



Telma Esteves Abrantes Albuquerque José

# REABILITAÇÃO SUSTENTÁVEL DE UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL MULTIFAMILIAR

SUSTAINABLE REHABILITATION OF A MULTIFAMILY  
RESIDENTIAL BUILDING

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural,  
orientada pelo Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos e pela Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio

Coimbra, 8 de setembro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



**FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**  
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Telma Esteves Abrantes Albuquerque José

# **REABILITAÇÃO SUSTENTÁVEL DE UM EDIFÍCIO RESIDENCIAL MULTIFAMILIAR**

## **SUSTAINABLE REHABILITATION OF A MULTIFAMILY RESIDENTIAL BUILDING**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Mecânica Estrutural,  
orientada pelo Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos e pela Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.  
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer  
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões  
que possa conter.

Coimbra, 8 de setembro de 2017

## **AGRADECIMENTOS**

As minhas palavras de agradecimento são direcionadas para todas as pessoas que colaboraram no desenvolvimento da presente dissertação e para todas as pessoas que me apoiaram ao longo destes últimos anos.

Agradeço ao Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos e à Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio por toda a disponibilidade, empenho e por todos os conhecimentos transmitidos, contribuindo para o meu desenvolvimento académico e pessoal.

A todos os meus familiares e amigos que estiveram sempre a meu lado e pelas suas palavras de incentivo. Um grande agradecimento aos meus amigos de Coimbra, Celorico da Beira e Fornos de Algodres pelo convívio e bons momentos que serão sempre lembrados com o maior carinho. Em particular ao meu irmão, Tiago, por ser desde sempre o meu melhor amigo e por nunca me deixar ir abaixo quando por vezes todo este processo se tornou um pouco solitário. Ao Tomé, um agradecimento muito especial por toda a paciência, compreensão e carinho que tem vindo a demonstrar quando mais preciso.

Por último e não menos importante, aos meus pais por todo o esforço, dedicação, amor, confiança e apoio incondicional. Obrigada por serem os meus exemplos, por lutarem por mim todos os dias e me tornarem na pessoa que sou hoje.

## RESUMO

Nos últimos anos tem-se verificado um aumento no consumo energético e no crescimento contínuo das emissões globais de CO<sub>2</sub>. Este aumento deve-se ao crescimento da população e respetivas atividades, sendo prioritário a redução das concentrações de dióxido de carbono e, conseqüentemente, a redução dos impactes ambientais.

Em consequência das recentes políticas europeias relativas a novas exigências energéticas e ambientais, a reabilitação de edifícios antigos tornou-se um assunto emergente em todos os Estados Membros.

Os edifícios consomem grandes quantidades de energia, contribuindo para as emissões de gases de efeito de estufa (e.g. CO<sub>2</sub>). As necessidades energéticas podem ser reduzidas através da implementação de medidas de reabilitação sustentável. Para implementação destas medidas, é necessária a avaliação pormenorizada de diversas estratégias de reabilitação energética, por forma a que se obtenha uma solução que permita a minimização do consumo de energia e a maximização dos benefícios económicos.

A presente dissertação enquadra-se nesta problemática, pretendendo avaliar diferentes medidas de reabilitação implementadas num edifício situado em Nápoles, Itália. As medidas de reabilitação consideradas foram as seguintes: introdução de isolamento nas paredes, no pavimento do rés-do-chão e na cobertura, substituição do vidro e da caixilharia das janelas e, finalmente, substituição do sistema de aquecimento elétrico por um sistema de ar-condicionado com e sem capacidade de arrefecimento.

Pretende-se, assim, avaliar não só os aspetos energéticos como também os aspetos ambientais de cada estratégia de reabilitação.

As conclusões foram estabelecidas com base nos resultados energéticos obtidos para cada medida de reabilitação sustentável considerada, onde se comprovou a sua eficácia no desempenho energético do edifício em estudo. Para além da realização de uma análise individual de cada solução de reabilitação sustentável, foi fundamental a realização de uma análise que permitiu a combinação de diversas medidas de reabilitação sustentável consideradas mais adequadas para o presente caso de estudo.

**Palavras chave:** Reabilitação sustentável; Sustentabilidade; *DesignBuilder*; Consumo energético; Isolamento térmico; Sistemas AVAC, Dióxido de carbono

## ABSTRACT

In recent years there has been an increase in energy consumption and in the continuous growth of global CO<sub>2</sub> emissions. This increase is due to the population growth and its activities, with the priority being given to the reduction of carbon dioxide concentrations and, consequently, to the reduction of environmental impacts.

As a consequence of recent European policies about new energy and environmental requirements, the rehabilitation of old buildings has become an emerging issue in all Member States.

Buildings consume large amounts of energy, contributing to greenhouse gas emissions. Energy needs can be reduced through the implementation of sustainable rehabilitation measures. In order to implement these measures, a detailed evaluation of various energy rehabilitation strategies is required, so that a solution can be obtained to minimize energy consumption and maximize economic benefits.

The present dissertation intended to evaluate different measures of rehabilitation implemented in a building located in Naples. The considered rehabilitation measures were the introduction of insulation on the walls, on the ground floor and on the roof, the replacement of the glass and window frames and, finally, the replacement of the electric heating system by an air conditioning system with and without cooling capacity.

The aim is to assess not only the energy aspects but also the economic and environmental aspects for each rehabilitation strategy.

The conclusions were established based on the energy results obtained for each considered sustainable rehabilitation measure, where its effectiveness about the energy performance of the building was proved. In addition to conduct an individual analysis of each sustainable rehabilitation solution, it was essential to carry out an analysis that allowed the combination of several sustainable rehabilitation measures considered more appropriate for the present case of study.

**Keywords:** Sustainable rehabilitation; Sustainability; *DesignBuilder*; Energy consumption; Thermal insulation; HVAC systems, Carbon dioxide

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	I
RESUMO .....	II
ABSTRACT .....	III
ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
ÍNDICE DE QUADROS .....	VIII
ABREVIATURAS .....	IX
SIMBOLOGIA .....	IX
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização e conteúdo.....	2
2 REABILITAÇÃO SUSTENTÁVEL .....	4
2.1 Definição de reabilitação sustentável .....	4
2.2 Reabilitação, reconstrução, renovação, remodelação, restauro e manutenção .....	6
2.3 Diretivas europeias .....	7
2.4 Auditorias energéticas .....	8
2.5 “Stakeholders” .....	10
2.6 Conceitos fundamentais para compreensão dos resultados .....	10
2.6.1 Calor latente e calor sensível .....	10
2.6.2 Energia primária, útil e final.....	11
2.7 Dissertações desenvolvidas no âmbito do comportamento térmico de edifícios .....	12
2.7.1 “Análise Paramétrica de uma Solução Passiva para uma Moradia com Estrutura em Aço Leve” .....	12
2.7.2 “Avaliação do Comportamento Térmico de uma Moradia Residencial Experimental” .....	14
3 EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS E EDIFÍCIOS NÃO RESIDENCIAIS.....	15
3.1 Edifícios residenciais .....	15
3.1.1 Reabilitação de edifícios residenciais situados na Rússia .....	16
3.1.2 Reabilitação de edifícios residenciais situados na Sérvia.....	18
3.1.3 Reabilitação de edifícios residenciais situados em Portugal .....	19
3.2 Edifícios não residenciais .....	19
3.2.1 Escritórios .....	20
3.2.2 Edifícios escolares .....	21
3.2.3 Edifícios históricos .....	24

---

4	CASO DE ESTUDO .....	27
4.1	Introdução .....	27
4.2	Descrição do edifício .....	27
4.3	Dados climáticos .....	29
4.3.1	Classificação climática de Köppen-Geiger.....	29
4.4	DesignBuilder .....	31
4.4.1	Modelação do edifício e respetivas medidas de reabilitação.....	33
5	ANÁLISE PARAMÉTRICA .....	51
5.1	Introdução .....	51
5.2	Análise prévia .....	52
5.3	Influência do isolamento térmico .....	54
5.3.1	Paredes .....	54
5.3.2	Pavimento térreo .....	56
5.3.3	Cobertura .....	57
5.4	Influência da substituição das janelas.....	59
5.4.1	Tipo de vidro .....	59
5.4.2	Tipo de caixilharia .....	61
5.5	Influência do sistema de ar-condicionado .....	62
5.6	Combinações das diferentes soluções de reabilitação .....	64
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	67
6.1	Conclusões .....	67
6.2	Propostas para desenvolvimentos futuros .....	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Balanço energético entre as diferentes formas de energia (ecen@, 2017).....	12
Figura 4.1 – Fachada a noroeste [google@ (2017)] .....	28
Figura 4.2 – Fachada a sudeste [google@ (2017)] .....	28
Figura 4.3 – Planta tipo de dois apartamentos do edifício .....	28
Figura 4.4 - Sistema climático de Köppen-Geiger aplicado em Itália (adaptado de Wikimedia@, 2017) .....	30
Figura 4.5 – Hierarquia de dados do DesignBuilder .....	31
Figura 4.6 - Seção transversal das paredes interiores.....	36
Figura 4.7 - Seção transversal das paredes duplas exteriores numa fase inicial .....	36
Figura 4.8 - Seção transversal das paredes duplas exteriores pós-reconstrução .....	38
Figura 4.9 - Seção transversal dos pavimentos .....	39
Figura 4.10 - Seção transversal do rés-do-chão original .....	40
Figura 4.11 - Seção transversal do rés-do-chão pós-reabilitação .....	40
Figura 4.12 - Seção transversal da cobertura numa fase inicial .....	43
Figura 4.13 - Seção transversal da cobertura invertida pós-reabilitação.....	43
Figura 5.1 - Resultados da análise prévia em kWh/m <sup>2</sup> .....	52
Figura 5.2 - Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) da análise prévia .....	53
Figura 5.3 - Consumo energético em kWh/m <sup>2</sup> para diferentes espessuras de isolamento térmico nas paredes exteriores.....	54
Figura 5.4 - Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) para diferentes espessuras de isolamento térmico nas paredes.....	55
Figura 5.5 - Consumo energético em kWh/m <sup>2</sup> da aplicação de diferentes espessuras de isolamento térmico no rés-do-chão.....	56
Figura 5.6 - Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) da aplicação de diferentes espessuras de isolamento térmico no rés-do-chão .....	56
Figura 5.7 - Consumo energético em kWh/m <sup>2</sup> da aplicação de diferentes espessuras de isolamento térmico na cobertura.....	58
Figura 5.8 – Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) da aplicação de diferentes espessuras de isolamento térmico na cobertura .....	58
Figura 5.9 – Consumo energético em kWh/m <sup>2</sup> da aplicação de vidro duplo com painéis de 6mm separados por ar ou argon.....	60



Figura 5.10 - Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) da aplicação de vidro duplo com painéis de 6mm separados por ar ou argon .....	60
Figura 5.11 - Consumo energético em kWh/m <sup>2</sup> da aplicação de diversos tipos de caixilharia	61
Figura 5.12 - Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) da aplicação de diversos tipos de caixilharia.....	61
Figura 5.13 - Consumo energético em kWh/m <sup>2</sup> da aplicação do sistema de ar-condicionado com e sem arrefecimento .....	62
Figura 5.14 - Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) da aplicação do sistema de ar-condicionado com e sem arrefecimento .....	63

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Sistemas existentes no edifício no seu estado inicial e referentes às variadas medidas de reabilitação (adaptado de S. Paiho et al., 2015).....	17
Quadro 3.2 – Variações energéticas tendo como referência a reabilitação básica .....	17
Quadro 4.1 - Principais características e dimensões do edifício em estudo .....	29
Quadro 4.2 - Clima correspondente a cada grupo da classificação de Köppen-Geiger .....	30
Quadro 4.3 – Parâmetros condicionantes do conforto térmico referente à situação inicial do edifício em estudo.....	34
Quadro 4.4 – Características da aplicação interior ou exterior de isolamento térmico (adaptado de thegreenage@, 2017) .....	37
Quadro 4.5 – Condutibilidade térmica, $\lambda$ , a resistência térmica, R, e a espessura, d, dos materiais constituintes das paredes (LNEC, 2006).....	38
Quadro 4.6 – Valor de U das paredes exteriores antes e após reabilitação .....	39
Quadro 4.7 – Condutibilidade térmica, $\lambda$ , resistência térmica, R, e espessura, d, dos materiais constituintes do pavimento do rés-do-chão (LNEC, 2006) .....	41
Quadro 4.8 – Valores de U do pavimento do rés-do-chão antes e após reabilitação .....	41
Quadro 4.9 – Características da cobertura invertida e convencional (adaptado de projetista@, 2017).....	42
Quadro 4.10 – Condutibilidade térmica, $\lambda$ , a resistência térmica, R, e a espessura, d, dos materiais constituintes da cobertura (LNEC, 2006) .....	43
Quadro 4.11 – Valores de U da cobertura antes e após reabilitação .....	44
Quadro 4.12 – Características dos diferentes tipos de vidro aplicado em janelas (adaptado de araluminios@, 2017) .....	45
Quadro 4.13 – Valor de U para as diferentes caixilharias .....	46
Quadro 4.14 – Material, espessura e dimensão das portas .....	47
Quadro 4.15 – Vantagens e desvantagens dos principais tipos de aquecimento (adaptado de solarwaters@ 2017) .....	48
Quadro 5.1 - Medidas de reabilitação estudadas .....	51
Quadro 5.2 – Diferença percentual das necessidades de aquecimento para o 2º piso.....	55
Quadro 5.3 - Diferença percentual das necessidades de aquecimento para o rés-do-chão .....	57
Quadro 5.4 - Diferença percentual das necessidades de aquecimento para o 4º piso .....	59
Quadro 5.5 – Diferenças percentuais do consumo de combustível após implementação de diversas combinações de medidas de reabilitação.....	65

