\eta_{arref}=3$	942,03	1116,95	1846,67
Total	62210,41	33699,69	36871,86

É visível que as necessidades totais do modelo apresentam o mesmo comportamento, para a situação original, reabilitada e de referência, que as zonas térmicas representativas selecionadas. Como tal é possível afirmar que os resultados obtidos para as zonas térmicas específicas é extrapolável para o resto do edifício.

Concluindo, é possível afirmar que melhorias de desempenho energético do edifício introduzidas pelas medidas de reabilitação adotadas permitem obter uma grande poupança energética anual, tornando assim o edifício em questão bastante mais sustentável e com melhoria das suas condições de conforto térmico.

Relativamente a desenvolvimentos futuros, no seguimento do trabalho aqui apresentado, seria possível otimizar a metodologia utilizada neste estudo estendendo-a a qualquer edifício do tipo CANIFA, uma vez que todos eles apresentam características semelhantes ao edifício selecionado. A aplicação da metodologia da recente regulamentação térmica a este edifício seria também interessante de forma a averiguar eventuais diferenças no nível de exigência das soluções de reabilitação a adotar. Também relativamente ao edifício estudado neste trabalho, faria sentido analisar a influencia da melhoria da qualidade dos envidraçados no desempenho energético do edifício, escrutinando assim a sua influência em edifícios deste tipo. Finalmente, teria interesse avaliar as alterações das espessuras ótimas dos isolamentos que resultaria da assunção, como valor de conforto, de uma temperatura interior de 18°C, como preconiza a mais recente regulamentação, em lugar de 20°C adotada neste trabalho.

A reabilitação energética, não só dos edifícios CANIFA, mas dos edifícios em geral anteriores à regulamentação térmica, é um investimento para o futuro, promovendo a contínua utilização dos edifícios antigos com condições de conforto aceitável, e assegurando um futuro sustentável para as gerações vindouras.

Referências Bibliográficas

- [1] “Base de Dados Portugal Contemporâneo,” 2011. [Online]. Consultado em: <http://www.pordata.pt/>.
- [2] “Eurostat,” 2012. [Online]. Consultado em: http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/statistics/search_database.
- [3] “Center for Climate and Energy Solutions,” 2014. [Online]. Consultado em: <http://www.c2es.org/>.
- [4] “Instituto Nacional de Estatística,” 2014. [Online]. Consultado em: <http://www.ine.pt/>.
- [5] *Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de Abril), Diário da República n.º67, I Série, pp 2468 a 2513.* 2006, pp. 2468–2513.
- [6] *Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH)(Portaria n.º 349-B/2013, de 29 de Novembro), Diário da República n.º232, I Série, pp 6624-(18) a 6624(29).* 2013.
- [7] *Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS) (Portaria n.º 349-D/2013, de 2 de Dezembro), Diário da República n.º233, I Série, pp 6628-(40) a 6628(73), no. 40.* 2013, pp. 40–73.
- [8] T. Mascarenhas, E. Mi-, and S. G. Mundial, “A Engenharia Militar Portuguesa,” no. 3, 2011.
- [9] “O operacional,” 2010. [Online]. Consultado em: <http://www.operacional.pt/os-quarteis-canifa/>, 2010.
- [10] N. Madeira, “Metodologia de PDM.” 2011.
- [11] “REGIMENTO DE ARTILHARIA 4- LEIRIA -,” 2014. [Online]. Consultado em: <http://clientes.netvisao.pt/boinaverde/ra4.htm>.
- [12] “Leiria,” 2014. [Online]. Consultado em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Leiria>.
- [13] *Despacho n.º15793-F/2013. Diário da República, 2.ª série – N.º234 – 3 de Dezembro de 2013.* Lisboa., no. 26. 2013, pp. 26–31.
- [14] *DIN 5035 Lightning with artificial light.* 2006.
- [15] “European Association for External Thermal Insulation Composite Systems,” 2014. [Online]. Consultado em: <http://www.ea-etics.eu/>.
- [16] “Gerador de preços para construção civil. Portugal. CYPE Ingenieros, S.A.” [Online]. Consultado em: <http://www.geradordeprecos.info/>.
- [17] “Dow - Soluções para a Construção Isolamento térmico de pavimentos,” vol. 0. pp. 67–78, 2014.
- [18] “Obra É Fácil,” 2014. [Online]. Consultado em: <http://www.obraefacil.com/pt/p%C3%A1gina/isolamentos-termicos-e-acusticos/>.
- [19] A. Moret Rodrigues, A. Canha da Piedade, and A. M. Braga, *Térmica de Edifícios.* 2009.

- [20] "Taurus," 2014. [Online]. Consultado em: <http://taurus-home.com/pt/lar/aparelhos-de-aquecimento/emisor-termico/dubai-900>.
- [21] EDP, "Tarifas Baixa Tensão Normal até 20,7kVA," 2014. [Online]. Consultado em: <http://www.edpsu.pt/pt/particulares/tarifasehorarios/BTN/Pages/TarifasBTNate20.7kVA.aspx>.
- [22] J. D. M. Dinis, "Dissertação de Mestrado: Análise do nível óptimo de isolamento térmico de edifícios residenciais em Portugal," Universidade de Aveiro, 2008.
- [23] C. Bom, "Dissertação de Mestrado: Comportamento térmico e energético de unidades CANIFA e propostas de melhoria. Caso de estudo: Edifício de Caserna," Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2014.