## **ABREVIATURAS**

AQS – Águas quentes sanitárias

AVAC – Aquecimento, ventilação e ar-condicionado

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

DDEE – Diretiva do Desempenho Energético dos Edifícios

EBRD – *European Bank for Reconstruction and Development*

EPS – *Expanded PolyStyrene* (Poliestireno expandido)

IFC – *International Finance Corporation*

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

R/C – Rés-do-chão

REH – Regulamento dos Edifícios de Habitação

UE – União europeia

XPS – *Extruded PolyStyrene* (Poliestireno extrudido)

ZSC – *Zone Sensible Cooling*

ZSH – *Zone Sensible Heating*

## **SIMBOLOGIA**

$U$  – Coeficiente de transmissão térmica

$\lambda$  – Condutibilidade térmica

$R$  – Resistência térmica

$d$  - Espessura

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

As alterações climáticas são consideradas, pela União Europeia, um dos grandes desafios a enfrentar a longo prazo. As emissões globais de CO<sub>2</sub> seguem uma tendência ascendente e presume-se que o seu crescimento seja contínuo. Sem esforços adicionais para a redução das emissões de gases com efeito de estufa, presume-se que as referidas emissões continuem a aumentar devido ao crescimento da população e das respetivas atividades económicas. Por conseguinte, é prioritário reduzir as concentrações de dióxido de carbono, contribuindo para a redução dos impactes ambientais.

As cidades consomem aproximadamente 80% da energia final na União Europeia com mais de dois terços da população localizada em áreas urbanas. Estima-se que em 2050, 83% da população europeia situar-se-á nas cidades (EU Commission, 2011 *apud* A. Ferrante, 2014; EU Report, 2010 *apud* A. Ferrante, 2014).

O aumento da urbanização e as deficiências no controlo do desenvolvimento no meio urbano têm importantes consequências sobre a degradação climática e a eficiência energética dos edifícios (Santamouris, 2012).

Os edifícios têm grande influência sobre a sustentabilidade económica, social e ambiental devido a uma quantidade significativa de energia consumida ao longo da sua vida. Os edifícios pertencentes à União Europeia consomem cerca de 40% da energia total, produzindo cerca de 40% a 50% das emissões de gases com efeito de estufa (Arden *et al.* (2008) *apud* Arden *et al.* (2011); Prasad D. e Hill M., 2004 *apud* Arden *et al.* (2011)). Estes números implicam a necessidade de implementação de políticas de construção orientadas para a sustentabilidade. Vários regulamentos respeitantes a um correto desempenho energético dos edifícios foram criados, denominando-se de diretivas europeias.

Para atender às crescentes necessidades de consumo energético, as diretivas europeias do desempenho energético dos edifícios recomendam a melhoria da sua eficiência energética, contribuindo para a respetiva sustentabilidade económica, social e ambiental.

A implementação de medidas de eficiência energética na construção permite uma enorme redução do consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa, apresentando uma oportunidade promissora para a redução significativa dos custos energéticos em todo o mundo, promovendo a redução do impacto ambiental associado ao aquecimento global.

Nemry *et al.* (2010) consideraram que na União Europeia, a redução do impacto ambiental de novos edifícios pode ser negligenciada comparativamente com os edifícios já existentes e, portanto, as medidas de eficiência energética devem ser implementadas nos edifícios existentes, surgindo um importante conceito: a reabilitação sustentável.

A reabilitação sustentável pode ser uma alternativa realista para reduzir os impactos ambientais causados pelo setor de construção, sendo uma oportunidade única para alcançar níveis mais elevados de desempenho ambiental e, especialmente, para limitar a energia necessária para o seu funcionamento.

A presente dissertação enquadra-se nesta problemática, pretendendo avaliar diferentes medidas de reabilitação implementadas no edifício em estudo. As medidas de reabilitação são analisadas individualmente e combinadas entre si, de forma a que seja possível retirar as conclusões mais assertivas. Pretende-se, assim, avaliar não só os aspetos energéticos como também os aspetos ambientais de cada estratégia de reabilitação.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo não só avaliar o comportamento térmico e a eficiência energética do edifício situado em Nápoles, Itália, como também analisar em termos ambientais as diferentes medidas de reabilitação aplicadas.

De acordo com o objetivo principal que esta dissertação se propõe, foram definidas diversas medidas de reabilitação estudadas com recurso ao *software DesignBuilder*:

- Análise prévia com o objetivo de detetar eventuais lacunas no modelo;
- Aplicação de isolamento térmico na cobertura, nas paredes exteriores e no pavimento pertencente ao rés-do-chão;
- Introdução de vidro duplo com caixilharia em alumínio com corte térmico;
- Inclusão de um sistema de ar condicionado com e sem capacidade de arrefecimento.

## 1.3 Organização e conteúdo

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, aos quais se acrescentam as referências bibliográficas.

No primeiro e atual capítulo, é apresentada a introdução ao tema abordado na presente dissertação tal como os respetivos objetivos e a organização do conteúdo a que este documento se propõe.

No segundo capítulo são expostos conceitos introdutórios sobre a reabilitação sustentável. Inicia-se com a definição de reabilitação sustentável, com a explicação das diferenças existentes entre diversos conceitos, entre eles, a reabilitação, a renovação, a remodelação, o restauro e a manutenção, passando pela elucidação das diretivas europeias implementadas e com a explicação das auditorias energéticas e do papel fundamental dos “*stakeholders*”. O presente capítulo termina com a exposição de conceitos fundamentais para mais fácil compreensão dos resultados, nomeadamente o calor latente e sensível e a energia primária, útil e final e com a exposição do estudo e respetivas conclusões de duas dissertações realizadas no âmbito do desempenho energético dos edifícios.

No terceiro capítulo, é elucidada a distinção entre edifícios residenciais e não residenciais, sendo apresentadas diferentes categorias de edifícios pertencentes aos não residenciais (escritórios, edifícios escolares e edifícios históricos). Neste capítulo são, ainda, expostos diversos estudos realizados em diferentes locais para cada tipo de edifícios.

O quarto capítulo engloba a explicação do caso de estudo, desde a descrição do edifício e dos dados climáticos tal como a explicação do programa utilizado, *DesignBuilder*, e respetiva modelação de todos os elementos essenciais para implementação das medidas de reabilitação estudadas.

No quinto capítulo são apresentados diferentes critérios para obtenção das diversas medidas de reabilitação, sendo discutidos os resultados relativos a cada solução. Por último, no mesmo capítulo, são expostas as combinações mais influentes para o objetivo da presente dissertação.

No sexto e último capítulo, para além das conclusões com base nas análises críticas e comparativas dos resultados, são ainda referidas propostas para desenvolvimentos futuros.

## 2 REABILITAÇÃO SUSTENTÁVEL

### 2.1 Definição de reabilitação sustentável

O setor de construção representa cerca de 40% das necessidades energéticas na União Europeia e 32% em todo o mundo (H. Khatib, 2012). A maior parte da energia consumida pelos edifícios provém de recursos não renováveis e potencialmente poluentes. Segundo U. Munarim e E. Ghisi (2016), cerca de 26% de todos os gases com efeito de estufa são libertados na atmosfera devido à produção e utilização de recursos energéticos sendo, conseqüentemente, promovido o crescimento do interesse por parte da comunidade científica em relação ao desempenho energético dos edifícios.

O desempenho energético e ambiental dos edifícios depende estritamente de muitos fatores relacionados com a escolha dos materiais de construção, com as instalações, com os equipamentos AVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado), com o *design* estrutural do edifício e com a respetiva utilização (F. Ardente *et al.*, 2011).

À medida que o consumo de energia de um edifício é afetado pelos respetivos elementos de construção, estratégias alternativas e técnicas de eficiência energética devem ser utilizadas para criar um ambiente interior confortável e, conseqüentemente, exista conservação de energia.

Esta grande atenção em relação aos edifícios existentes está correlacionada com a baixa taxa de crescimento anual de novas construções, cerca de 1%. Na maioria dos países ocorreu uma queda na taxa de construção de novos edifícios nos últimos anos, refletindo o impacto da atual crise financeira no setor de construção (BPIE, 2011 *apud* L. Mazzarella, 2015). Hoje em dia é evidente que, para reduzir o consumo de combustíveis fósseis e a produção de CO<sub>2</sub> no setor de construção, o desafio é a redução das necessidades energéticas dos edifícios existentes através da implementação de medidas de reabilitação.

Existem inúmeras alternativas tecnicamente viáveis de reabilitação com custos variáveis e diferentes potenciais de poupança energética disponíveis. As medidas de reabilitação estão associadas a diversas estratégias de conservação energética, como por exemplo: a instalação de sensores de iluminação natural para controlo da iluminação interior, a substituição ou a aplicação de isolamento nas paredes, na cobertura ou no telhado, a atualização do sistema AVAC, a substituição das janelas, entre outros. A seleção de um conjunto ótimo de medidas de reabilitação é influenciada pelo clima, pela ocupação, pelos sistemas de aquecimento e arrefecimento, pelas propriedades da envolvente e pela geometria da construção (S. E.Chidiac *et al.*, 2011).

Li *et al.* (2014) salientaram que as três soluções de eficiência energética mais comumente instaladas em edifícios com alto desempenho energético são a iluminação noturna, os sistemas AVAC de alta eficiência e a melhoria da envolvente do edifício.

J. Burgett *et al.* (2013) demonstraram que a poupança energética pode ser alcançada através da utilização de sistemas de AVAC por zonas, permitindo ao consumidor o estabelecimento de diferentes temperaturas em diferentes zonas da casa e, conseqüentemente, a redução do consumo energético. Geralmente, aceita-se que os sistemas AVAC por zonas podem reduzir substancialmente 39 % dos custos de energia em relação aos restantes sistemas AVAC, sendo uma principal medida de reabilitação utilizada. (R.J. Meyers *et al.*, 2010)

As medidas de reabilitação devem cumprir os requisitos de desenvolvimento sustentável, sendo o seu principal papel a redução do custo, do período de retorno do investimento realizado nessa reabilitação, das necessidades energéticas e dos impactes ambientais, aumentando o conforto interno e, em alguns casos, melhorando a aparência arquitetónica das fachadas do edifício.

A reabilitação de edifícios existentes acarreta muitos desafios que afetam diretamente a seleção das medidas de reabilitação e, portanto, o respetivo sucesso do projeto de reabilitação. Turner Construction (2008) *apud* C.C. Menassa (2011) mencionou os altos custos de construção, os longos períodos de retorno do investimento e a dificuldade em quantificar os benefícios ambientais da construção como os principais obstáculos para a execução de medidas de reabilitação sustentável.

As atividades de reabilitação energética não possuem apenas benefícios ambientais, tendo incorporada uma carga ambiental que pode ter um efeito negativo sobre o meio ambiente (Rolfman B., 2002). Segundo U. Munarim e E. Ghisi (2016), a intervenção nos edifícios existentes é aceitável se o impacto for inferior aos impactos combinados da demolição e da construção de um novo edifício.

Nas grandes cidades, os resíduos resultantes das atividades de construção e demolição podem atingir 70% da massa total de resíduos sólidos municipais (Pinto P., 1999 *apud* U. Munarim e E. Ghisi, 2016). Em contraste com as atividades de demolição e de construção de novos edifícios, a reabilitação alia as vantagens ambientais, sociais e económicas. Em relação ao indicador económico, existem diversos estudos que comprovam o benefício económico associado a uma correta medida de reabilitação; o indicador ambiental está cada vez mais sujeito a diversos estudos; e, finalmente, o indicador social é o indicador mais difícil de contabilizar.

O sucesso de um programa de reabilitação de edifícios depende não só das respetivas medidas de reabilitação, como também das políticas e de regulamentos, dos recursos e das expectativas do cliente, das informações de construção específicas, dos fatores humanos e de outros fatores de incerteza (Z. Ma *et al.*, 2012).



## **2.2 Reabilitação, reconstrução, renovação, remodelação, restauro e manutenção**

Existe uma variedade de termos utilizados no sector da construção que são incorretamente empregues, entre eles o conceito de reabilitação, reconstrução, renovação, remodelação, restauro e manutenção. Cada um destes conceitos diferem entre si, tendo características muito próprias. Seguidamente são apresentadas diferentes definições para os diferentes termos e respetivas comparações.

Para os edifícios existentes, a redução energética pode ser conseguida através de uma manutenção contínua ou através de medidas de reabilitação sustentável. Segundo Poel *et al.* (2007) manutenção é apenas uma solução a curto prazo para manter algo em boas condições, relativamente a um problema maior referente a edifícios envelhecidos em termos de redução do consumo energético e da produção de dióxido de carbono.

Por outro lado, Menassa (2011) referiu que a reabilitação sustentável permite a extensão da vida útil de um edifício, melhorando o seu desempenho e impedindo o início precoce da obsolescência. A reabilitação é o processo de modificação de algo depois de ter sido fabricado. Para os edifícios, isto significa o estabelecimento de mudanças nos sistemas situados no seu interior ou mesmo na própria estrutura depois da sua construção inicial e respetiva ocupação. Normalmente é realizado com a expectativa de melhorar o conforto dos ocupantes e/ou melhorar o desempenho do edifício (L. Mazzarella, 2015).

Por exemplo, a manutenção do sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) de um edifício pode incluir a substituição dos filtros de ar, mas o sistema ainda pode precisar de outros reparos ao longo de sua vida. A reabilitação sustentável substitui a unidade AVAC mais antiga por um modelo energeticamente mais eficiente (Dietz *et al.*, 2009 *apud* C.C. Menassa e B. Baer, 2014).

As renovações são muito semelhantes às remodelações e os termos, por vezes, são confundidos. A principal diferença é que o termo renovação aplica-se especificamente aos edifícios, contrariamente à remodelação. A renovação está, não só, relacionada com a estética e com o conforto do inquilino, como também pode incluir atualizações dos sistemas mecânicos e, potencialmente, ter um efeito sobre a eficiência energética do próprio edifício. A remodelação, por outro lado, implica um processo de melhoria através de limpeza, decoração e de reequipamento (L. Mazzarella, 2015).

Relativamente ao restauro, a sua definição prende-se com a preservação, recuperação e aprimoramento da natureza dos edifícios de interesse histórico, artístico, arquitetónico ou ambiental. O restauro é definido como o ato ou processo de retratação da forma, das características e da natureza de um determinado edifício com grande precisão. Estas

intervenções também podem ser realizadas com a utilização de materiais e técnicas diferentes das originais, desde que sejam consistentes com o caráter dos edifícios (L. Mazzarella, 2015).

Finalmente, o conceito reabilitação é muitas vezes confundido com a reconstrução, com a principal diferença de que a reconstrução influencia a parte estrutural do edifício, como, por exemplo, os pilares, de forma a combater a sua degradação e a fraca resposta a eventuais ocorrências sísmicas.

### 2.3 Diretivas europeias

O consumo de energia para aquecimento e arrefecimento dos edifícios representa uma parte significativa do balanço energético de um país (P. Cédric, 2006 *apud* D. Milone *et al*, 2015). Para atingir os ambiciosos objetivos da União Europeia de reduzir o consumo energético no sector da construção, os Estados Membros estão sujeitos à implementação de estratégias mais incisivas e vinculativas para a execução de medidas de reabilitação energética nos edifícios existentes.

Conforme explicado, o projeto de reabilitação energética tem como principal objetivo a minimização do consumo de energia e a maximização dos benefícios económicos. A nível europeu, estes objetivos podem ser observados nas Diretivas Europeias de Desempenho Energético dos Edifícios que visam garantir as poupanças energéticas e a redução de emissões de CO<sub>2</sub>.

A Diretiva Europeia do Desempenho Energético dos Edifícios 2002/91/UE exige que todos os Estados membros da União Europeia implementem regulamentos de desempenho energético, incluindo requisitos mínimos para os novos edifícios e certificados energéticos para os já existentes.

Em muitos países, a execução de medidas de reabilitação energética em edifícios públicos de grande dimensão (mais de 1000 m<sup>2</sup>), necessita de seguir os objetivos implementados pela Diretiva Europeia 2002/91/UE sobre o Desempenho Energético dos Edifícios. Segundo o artigo 7 da mesma diretiva, existe a necessidade de avaliação do desempenho energético e dos respetivos certificados energéticos. O artigo 9 está relacionado com os edifícios públicos com superfície total superior a 1000 m<sup>2</sup>, referindo que o seu certificado do desempenho energético deve estar visível ao público (M.C. Katafygiotou e D.K. Serghides, 2014).

No entanto, a diretiva referida exclui expressamente os edifícios e os monumentos oficialmente protegidos, devido à sua arquitetura especial ou ao seu mérito histórico, dos procedimentos de certificação energética e de possíveis intervenções de reabilitação energética caso se alterarem inaceitavelmente as suas características. Tal posição é substancialmente confirmada na recente Diretiva 2010/31/UE, em que a possibilidade da implementação das medidas de reabilitação energética se pode estender também a edifícios históricos, caso a sua identidade e a sua

qualidade histórica não sejam comprometidas por intervenções invasivas (D. Milone *et al.*, 2015).

A fim de harmonizar os objetivos impostos pela reabilitação sustentável, a Diretiva do desempenho energético dos edifícios 2010/31/UE centra-se no conceito de otimização dos custos. Mais pormenorizadamente, esta diretiva introduziu metodologias comparativas para avaliação do desempenho energético dos edifícios com vista a alcançar níveis ótimos de custo. Assim, está claro que o objetivo desta diretiva é a redução da lacuna existente entre o desempenho energético dos edifícios existentes e dos novos edifícios (A. Brás *et al.*, 2015).

Enquanto a primeira diretiva referida (2002/91/UE) está mais focada em metodologias e nos novos edifícios (ou seja, nas novas construções), a segunda (2010/31/UE) dá mais importância aos edifícios existentes. Após a constituição das duas diretivas mencionadas, os estados membros demonstraram um maior interesse nas intervenções destinadas a economizar energia nos edifícios existentes. Tal facto resultou num artigo explícito sobre a reabilitação dos edifícios através da Diretiva de Eficiência Energética 2012/27/UE (L. Mazzarella, 2015).

A nova Diretiva de Eficiência Energética 2012/27/UE inclui várias propostas de políticas adicionais, a fim de melhor explorar o potencial de economia energética no setor da construção. Mais detalhadamente, os focos são: (F. Ascione *et al.*, 2015)

- O destaque do papel dos edifícios públicos;
- A melhoria dos elementos construtivos e dos aparelhos utilizados nos edifícios;
- O aumento da taxa de reabilitação dos edifícios (privados e públicos).

Esta diretiva reflete-se no facto de que a poupança energética global será alcançada quando a maioria dos edifícios for eficiente em termos energéticos, com a obrigação de uma taxa de reabilitação de 3% para os edifícios públicos. Para além disso, a Diretiva 2012/27/UE estabelece que os Estados Membros devem promover uma estratégia a longo prazo para mobilizar investimentos para a reabilitação dos edifícios residenciais e comerciais.

## **2.4 Auditorias energéticas**

Muitos proprietários de grandes edifícios comerciais recorrem a companhias de serviço energético para realização de auditorias energéticas, sendo possível a identificação de estratégias de reabilitação e de gestão energética. As auditorias energéticas permitem a compreensão da qualidade e quantidade de energia que é utilizada por parte dos edifícios, identificando as áreas com maior potencial de poupança energética (Y. Heo *et al.*, 2012).

As auditorias referidas fornecem um resumo das potenciais medidas de reabilitação ou das melhorias operacionais a implementar, juntamente com a avaliação do desempenho energético

---

do edifício, permitindo melhorar a sua eficiência. O objetivo de uma auditoria energética é o estudo das condições de consumo de energia num edifício e subsequente identificação de oportunidades para melhorar o desempenho energético, visando a redução dos gastos energéticos a nível local (ponto de vista do consumidor) e a nível nacional (A. Brás *et al.*, 2015).

A. Brás *et al.* (2015) referiram que os principais objetivos das auditorias energéticas são os seguintes: a determinação das formas de energia utilizadas; análise da forma como a energia é consumida e os respetivos custos; estabelecimento de uma estrutura de consumo energético; determinação do consumo por divisão, por categoria ou por equipamento; identificação de diversas oportunidades para melhoria do desempenho energético; e análise das operações técnicas e económicas.

Segundo F. Ascione *et al.* (2015), as informações necessárias para a realização de auditorias energéticas podem ser divididas em cinco categorias: as características geométricas; as características da envolvente do edifício; as particularidades técnicas das plantas; as características das zonas funcionais do edifício; e os dados associados à faturação energética.

Estas informações necessárias devem ser adquiridas por meio de pesquisas *in situ*, entrevistas com os gerentes ou com os ocupantes do edifício e/ou através de medições de campo. O diagnóstico pode ser utilizado para identificação de equipamentos ineficientes, de sistemas de controlo impróprios e de algum mau funcionamento que afete a fase de operação do edifício. Geralmente esta situação implica a implementação de medidas de eficiência energética que são caracterizadas por baixos investimentos (F. Ascione *et al.*, 2015).

Uma auditoria energética é constituída por quatro fases de intervenção: (portal-energia@, 2017)

1. Preparação da auditoria;
2. Intervenção no local da instalação a auditar;
3. Tratamento da informação recolhida nas duas primeiras fases;
4. Elaboração do relatório da auditoria energética.

Os proprietários e as partes interessadas de pequenos e médios edifícios, geralmente não possuem recursos para realização de análises de medidas de reabilitação energéticas, optando por análises mais simples. Embora inicialmente pouco dispendiosa, esta abordagem carece de precisão e, por esse mesmo motivo, a poupança energética e económica pode não ser maximizada.

As partes interessadas mencionadas anteriormente podem ser definidas como “*stakeholders*”, cuja definição é apresentada em seguida.

## 2.5 “Stakeholders”

Os “*stakeholders*” no contexto do sector de construção, são definidos como pessoas que, direta ou indiretamente, têm interesse numa determinada construção, na operação e nos efeitos da aplicação das medidas de reabilitação futuras. Os “*stakeholders*” da construção podem incluir o proprietário, os inquilinos, os investidores, os projetistas (“*designers*”), entre outros (C.C. Menassa e Brad Baer, 2014).

Do ponto de vista da sustentabilidade, em que o equilíbrio entre os aspetos económicos, ambientais e sociais é importante, a decisão sobre se um edifício deve ser submetido a uma reabilitação sustentável deve ser acordada pelos “*stakeholders*” do setor de construção. Estes “*stakeholders*” têm perspetivas variadas e, na maioria dos casos, incompatíveis sobre como, quando e porque é que um edifício deve ser reabilitado de forma sustentável (Yudelson, 2010 *apud* C.C. Menassa e B. Baer, 2014).

Diversos estudos indicam que o conflito de perspetivas existente entre as partes interessadas é a principal barreira para a implementação de medidas de reabilitação sustentável, sendo a decisão fundamentada em termos económicos a curto prazo.

As decisões de reabilitação sustentável são comumente baseadas em maximizar as economias energéticas para recuperar os custos iniciais dentro de um período de tempo aceitável. Se os “*stakeholders*” conhecerem o desempenho energético do edifício e estiverem envolvidos no processo de decisão para redução do consumo de energia, terão maior incentivo para reduzir o consumo energético através de mudanças comportamentais que não requerem despesas adicionais (Heerwagen, 2000 *apud* C.C. Menassa e B. Baer, 2014).

Para um estudo mais aprofundado sobre a definição e o papel fundamental dos “*stakeholders*”, consulte-se C.C. Menassa e Brad Baer (2014).

## 2.6 Conceitos fundamentais para compreensão dos resultados

### 2.6.1 Calor latente e calor sensível

O calor latente e sensível são tipos de energia libertada ou absorvida na atmosfera. Enquanto que o calor latente está relacionado com as mudanças de fase entre os líquidos, os gases e os sólidos, o calor sensível está relacionado com as mudanças de temperatura sem alteração da respetiva fase. (climate@, 2017)

Quando um objeto é aquecido ou arrefecido, a temperatura aumenta ou diminui conforme o calor é adicionado ou removido, respetivamente, sendo este calor definido como calor sensível.

O calor latente é a energia absorvida ou libertada durante uma mudança de fase de um determinado elemento, sem variação significativa de temperatura.

Tentando introduzir estes dois conceitos no presente caso de estudo, é de extrema importância perceber como cada um deles influencia o sistema de ar-condicionado.

Quando se liga o sistema de ar-condicionado e se diminui a temperatura, o aparelho remove uma certa quantidade de calor sensível. Diferentes fatores afetam a quantidade de calor sensível que o aparelho de ar-condicionado necessita de remover ou adicionar a determinada divisão: (pvhvac@, 2017)

- Volume e qualidade de isolamento;
- Tipos de vidro, quantidades e tamanhos das janelas;
- Número de divisões;
- Orientação do edifício em relação ao sol;
- Constituição da cobertura;

Quando um aparelho de ar condicionado é corretamente dimensionado, deve ter capacidade de remover uma quantidade suficiente de calor latente para manter o espaço interior confortável. Esta necessidade é explicada pela existência de calor latente na humidade. Contrariamente ao calor sensível, o calor latente, que necessita de ser removido de determinada divisão, depende de diversos fatores: (pvhvac@, 2017)

- Infiltração do ar através de fissuras na envolvente do edifício;
- Atividades domésticas como cozinhar, tomar banho, limpar e exercitar;
- O número de pessoas dentro do edifício num determinado momento.

A presente dissertação tem em conta o calor sensível. Todos os cálculos energéticos realizados posteriormente têm, apenas, em conta o aquecimento e o arrefecimento. O parâmetro relativo à humidade não é considerado e, portanto, o calor latente mantém-se afastado dos resultados e respetivas conclusões.

### **2.6.2 Energia primária, útil e final**

A energia primária é a energia proveniente de recursos naturais, como o óleo e o gás natural. A energia final compreende a energia vendida aos consumidores. Exemplos de energia final são a eletricidade, o gás natural processado e o diesel. Finalmente, a energia útil é a energia utilizada, ou seja, é a luz, o aquecimento e o arrefecimento.

A Figura 2.1 apresenta o balanço energético entre os diferentes tipos de energia mencionados.

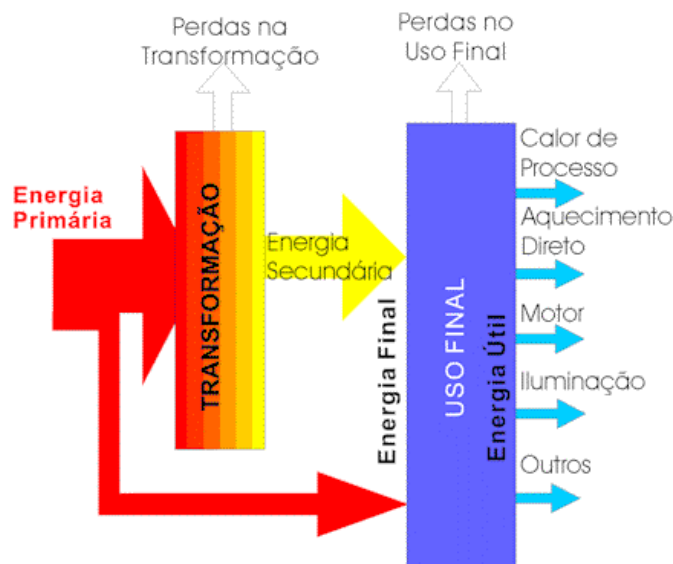


Figura 2.1 – Balanço energético entre as diferentes formas de energia (ecen@, 2017)

Para uma maior facilidade de análise, os resultados energéticos apresentados nesta dissertação correspondem à energia final.

## 2.7 Dissertações desenvolvidas no âmbito do comportamento térmico de edifícios

Para uma maior compreensão dos resultados da presente dissertação é importante a realização do estudo de trabalhos anteriormente desenvolvidos no âmbito da presente dissertação, ou seja, trabalhos relacionados com o comportamento energético dos edifícios.

Posto isto, em seguida são apresentados dois estudos referente ao comportamento térmico de edifícios.

### 2.7.1 “Análise Paramétrica de uma Solução Passiva para uma Moradia com Estrutura em Aço Leve”

Cardoso B. (2013) apresentou uma análise de casas passivas no qual se utilizaram sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento em detrimento dos sistemas mecânicos para manter a temperatura interior de conforto das casas.

Segundo Gonçalves *et al.* (2011) *apud* Cardoso B. (2013), os referidos sistemas passivos permitem tirar proveito dos fluxos naturais de energia como o vento e a radiação solar através de considerações como o clima local, orientação do edifício, características do terreno e não recorrem à utilização de equipamentos mecânicos.

As casas passivas têm grande importância para redução das emissões de dióxido de carbono e da fatura energética porque são edifícios com baixo consumo, onde a necessidade de energia é quase nula. O edifício em análise corresponde a uma moradia unifamiliar isolada com estrutura leve em aço e situa-se em Coimbra.

O principal objetivo da presente dissertação passou pelo estudo da aplicabilidade da Norma “Passivhaus” ao clima de Coimbra através da aplicação de soluções construtivas do referido edifício, tais como a utilização de vidros duplos, a introdução de isolamento térmico, a influência das pontes térmicas, da exposição solar e da ventilação.

As conclusões retiradas pelo autor Cardoso B. (2013) foram as seguintes:

- Os vidros duplos diminuem os consumos de energia útil mas, em certos casos, podem ser prejudiciais para o desempenho energético do edifício porque, apesar do menor valor do coeficiente de transmissão térmica aumentar a resistência à condução do calor, a redução do fator solar diminui o aproveitamento dos ganhos solares, o que nos meses frios faz aumentar as necessidades para aquecimento;
- A introdução de isolamento na cobertura tem um grande impacto na redução do consumo energético. O autor optou pela cobertura invertida para aumentar a durabilidade da camada de impermeabilização e o isolamento térmico introduzido foi o XPS devido à sua grande resistência mecânica;
- Pelo facto de o edifício ser constituído por uma estrutura leve em aço, observou-se a existência de pontes térmicas que aumentavam consideravelmente as necessidades energéticas do edifício. Estas pontes térmicas foram corrigidas com isolamento térmico contínuo que permitiu baixar as referidas necessidades;
- Em relação à exposição solar, a fachada com maior área de envidraçados orientada a sul foi considerada a mais adequada;
- Finalmente, o autor concluiu que em Coimbra a existência de ventilação natural permite manter o suficiente aquecimento e arrefecimento mas, em algumas situações, a ventilação mecânica com recuperação de calor é mais eficiente nos meses frios porque a abertura das janelas pode originar a entrada de frio para o interior do edifício.

Assim, a introdução de vidros duplos e de isolamento na cobertura tal como outras características do edifício como a existência de pontes térmicas, o efeito da exposição solar e da ventilação têm grande influência nas necessidades energéticas do edifício.



### **2.7.2 “Avaliação do Comportamento Térmico de uma Moradia Residencial Experimental”**

Tal como a dissertação anterior, o objetivo principal deste estudo, desenvolvido por Morais A. (2015), consistiu na avaliação do comportamento térmico de um edifício situado em Coimbra sujeito a diversas soluções construtivas.

A estrutura do edifício é constituída por perfis enformados a frio e o estudo a que a mesma foi sujeita está relacionado com diferentes estratégias passivas tais como a ventilação e o sombreamento. As principais conclusões do referido estudo foram as seguintes:

- O autor afirmou que a temperatura interior diminui com o aumento da taxa de renovação horária do ar relacionada com a ventilação;
- Em relação aos dispositivos de sombreamento, conclui-se que a ativação dos mesmos não tem grande influência na temperatura interior devido à sua reduzida opacidade. Uma forma de melhorar o conforto térmico do edifício era utilizar dispositivos de sombreamento com maior opacidade ou da introdução de palas horizontais no edifício.

Apesar de apenas se apresentarem as conclusões relacionadas com o objetivo principal da presente dissertação, o referido trabalho permitiu, para além do estudo da influência da implementação de melhorias no sistema, a validação do modelo numérico representativo do sistema instalado no edifício podendo ser utilizado em estudos futuros relacionados com o tema.

## 3 EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS E EDIFÍCIOS NÃO RESIDENCIAIS

### 3.1 Edifícios residenciais

O desempenho energético dos edifícios residenciais é fortemente afetado pelas características da envolvente do edifício. Assim, ao colocar isolamento térmico na envolvente do edifício, os ganhos energéticos e, conseqüentemente, económicos são alcançados. No entanto, se esta medida for combinada com a utilização de sistemas AVAC mais eficientes, os ganhos energéticos são fortemente reforçados (Mohamed *et al.*, 2015).

Para manter as alterações climáticas abaixo dos 2 °C, o Conselho Europeu confirmou em fevereiro de 2011 o objetivo da União Europeia de reduzir as emissões de gases de efeito estufa entre os 80% e os 95% até 2050 em relação ao ano 1990 (Comissão Europeia, 2011 *apud* F. Ascione *et al.*, 2015). Uma vez que os edifícios consomem cerca de 40% do consumo total de energia da União Europeia e produzem quase 36% dos gases de efeito de estufa na Europa, o sector da construção tem, atualmente, um papel primordial para ajudar na descarbonização e na economia europeia.

Segundo L. Mazzarella (2015), o maior potencial de poupança energética prende-se com os edifícios mais antigos onde a insuficiência ou até a falta de isolamento na sua envolvente está bastante evidenciado. Na verdade, uma parcela substancial dos edifícios existentes na Europa tem mais de 50 anos de vida com 40% dos edifícios residenciais construídos antes de 1960 (BPIE, 2011 *apud* L. Mazzarella, 2015).

Atualmente, as pesquisas mundiais têm sido muito acentuadas em relação à reabilitação de edifícios residenciais existentes. Os principais estudos estão relacionados com a reabilitação através de medidas passivas e ativas e com a utilização de recursos renováveis, cujo objetivo seja o alcance da eficiência energética, o aumento do conforto térmico, a diminuição das emissões de dióxido de carbono, a obtenção de benefícios financeiros e o alcance da sustentabilidade (M. Bojic *et al.*, 2012).

Ma *et al.* (2012) realizaram uma pesquisa recente neste campo e estudaram a aplicação de diversas estratégias de reabilitação nos edifícios residenciais existentes. Todos estes estudos demonstraram que o desempenho energético dos edifícios existentes pode ser melhorado significativamente através do isolamento térmico da envolvente do edifício e da renovação dos sistemas AVAC.

Em seguida são apresentados diferentes estudos e respetivas conclusões em relação a medidas de reabilitação sustentável aplicadas em diversos edifícios residenciais.

### 3.1.1 Reabilitação de edifícios residenciais situados na Rússia

Cerca de 60% dos edifícios multifamiliares localizados na Rússia necessitam da implementação de medidas de reabilitação sustentáveis, permitindo a redução do consumo energético dos edifícios e, conseqüentemente, o alcance da sustentabilidade no setor da construção (IFC & EBRD, 2012 *apud* S. Paiho *et al.*, 2015).

A sustentabilidade no setor da construção apenas é conseguida caso todos os edifícios existentes sejam melhorados em termos energéticos. No presente estudo, realizado por S. Paiho *et al.* (2015), a reabilitação sustentável baseou-se nas medidas que permitiam não só a redução do aquecimento e do consumo de eletricidade e de água, como também a melhoria do sistema de ventilação. Bieksa *et al.* (2011) *apud* S. Paiho *et al.* (2015) constataram que uma insuficiente atenção ao problema da ventilação pode levar a problemas de saúde a longo prazo e sugeriram a instalação obrigatória de sistema de ventilação mecânica para renovação do ar.

Foram considerados três conceitos de reabilitação: básica, melhorada e avançada.

A reabilitação básica referiu-se a reparos mínimos obrigatórios, bem como a medidas de reabilitação de fácil execução, como a utilização de produtos económicos e disponíveis no mercado com modestas propriedades energéticas. A reabilitação melhorada aprimorou o isolamento térmico dos edifícios a um nível comparável ou superior aos atuais requisitos de Moscovo para os novos edifícios e introduziu a ventilação mecânica que garantiu uma taxa de renovação do ar suficiente nos edifícios. A reabilitação avançada implicou a utilização de soluções ainda mais pormenorizadas como o isolamento da envolvente em situações de maior dificuldade de execução (S. Paiho *et al.*, 2015).

O Quadro 3.1 apresenta os diversos sistemas existentes no edifício no seu estado inicial e referentes às variadas medidas de reabilitação mencionadas e o Quadro 3.2 apresenta os valores das variações energéticas para aquecimento e para consumo de eletricidade e de água.

Quadro 3.1 – Sistemas existentes no edifício no seu estado inicial e referentes às variadas medidas de reabilitação (adaptado de S. Paiho *et al.*, 2015)

Sistemas existentes	Edifício no seu estado inicial	Reabilitação básica	Reabilitação melhorada	Reabilitação avançada
<b>Ventilação</b>	Natural	Renovação da ventilação natural existente e introdução de válvulas de entrada de ar para garantir uma troca de ar suficiente	Sistema de exaustão mecânico melhorado	Ventilação mecânica com eficiência anual de recuperação de calor de 60%
<b>Fator de infiltração do ar</b>	6,5	4,0	2,0	<2,0
<b>Sistema de aquecimento</b>	Radiadores	Substituição dos radiadores, isolamento das condutas e introdução de sistemas simples de reguladores de temperatura automáticos	Introdução de subestações para aquecimento do edifício e da água e instalação de válvulas termostáticas nos radiadores	-
<b>Aplicações elétricas e de iluminação</b>	-	Eletrodomésticos com eficiência energética e iluminação dos espaços públicos	Introdução de bombas eficientes em termos energéticos e de ventiladores	Controlo da iluminação dos espaços públicos através de sensores de movimento
<b>Sistemas de abastecimento de água</b>	Canalização antiga	Substituição da canalização e dos respetivos acessórios e aparelhos	Instalação de dispositivos para poupança de água	Instalação de sensores de medição específica do consumo

Quadro 3.2 – Variações energéticas tendo como referência a reabilitação básica

	Variações energéticas para		
	Aquecimento (%)	Consumo de eletricidade (%)	Consumo de água (%)
Edifício no seu estado inicial	-63,5	-26,2	-70,0
Reabilitação básica	0,0	0,0	0,0
Reabilitação melhorada	+22,3	+6,3	+25,0
Reabilitação avançada	+47,2	-3,8	+37,5

Estes autores apresentaram os resultados em relação à reabilitação básica e, portanto, é perceptível o valor 0 para a mesma. Os valores percentuais negativos estão relacionados com um acréscimo no consumo de energia, enquanto que os positivos denotam um consumo energético inferior.

Após implementação das medidas, as poupanças anuais relativas ao aquecimento, à eletricidade e à água foram consideradas notáveis em comparação com o estado do edifício sem sofrer qualquer tipo de reabilitação.

Ferrante (2014) apresentou formas alternativas de investigar, planejar, criar e gerenciar ambientes urbanos sustentáveis e, também, explorar a possibilidade de usar opções de reabilitação energética como forma de integração social. A avaliação técnico-económica realizada demonstrou que a eficiência energética no complexo residencial urbano pode ser considerada como uma extraordinária oportunidade para restaurar a qualidade ambiental, social e urbana (Ferrante, 2014).

Através dos estudos realizados na Rússia, é possível perceber que o potencial de poupança energética nos edifícios residenciais é muito elevado.

### **3.1.2 Reabilitação de edifícios residenciais situados na Sérvia**

O referido estudo foi retirado do artigo escrito por M. Bojic *et al.* (2012), cuja investigação abordou as oportunidades para melhoria da eficiência energética através da reabilitação de um edifício antigo situado na Sérvia.

A reabilitação do referido edifício passou pela utilização de medidas passivas que incluíram o isolamento térmico no exterior das paredes exteriores para reter o calor e aumentar a resistência térmica das paredes; o isolamento térmico (poliestireno) do teto na parte superior para reter o calor e aumentar a resistência térmica do teto; e o rebaixamento do teto para reter o calor. Estas medidas são alguns dos métodos de reabilitação utilizados para melhorar o desempenho térmico de edifícios residenciais antigos na Sérvia (M. Bojic *et al.*, 2012).

O rebaixamento do teto economizou calor por três razões: diminuição da área da parede externa presente nas zonas aquecidas; aumento da resistência térmica do teto uma vez que introduz adicionalmente ar e a placa de reboco no teto antigo; e a redução do volume da sala (dado que a infiltração permanece constante, a quantidade de calor necessária para aquecer o ar é reduzida) (M. Bojic *et al.*, 2012).

A introdução de isolamento no teto foi a medida com menor custo inicial, enquanto que a introdução de isolamento nas paredes foi a medida com maior redução no consumo energético anual, maior poupança financeira anual e, conseqüentemente, menor tempo de retorno do investimento.

A reabilitação dos edifícios não só resulta na redução das necessidades energéticas como também no prolongamento da vida útil, aumentando, assim, o seu valor no mercado.

### **3.1.3 Reabilitação de edifícios residenciais situados em Portugal**

Para o estudo realizado em Portugal por A. Brandão de Vasconcelos *et al* (2016) foram implementadas várias medidas de reabilitação energética em edifícios residenciais situados em Portugal. As estratégias de reabilitação foram as seguintes: introdução de isolamento térmico na cobertura, no pavimento e no interior e no exterior das paredes de fachada.

Os referidos autores chegaram às seguintes conclusões:

- A introdução de isolamento térmico na cobertura foi a estratégia mais eficiente, ou seja, foi a estratégia que permitiu um melhor desempenho energético do edifício. A variação na espessura do isolamento térmico implicou uma grande variação no consumo total de energia, mesmo num edifício de 7 andares;
- As medidas de reabilitação energética que levaram à menor variação no consumo de energia corresponderam à introdução de isolamento nos pavimentos;
- A introdução de isolamento térmico no interior das paredes de fachada obteve melhores resultados do que no seu exterior;
- As combinações das medidas de reabilitação da envolvente do edifício geraram melhores resultados do que as medidas analisadas individualmente (em relação aos custos globais e ao consumo energético).

A promoção das melhorias de eficiência energética dos edifícios residenciais, sem dúvida, desempenhará um papel importante na consecução das metas de eficiência energética e na redução das emissões de carbono.

## **3.2 Edifícios não residenciais**

Com referência à comunidade europeia, as necessidades energéticas anuais médias de energia primária por m<sup>2</sup> de edifício é cerca de 220 kWh/m<sup>2</sup>, com grande diferença entre os edifícios residenciais, cerca de 200 kWh/m<sup>2</sup> e os não residenciais, cerca de 295 kWh/m<sup>2</sup> (F. Ascione *et al.*, 2015).

Os edifícios não residenciais representam apenas 25% dos edifícios existentes na Europa. Contudo, estes edifícios compreendem um setor mais complexo e heterogéneo comparativamente ao setor residencial. No setor não residencial, o consumo de eletricidade nos últimos 20 anos aumentou em 74% (BPIE, 2011 *apud* L. Mazzarella, 2015).

Seguidamente são apresentadas diferentes categorias de edifícios não residenciais e respetivos estudos e conclusões.

### **3.2.1 Escritórios**

Os escritórios, comparativamente aos edifícios residenciais, têm maiores necessidades energéticas, nomeadamente para consumo de eletricidade e para ventilação. Portanto, o equilíbrio existente entre os principais componentes do consumo anual de energia primária como o aquecimento e arrefecimento do espaço, iluminação e outras utilizações elétricas, é maior para os edifícios residenciais, cujo consumo é fortemente afetado pelo aquecimento do espaço (Hamdy *et al.*, 2011).

As necessidades energéticas dos escritórios variam de acordo com a fonte de combustível utilizada, a idade, o tamanho, as características de ocupação, os sistemas de aquecimento e arrefecimento, a localização, a orientação e as práticas de construção da envolvente do edifício (S.E. Chidiac *et al.*, 2011a).

Para os edifícios pertencentes à categoria de escritórios, existem diferentes medidas de reabilitação energética que podem ser implementadas para reduzir o consumo energético. Os custos continuam a ser o único critério que os proprietários e os gerentes dos escritórios têm em conta antes da implementação das respetivas medidas. A este respeito, o governo fornece incentivos financeiros para a compensação dos custos de implementação das diversas estratégias (Kim Doyoon, 2010 *apud* Chidiac *et al.*, 2011b).

Em seguida são apresentados três estudos e respetivas conclusões em relação a medidas de reabilitação sustentável aplicadas em edifícios de escritórios.

#### **3.2.1.1 Reabilitação de escritórios**

O primeiro estudo foi realizado por Hestnes e Kofoed (2012). Estes autores investigaram dez escritórios situados na Dinamarca, Inglaterra, França, Alemanha, Grécia, Itália, Noruega, Suécia e Suíça e exploraram o impacto das diferentes estratégias de reabilitação. As estratégias de reabilitação incluíram medidas direcionadas para a envolvente do edifício, para o sistema AVAC e para a iluminação. Os resultados confirmaram a complexidade da implementação das medidas de reabilitação na categoria de construção considerada, uma vez que a estratégia ideal depende significativamente das características específicas do edifício.

O segundo estudo foi realizado por S.E. Chidiac *et al.* (2011b), com o objetivo de avaliar as alterações no consumo energético que ocorrem devido à aplicação de diversas medidas em edifício localizados no Canadá. As conclusões retiradas por estes autores foram as seguintes:

- A melhoria que levou à maior redução no consumo de energia foi a redução da taxa de infiltração do ar através da melhoria da impermeabilidade da envolvente do edifício.

- As melhorias na eficiência térmica das paredes e das janelas produziram a segunda maior redução no consumo de energia. Os autores explicaram tal situação pelo facto de o edifício em estudo apresentar muitas janelas que são habitualmente um ponto fraco da envolvente em termos de perdas de calor no Inverno e ganhos solares no Verão.
- Ao melhorar a resistência térmica do telhado, o edifício aproveita de uma forma mais eficaz os ganhos solares

Os resultados revelaram que a medida de reabilitação mais eficiente nem sempre está relacionada com uma estratégia de poupança energética. Por exemplo, a melhoria da eficiência térmica das janelas pode resultar na maior poupança de energia, enquanto a melhoria nas paredes pode resultar na máxima poupança energética com baixo orçamento, ou seja, as maiores medidas de poupança energética não são necessariamente as medidas mais rentáveis (S.E. Chidiac *et al.*, 2011b).

### **3.2.2 Edifícios escolares**

Os custos correntes para aquecimento, arrefecimento e ventilação são os principais custos associados às escolas (Papadopoulos e Avgelis, 2003 *apud* Katafygiotou e Serghides, 2014). Ao implementar medidas de reabilitação nas escolas, para além dos claros benefícios ao nível do desempenho do edifício, existe uma oportunidade de promoção da construção sustentável para a geração futura.

Para uma boa escolha das melhores medidas de reabilitação energética, é necessário o estudo de algumas características que afetam diretamente a sua adoção. O custo inicial, o retorno do investimento e a poupança energética são alguns dos parâmetros mais relevantes que devem ser levados em consideração (A. Brás *et al.*, 2015).

O setor escolar consome quantidades elevadas de energia para aquecimento, de eletricidade e, portanto, as medidas de poupança energética são vitais. A iluminação, o arrefecimento, o aquecimento de água e o consumo de eletricidade dos equipamentos são os principais custos despendidos pelas escolas (M.C. Katafygiotou e D.K. Serghides, 2014). Uma vez que as escolas são utilizadas principalmente durante os meses frios, uma das principais soluções passa pela redução do consumo de energia no edifício através da melhoria das propriedades térmicas da envolvente do mesmo.

A altura, a forma e a orientação dos edifícios influenciam diretamente o seu comportamento energético, enquanto que a quantidade de alunos e de equipamentos presente nas salas de aula afetam diretamente os ganhos internos e o conforto no interior do edifício (M.C. Katafygiotou e D.K. Serghides, 2014).



Em seguida são apresentados três estudos e respetivas conclusões em relação às medidas de reabilitação sustentável aplicadas em edifícios escolares.

### **3.2.2.1 Reabilitação de edifícios escolares**

O primeiro estudo foi realizado por M.C. Katafygiotou e D.K. Serghides (2014) sobre o consumo energético dos edifícios escolares situados no Chipre. Este e outros estudos similares permitem o aumento da consciência e da sensibilidade por parte de todos aqueles que estão envolvidos no processo de construção: proprietários, consumidores, órgãos públicos e indústria da construção. Este esforço tem um papel importante na consciencialização dos jovens que são os futuros cidadãos ativos e os próximos políticos da União Europeia.

O âmbito desta pesquisa foi a identificação dos cenários de reabilitação mais apropriados para a redução do consumo energético nas escolas. As medidas de reabilitação implementadas foram as seguintes: a substituição das janelas e dos sistemas de aquecimento e arrefecimento, a introdução de isolamento na envolvente do edifício e a introdução de painéis fotovoltaicos no telhado das escolas.

Estes autores chegaram às seguintes conclusões:

- A introdução de isolamento na envolvente e a utilização de sistemas AVAC com capacidade de aquecimento foram as medidas com maior eficiência energética.
- O sistema de aquecimento central deve ser atualizado e renovado pelo menos a cada dez anos, caso contrário o consumo de energia é amplamente aumentado. O sistema de produção de água quente sanitária, se existir, deve ser fornecido apenas por painéis solares porque, caso contrário, o consumo energético para produzir água quente é muito alto.

Um terceiro estudo foi realizado por M. Tahsildoost e Z.S. Zomorodian (2015) em edifícios escolares situados no Irão. Para além da obrigatoriedade de redução do consumo energético nas novas construções, é amplamente aceite a necessidade da diminuição drástica no consumo de energia nos edifícios educacionais existentes.

Os edifícios escolares no Irão foram construídos, principalmente, através de planos típicos de construção com baixo custo em todo o país e, geralmente, com baixa qualidade de construção e dos materiais utilizados. Por conseguinte, a reabilitação de edifícios escolares existentes é uma ação necessária que não foi considerada seriamente (M. Tahsildoost e Z.S. Zomorodian, 2015).

Os autores chegaram às seguintes conclusões:

- Ao implementar diversas medidas de reabilitação energética de baixo e médio custo, as faturas energéticas revelaram uma redução significativa no consumo de gás e de eletricidade e um aumento na qualidade ambiental interior.
- As poupanças de energia primária necessária para o aquecimento, o arrefecimento e a iluminação, bem como o retorno do investimento, permitem concluir que as medidas de reabilitação energética mais eficientes são o controlo das infiltrações de ar e o isolamento térmico da envolvente.

Repensar a maneira de utilização dos edifícios, levaria a um consumo otimizado de energia. Devem ser desenvolvidos programas de reabilitação para atingir os objetivos energéticos de um país. Inicialmente, uma avaliação do consumo de energia em diferentes tipos de construção deve ser conduzida e comparada com os dados universais. As técnicas de reabilitação de baixo custo devem ser reconhecidas em cada zona climática e implementadas por métodos de incentivo em edifícios públicos, como o caso dos edifícios educacionais (M. Tahsildoost e Z.S. Zomorodian, 2015).

Finalmente, o último estudo considerado foi realizado por A. Brás *et al.* (2015) em edifícios escolares localizados em Lisboa, Portugal. O objetivo do referido trabalho foi a avaliação do desempenho energético de uma escola e do alcance de soluções benéficas para as organizações educacionais, a fim de melhorar o conforto interno para os alunos e professores, gerir a utilização elétrica e reduzir as contas energéticas/elétricas.

Cinco cenários de reabilitação energética foram estudados: 1) reparação da argamassa exterior existente; 2) melhoria térmica das paredes utilizando 4 cm de isolamento térmico; 3) aumento do desempenho energético da envolvente do edifício, colocando isolamento térmico no telhado, 4) substituição da caixilharia das janelas por um sistema de alumínio extrudido; e, finalmente, 5) a combinação entre o primeiro e o segundo cenário.

As conclusões foram as seguintes:

- A combinação do primeiro e segundo cenário foi uma solução interessante, uma vez que leva a 40% de poupança energética e um retorno de investimento de 6 anos.
- A poupança energética alcançável com o terceiro cenário foi apenas de 16%, o que significa que o esforço económico para suportar este cenário é muito maior do que na solução anterior.
- A combinação do primeiro e segundo cenário conduziu a benefícios mais rápidos em relação à redução das necessidades de aquecimento.

### 3.2.3 Edifícios históricos

Existem muitas definições possíveis para o património cultural ou para os edifícios históricos. Estes edifícios podem estar associados a um valor ou a um significado particular, de acordo com um ou mais dos seguintes critérios: idade; raridade; edifício incomum, edifício notável, edifício conectado a uma pessoa conhecida e/ou edifício associado a um evento histórico (governeeproject@, 2015 *apud* F. Ascione *et al.*, 2015).

Segundo o departamento de recursos naturais da Geórgia (2014) *apud* L. Mazzarella (2015), um edifício para ser considerado histórico, deve ter idade suficiente, um nível de integridade física relativamente alto e significado histórico.

Em relação à idade, um edifício deve ser suficientemente antigo para ser considerado histórico. Uma propriedade deve ter idade suficiente para ter sido estudada por historiadores ou arqueólogos para que o seu lugar na história seja claro (L. Mazzarella, 2015).

Para além da idade, um edifício deve manter a sua integridade física, ou seja, o edifício deve estar relativamente inalterado (L. Mazzarella, 2015).

Finalmente, o significado histórico é o critério mais importante para um edifício ser considerado histórico, sendo dividido em três características: através da associação direta com pessoas, eventos ou atividades que moldaram a história ou que refletem aspetos importantes para a mesma; através da inclusão de distintas características físicas de um determinado estilo arquitetónico ou tipo de construção, estrutura, paisagem ou através da inclusão de altos valores artísticos; e ter o potencial de fornecer informações importantes para a compreensão do passado através de investigações e análises físicas, arqueológicas e arquitetónicas (L. Mazzarella, 2015).

Os edifícios históricos representam, entre os edifícios existentes, um caso especial quando se trata da implementação de medidas de reabilitação energética. As medidas de reabilitação caracterizadas por bons níveis de desempenho energético dos edifícios são limitadas quando aplicadas em edifícios com valor patrimonial. A adoção de estratégias com eficiência energética para os edifícios históricos é possível se estas intervenções permitirem a preservação da identidade cultural e histórica do edifício (F. Ascione *et al.*, 2011). Esta situação pode levar à seleção de medidas “não invasivas”, com menor desempenho energético (D. Milone *et al.*, 2015).

Dessa forma, é necessário um compromisso adequado entre os requisitos de eficiência energética e a conservação de edifícios históricos para obtenção de desempenhos energéticos apropriados.

A compatibilidade das medidas destinadas a aumentar a eficiência energética com as características referentes ao edifício pode ser avaliada por meio de dois critérios: a interferência

nos aspetos históricos e de que forma a reabilitação interfere com a imagem arquitetónica do edifício. (F. Ascione et al, 2015)

Os países com notável património cultural são convidados a prestar especial atenção ao consumo de energia por parte destes edifícios, uma vez que as respetivas necessidades energéticas representam uma parte não negligenciável da totalidade das necessidades energéticas destes países (P. De Berardinis *et al.*, 2014). Contudo, é possível ressaltar a falta de um protocolo específico que visa o fornecimento de soluções bem equilibradas cujo objetivo prende-se com a melhoria da eficiência energética dos edifícios históricos.

Apesar dos elevados consumos de energia por parte destes edifícios, as condições interiores fornecidas aos ocupantes são muitas vezes escassas e geralmente toleradas apenas por causa do valor cultural de tais construções.

### **3.2.3.1 Reabilitação de edifícios históricos**

Recentemente, Ben e Steemers (2014) examinaram o impacto das variáveis comportamentais e físicas na poupança de energia, investigando a reabilitação de uma habitação histórica protegida situada em Londres, Inglaterra. Estes autores descobriram que o impacto das mudanças comportamentais positivas varia entre 62% e 86% em relação aos ganhos totais.

Um estudo realizado por D. Milone *et al.* (2015) considerou dois cenários de reabilitação energética para um edifício histórico localizado na Sicília, em Itália: o cenário com a utilização das melhores medidas de reabilitação disponíveis e o cenário com a utilização das medidas de reabilitação permitidas.

As melhores medidas de reabilitação permitem a poupança energética com a utilização das melhores tecnologias disponíveis, enquanto que as medidas de reabilitação permitidas, mesmo não sendo as melhores tecnologias disponíveis, são permitidas de acordo com os requisitos e regras de preservação do património cultural, tendo de sofrer verificações do ponto de vista energético e económico. As melhores medidas de reabilitação, infelizmente, em muitos casos entram em confronto com a integridade arquitetónica do edifício. Um exemplo das referidas medidas é o caso da introdução de painéis solares destinados a produzir água quente ou energia elétrica que dificilmente poderia ser uma solução utilizada num edifício patrimonial (D. Milone *et al.*, 2015).

O estudo demonstrou que podem ser alcançados resultados importantes em termos de redução do consumo de energia, mesmo quando o aprimoramento energético de edifícios patrimoniais é realizado utilizando medidas de reabilitação que são capazes de melhorar o desempenho da envolvente do edifício sem alterar o seu mérito arquitetónico e artístico (D. Milone *et al.*, 2015).

Em conclusão, as tecnologias de construção a serem adotadas na reabilitação ou no restauro de um edifício histórico devem ser cuidadosamente avaliadas pois, neste caso, as melhores

tecnologias de desempenho energético podem não ser utilizadas devido à legislação e às respetivas restrições. Por outro lado, as tecnologias permitidas podem resultar num desempenho energético menos efetivo e num custo de investimento maior que as melhores medidas de reabilitação (D. Milone *et al.*, 2015).

L. Bellia *et al.* (2015) estudaram a influência de diversas medidas de reabilitação em edifícios históricos localizados em Nápoles, Itália. O complexo tema da reabilitação de edifícios históricos é abordado através de um caso de estudo que demonstra como a escolha das soluções para melhoria da eficiência energética requer uma análise precisa de diferentes pontos de vista, como a preservação e os aspetos estéticos. Na verdade, este é um campo amplamente interdisciplinar no qual cada solução individual precisa de ser cuidadosamente avaliada, considerando as respetivas vantagens e desvantagens (L. Bellia *et al.*, 2015).

F. Ascione *et al.*, 2011 analisaram e simularam cinco medidas de reabilitação diferentes num edifício situado em Benevento, Itália: modificação das temperaturas internas, tanto no inverno como no verão; redução das trocas de ar (ventilação e infiltrações); aumento do isolamento térmico nas paredes; substituição da antiga caldeira por um aquecedor a gás; substituição das janelas.

Cada uma destas medidas contribuíram para a redução, de forma significativa, das necessidades energéticas. São alcançadas melhorias análogas no que diz respeito à redução das emissões poluentes do edifício. Por outro lado, a substituição das janelas, mesmo que induza a uma melhoria energética satisfatória, não é conveniente sob o ponto de vista económico (F. Ascione *et al.*, 2011).

Nestes estudos há duas razões principais pelas quais as pesquisas se concentram em edifícios históricos: em primeiro lugar, o património arquitetónico é conhecido como uma estrutura mais frágil nas políticas urbanas e em segundo lugar, como estes edifícios são geralmente bastante antigos, exigem intervenções para melhoria do seu desempenho (U. Munarim e E. Ghisi, 2016).

## **4 CASO DE ESTUDO**

### **4.1 Introdução**

Dado o elevado número de edifícios degradados, é fundamental a adoção de medidas de reabilitação sustentável nos já existentes. Os impactes ambientais, económicos e sociais têm grande influência na escolha das medidas de reabilitação sustentável e, conseqüentemente, no comportamento do edifício reabilitado.

A presente dissertação tem como principal objetivo a avaliação de várias alternativas de reabilitação selecionadas e estudadas. Pretende-se analisar o comportamento do edifício face às medidas aplicadas tanto em termos ambientais, como ao nível do comportamento térmico e eficiência energética do edifício, identificando as mais influentes.

### **4.2 Descrição do edifício**

O estudo foi realizado num edifício multifamiliar pertencente a um bairro social situado em Rione Luzzatti, em Nápoles, Itália. Foi projetado e construído entre 1946 e 1947. É representante dos primeiros exemplos ao nível de bairro social num contexto napolitano pós Segunda Guerra Mundial. Tal como referenciado, a habitação está inserida num bairro social com semelhanças a nível construtivo e estético, o que traduz uma série de restrições impostas tais como o volume, devido ao espaço existente, e a utilização de diferentes materiais que podem provocar uma significativa mudança estética, não estando em sintonia com o restante bairro.

A Figura 4.1 e Figura 4.2 apresentam imagens das fachadas e a Figura 4.3 apresenta a planta tipo de duas das residências do edifício em estudo.

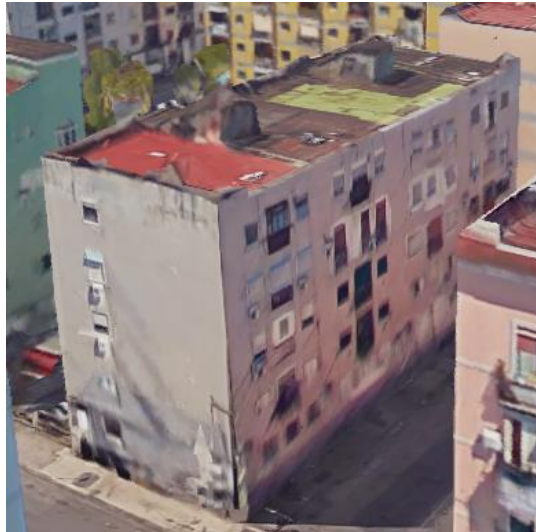


Figura 4.1 – Fachada a noroeste [google@  
(2017)]



Figura 4.2 – Fachada a sudeste [google@  
(2017)]

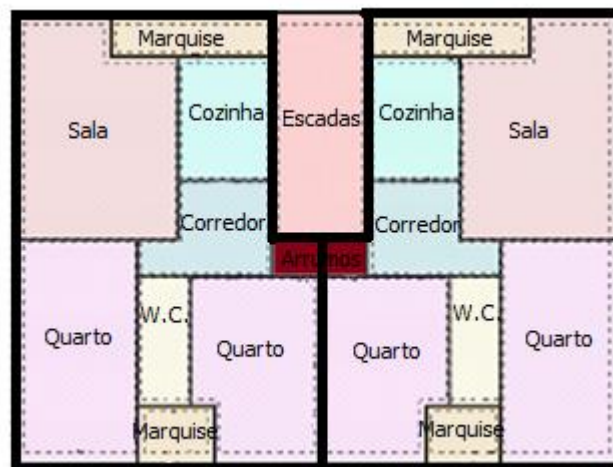


Figura 4.3 – Planta tipo de dois apartamentos do edifício

O edifício residencial possui cinco andares, incluindo o rés-do-chão. A cobertura é acessível. Cada piso tem quatro apartamentos iguais entre si.

Tratando-se de um edifício residencial, cada apartamento é constituído por uma cozinha, uma sala (incluindo sala de estar e de jantar), dois quartos, uma casa-de-banho (W.C.), um corredor, um local de arrumações e, finalmente, duas marquises. O acesso a cada residência é providenciado por uma caixa de escadas.

O Quadro 4.1 expõe as principais características e dimensões da construção.

Quadro 4.1 - Principais características e dimensões do edifício em estudo

<b>Número de pisos</b>	5
<b>Área por piso (m<sup>2</sup>)</b>	374.02
<b>Área das paredes exteriores (m<sup>2</sup>)</b>	1392.96
<b>Área das janelas (m<sup>2</sup>)</b>	99.26
<b>Altura de cada piso (m)</b>	3.2

A principal particularidade do edifício no seu estado inicial/atual é a existência de paredes exteriores de alvenaria, com 0.34 m de espessura, e respetiva estrutura em betão armado. As paredes interiores são integradas por tijolo simples com 0.07m de espessura, enquanto que as exteriores são constituídas por paredes duplas com tijolos de 0.11m e 0.15m de espessura.

As lajes de pavimento são aligeiradas em betão com espessura de 0.38 m. A cobertura é plana em laje de betão armado e com espessura de 0.34m.

As janelas possuem vidro simples com caixilharia em madeira. O vidro simples tem espessura de 6mm e o sistema de sombreamento é traduzido por uma caixa de estores colocados na parte exterior da janela.

### 4.3 Dados climáticos

#### 4.3.1 Classificação climática de Köppen-Geiger

Primeiramente foi publicado pelo russo Wladimir Koppen em 1884, tendo sofrido diversas alterações ao longo dos anos. (Peet *et al.*, 2007). Mais tarde, juntamente com o alemão Rudolf Geiger, o sistema foi atualizado tornando-se conhecido por classificação climática de Köppen-Geiger.

É um dos sistemas de classificação climática mais amplamente utilizado, baseado no princípio de que a vegetação natural pertencente a cada região no mundo expressa o clima nela prevalecente. O principal objetivo deste sistema é a conceção de fórmulas que definem fronteiras climáticas correspondentes às áreas associadas a uma determinada vegetação natural.

A classificação mencionada baseia-se na subdivisão climática em cinco grandes grupos: A, B, C, D e E. Cada grupo tem associado vários subgrupos. De uma visão simplificada, é apresentado o significado de cada grupo no Quadro 4.2: (Peel *et al.*, 2007)



Quadro 4.2 - Clima correspondente a cada grupo da classificação de Köppen-Geiger

<b>Grupo</b>	<b>Clima</b>
<b>A</b>	Clima tropical
<b>B</b>	Clima árido
<b>C</b>	Clima temperado
<b>D</b>	Clima continental
<b>E</b>	Clima glacial

Interessa conhecer a classificação climática da zona de Nápoles. Segundo a explicação anterior, Nápoles pertence ao grupo C ou seja, compreende um clima temperado. De um modo mais preciso, Nápoles pertence ao grupo C e ao subgrupo Csa referente ao clima temperado húmido com verão seco e quente.

Em harmonia com a elucidação preliminar, é exibida a Figura 4.4 correlacionada com o sistema de classificação climática em Nápoles.

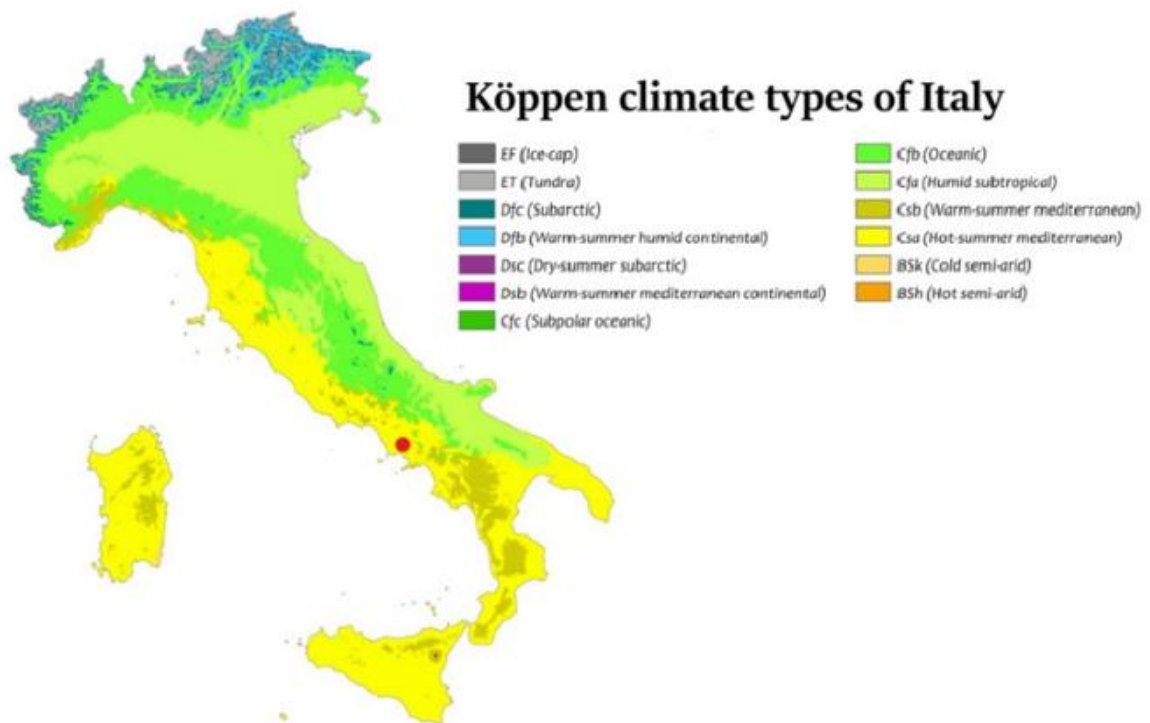


Figura 4.4 - Sistema climático de Köppen-Geiger aplicado em Itália (adaptado de Wikimedia@, 2017)

No presente estudo foram assumidas duas estações, a fria e a quente. A estação fria possui uma temperatura média de 11.53°C, englobando os meses de Outubro, Novembro, Dezembro, Janeiro, Fevereiro e Março. A estação quente contém uma temperatura média de 21.11°C, incluindo os meses de Abril, Maio, Junho, Julho, Agosto e Setembro.

#### 4.4 *DesignBuilder*

O software *DesignBuilder* é um programa de fácil utilização que fornece ferramentas avançadas para modelação de edifícios. Com a utilização do mesmo é possível o cálculo do consumo energético, da libertação de carbono, da iluminação e do conforto térmico, entre outros.

Visando a área da engenharia, as ferramentas fornecidas pelo programa *DesignBuilder* permitem a integração de sistemas mecânicos no projeto de edifícios sustentáveis. É, portanto, possível desenvolver projetos de construção de uma maneira apropriada e com adequada eficiência energética desde a sua conceção até à respetiva conclusão.

Para obtenção dos dados de desempenho energético do edifício, utiliza-se o algoritmo de simulação dinâmica denominado de *EnergyPlus*.

Tal como acontece como o *EnergyPlus*, o software *DesignBuilder* obedece a uma hierarquia de dados, ou seja, o modelo permite a troca de informações entre níveis de categorias superiores e inferiores, tornando a introdução dos dados mais rápida e confiável. A Figura 4.5 elucida a hierarquia de dados mencionada. (designbuildersoftware@, 2017)

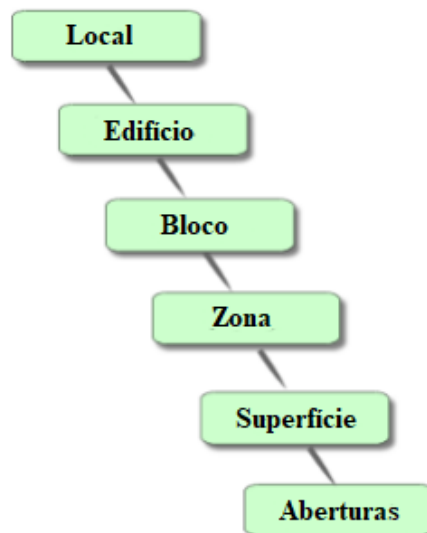


Figura 4.5 – Hierarquia de dados do DesignBuilder

As principais capacidades do software *DesignBuilder* são: (designbuilder@, 2017)

- Cálculo do consumo energético do edifício;
- Simulação térmica de edifícios com ventilação natural;
- Cálculo do aquecimento e arrefecimento associado a diversos equipamentos;
- Dimensionamento detalhado do sistema de ar-condicionado;
- Ferramenta de ensino para modelação de edifícios por arquitetos e engenheiros.

Posto isto, é necessário perceber os diferentes tipos de simulação energética. O *DesignBuilder* permite o desenvolvimento de quatro tipos de simulação energética: a simulação das necessidades de aquecimento e de arrefecimento, a simulação com base nas temperaturas reais e a simulação do indicador referente ao desempenho energético do edifício.

Em seguida é realizada uma breve definição das diferentes simulações de forma a facilitar uma maior compreensão dos resultados. A simulação do indicador referente ao desempenho energético do edifício não irá ser abordada pelo facto de se encontrar em desenvolvimento, estando, ainda, indocumentada.

A simulação das necessidades de aquecimento e arrefecimento é exercida para possibilitar a investigação do comportamento de um edifício face às condições climáticas extremas (condições de aquecimento ou arrefecimento, respetivamente), sendo que os resultados obtidos viabilizam o dimensionamento dos sistemas de aquecimento e/ou arrefecimento.

Os cálculos referentes à simulação das necessidades de aquecimento do edifício assumem as piores condições: não incluem os ganhos solares e os ganhos internos (iluminação, equipamentos, etc) e consideram que existe condução e convexão de calor entre as zonas com diferentes temperaturas.

Em relação à simulação das necessidades de arrefecimento, as condições são, de facto, diferentes, visto que, neste caso, as piores condições englobam os ganhos solares, os ganhos internos e a existência de processos de condução e convexão entre zonas com diferentes temperaturas. Para os edifícios situados no Hemisfério Norte, os cálculos das necessidades de arrefecimento são realizados para o mês de julho e para edifícios no Hemisfério Sul são realizados para o mês de janeiro.

Assim, para ambas as simulações, o processo continua até que as temperaturas ou os fluxos de calor em cada zona convirjam. Se a convergência não ocorrer, a simulação continua durante o número máximo de dias especificado nas opções de cálculo.

Finalmente, as perdas totais de calor e a carga máxima correspondente ao arrefecimento em cada zona são multiplicadas por um fator de segurança (1.5 e 1.3 definidos, respetivamente, no programa) para fornecer uma capacidade de aquecimento e arrefecimento recomendada.

Na presente dissertação, os cálculos e respetivos resultados são baseados na simulação com base nas temperaturas reais porque é a simulação mais completa, englobando todos os aspetos mencionados anteriormente para a simulação das necessidades de arrefecimento e aquecimento. Esta simulação possui, então, as seguintes características: (designbuildersoftware@, 2017)

- Considera a condução e a convecção de calor entre as zonas com diferentes temperaturas;
- Inclui os ganhos solares através das janelas
- Tem em conta as capacidades associadas aos equipamentos AVAC;
- Inclui um ou mais dias de “aquecimento” para assegurar uma correta distribuição do calor na massa térmica do edifício e no início da simulação.

Tal como acontece para a simulação das necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício, o processo continua até que as temperaturas ou o fluxo de calor em cada zona convirjam.

Os resultados estão compartimentados em diferentes grupos: no conforto térmico associado às diferentes temperaturas e à humidade relativa existente no interior do edifício; nos ganhos internos provenientes dos equipamentos, da iluminação, da ocupação, entre outros; na ventilação e estrutura do edifício; no consumo total de combustível e, finalmente, na produção de dióxido de carbono.

Para o estudo estar em sintonia com o objetivo da presente dissertação, apenas foram analisados as necessidades de calor sensível para aquecimento e arrefecimento, o consumo total de combustível e a produção de dióxido de carbono apresentados e discutidos no capítulo 5.

#### **4.4.1 Modelação do edifício e respetivas medidas de reabilitação**

##### **4.4.1.1 Conforto térmico e temperaturas consideradas**

De acordo com ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, o conforto térmico é definido como uma condição mental que permite a comodidade em relação à envolvente térmica, sendo conseguido através de uma avaliação subjetiva. Traduz-se como a satisfação em relação às condições térmicas envolventes, tornando-se crucial a sua consideração quando uma determinada construção é projetada para uso humano.

Para uma análise rigorosa foi necessário considerar as temperaturas de referência. As mesmas foram tidas em conta assumindo temperaturas base de 18°C e de 25°C para a estação de

aquecimento e de arrefecimento, respetivamente. As temperaturas base foram definidas para garantir as condições de conforto padrão mencionadas, tendo como referência o REH (Diretiva 2010/31/UE).

Existem seis fatores que têm grande influência no conforto térmico: a taxa metabólica, o isolamento relacionado com o vestuário, a temperatura do ar, a temperatura radiante, a velocidade do ar e, finalmente, a humidade relativa (emu@, 2017).

Posteriormente é apresentado o Quadro 4.3 onde é possível visualizar as temperaturas médias anuais referentes a todo o edifício, e respetiva definição, alusivas à situação inicial do edifício em estudo, ou seja, sem que as medidas de reabilitação sejam aplicadas.

Quadro 4.3 – Parâmetros condicionantes do conforto térmico referente à situação inicial do edifício em estudo

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Definição</b>
<b>Temperatura do ar (°C)</b>	21,66	Temperatura respeitante à temperatura interior da habitação.
<b>Temperatura radiante (°C)</b>	21,70	Temperatura superficial média dos elementos que envolvem o espaço.
<b>Temperatura operativa (°C)</b>	21,68	É a média entre a temperatura do ar e a temperatura média radiante.
<b>Temperatura de bulbo-seco (°C)</b>	16,33	Temperatura medida por um termómetro comum. É a temperatura associada ao exterior.
<b>Humidade relativa (%)</b>	52,21	Proporção de água que o ar contém.

#### 4.4.1.2 Isolamento térmico

Para uma eficiente medida de reabilitação, a envolvente do edifício, na maioria dos casos, deve ser bem isolada por forma a minimizar as perdas de calor na estação de aquecimento (inverno). A envolvente consiste no conjunto de elementos que separam o interior do edifício do ambiente exterior. O principal objetivo de um adequado isolamento térmico é proporcionar as condições de conforto térmico referidas previamente, minimizando o consumo de energia.

O isolamento térmico permite a redução de trocas de calor entre objetos em contato térmico. Um bom isolamento térmico pode ser conseguido através de variados processos ou métodos na área da engenharia ou com a utilização de adequados materiais através da perceção do comportamento energético do edifício a estudar. É, pois, um material de baixa condutibilidade

térmica utilizado para salvaguardar a envolvente contra as perdas ou ganhos de calor por condução.

Ao adicionar isolamento térmico, as perdas e ganhos de energia são reduzidos e, conseqüentemente, as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento diminuem, as pontes térmicas são diminuídas (se o isolamento for contínuo) e as infiltrações, as fugas de calor e as zonas de aparecimento de condensação são, conseqüentemente, minimizadas.

É de extrema importância a compreensão das pontes térmicas. São zonas de ligação entre diferentes elementos da envolvente de um edifício que, geralmente, se caracterizam por um aumento no fluxo de calor e, conseqüentemente, uma diminuição das temperaturas superficiais interiores responsável pela ocorrência de condensações. Segundo EN ISO 10211, as pontes térmicas fazem parte da envolvente do edifício onde a resistência térmica é significativamente alterada pela penetração total ou parcial da envolvente do edifício por materiais com uma condutibilidade térmica diferente e/ou pela mudança na espessura da estrutura, e/ou pela diferença entre as áreas internas e externas, como ocorre na união entre as paredes e as lajes (de pavimento e de teto).

Os fatores que mais influência têm sobre o desempenho energético são a condutibilidade térmica, emissividade da superfície, espessura do isolamento, densidade, capacidade calorífica específica, as pontes térmicas, compactidade do edifício, vãos envidraçados, eficiência dos equipamentos, ventilação, infiltração, entre outros (isover@, 2017).

Materiais com menor densidade são categorizados como melhores isolantes térmicos. Tal é explicado porque quanto maior for a sua densidade, mais próximos estarão os átomos constituintes, logo a transferência de calor de um átomo para o outro irá ser muito mais eficaz.

Cinco dos vários tipos de isolamentos mais comuns no mercado são: lã de vidro, lã de rocha, celulose, espuma de poliuretano e poliestireno (E. Utochkina, 2014).

Na presente dissertação apenas são considerados isolamentos térmicos do tipo poliestireno. Este isolante é uma espuma termoplástica impermeável que permite atingir patamares de grande satisfação. Divide-se em dois tipos de isolamentos: o poliestireno expandido (EPS) e o poliestireno extrudido (XPS).

Os dois tipos de isolamentos diferem ao nível do custo e do respetivo desempenho. A sua condutibilidade térmica ( $\lambda$ ) assumida para o presente estudo foi de 0.037 W/(mK) (LNEC, 2006).

A escolha do tipo de isolamento a adotar prende-se com vários fatores, como o espaço disponível, a sua resistência em relação à humidade ou, por exemplo, a facilidade de instalação.

Em relação aos benefícios, é preferível a utilização de isolantes menos densos e mais económicos do que isolantes mais densos e caros.

Não existindo isolamento térmico em toda a envolvente do edifício, em seguida são apresentados todos os isolamentos utilizados após reabilitação do edifício, tal como todos os materiais existentes *a posteriori* e *a priori* da reabilitação implementada nas paredes, na cobertura, no rés-do-chão, nas janelas e no sistema de aquecimento e/ou arrefecimento.

#### 4.4.1.2.1 Constituição das paredes

As paredes interiores constituintes do edifício foram definidas como paredes simples com 10cm de espessura. São constituídas por tijolo cerâmico furado com 7cm e com 1.5cm de reboco em ambas as faces (Figura 4.6). Estas não sofreram qualquer tipo de melhoria/alteração pelo facto de não terem grande impacto energético no edifício.

As paredes exteriores da estrutura inicial da habitação dispunham de 0.34m de espessura. Sendo paredes duplas, são constituídas por tijolo furado 15cm+11cm, com 5cm de caixa de ar e reboco de 1.5cm, conforme ilustrado na Figura 4.7.



Figura 4.6 - Seção transversal das paredes interiores



Figura 4.7 - Seção transversal das paredes duplas exteriores numa fase inicial

Grande parte dos edifícios consomem uma grande quantidade de energia. As paredes exteriores possuem uma grande área nos edifícios exposta ao exterior, contando, significativamente, para as suas perdas ou ganhos de calor. Um dos principais passos a adquirir para enfrentar esta situação é a aplicação de isolamento térmico nas paredes constituintes da sua envolvente.

É praticável a colocação de isolamento térmico pelo exterior ou pelo interior. Tanto uma como outra solução pelem os fluxos de calor indesejados.

Normalmente, em medidas de reabilitação implementadas, o critério de colocação de isolamento térmico passa pela aplicação externa. São várias as explicações que remetem para a aplicação de isolamento pela parte exterior do edifício. No Quadro 4.4 são expostas as características da aplicação interior ou exterior de isolamento.

Quadro 4.4 – Características da aplicação interior ou exterior de isolamento térmico (adaptado de thegreenage@, 2017)

<b>Isolamento térmico pelo interior</b>	<b>Isolamento térmico pelo exterior</b>
Instalação mais acessível em termos económicos	Instalação sem perturbações para os habitantes
Redução da área útil da habitação	Não interfere na área útil
Exige a remoção e a recolocação dos rodapés, interruptores, entre outros	Renova a aparência das paredes exteriores
	Melhora a impermeabilidade e a acústica
	Preenche fissuras e fendas existentes na alvenaria
	Aumento do tempo de vida das paredes
	Pode necessitar de permissão por parte do projetista
	Requer bons acessos às paredes exteriores
	Aplicação não recomendada se a estrutura das paredes for inadequada

Como na situação inicial as paredes exteriores não incluem qualquer isolamento térmico, o critério de reabilitação administrado passou pela colocação de isolamento térmico pelo exterior. O isolante escolhido foi o poliestireno expandido (EPS).

Posto isto, foi implementada a medida de reabilitação com a adição do isolamento térmico EPS com três espessuras distintas de 3cm, 6cm e 9cm para permitir uma melhor análise e comparação dos resultados. A Figura 4.8 exhibe a organização da parede depois de adicionado o isolamento.



5,00mm	Rede de polietileno(not to scale)
	Isolamento EPS
15,00mm	Argamassa reboco(not to scale)
150,00mm	Tij. 0.15
50,00mm	Caixa de ar
110,00mm	Tij. 0.11
15,00mm	Argamassa reboco(not to scale)

Figura 4.8 - Seção transversal das paredes duplas exteriores pós-reconstrução

O Quadro 4.5 expõe a condutibilidade térmica,  $\lambda$ , a resistência térmica,  $R$ , e a espessura,  $d$ , dos materiais constituintes das paredes.

Quadro 4.5 – Condutibilidade térmica,  $\lambda$ , a resistência térmica,  $R$ , e a espessura,  $d$ , dos materiais constituintes das paredes (LNEC, 2006)

Material	$d$ (m)	$\lambda$ (W/(mK))	$R$ (m <sup>2</sup> K/W)	Referência
Argamassa reboco	0,015	1,300	0,012	ITE_50, quadro I.2
Tijolo 0,07	0,070	0,368*	0,190	ITE50, quadro I.5
Tijolo 0,15	0,150	0,385*	0,390	ITE50, quadro I.5
Tijolo 0,11	0,110	0,407*	0,270	ITE50, quadro I.5
Acabamento do ETICS	0,005	0,700	0,007	<i>DesignBuilder</i>
EPS 3cm	0,030	0,037	0,811	ITE50, quadro I.1
EPS 6cm	0,060	0,037	1,622	ITE50, quadro I.1
EPS 9cm	0,090	0,037	2,432	ITE50, quadro I.1
Caixa de ar	0,050	0,278*	0,180	ITE50, quadro I.4

\*Condutibilidade térmica equivalente.

O coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) de um elemento construtivo constituinte das camadas homogéneas é calculado pela seguinte expressão:

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum_j R_j + R_{si}} \quad (4.1)$$

onde  $R_{se}$  é a resistência térmica superficial exterior (0,04 m<sup>2</sup>K/W),  $R_j$  é a resistência térmica da camada  $j$ , e  $R_{si}$  é a resistência térmica superficial interior (0,13 m<sup>2</sup>K/W).

A resistência térmica da camada  $j$  pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$R_j = \frac{d_j}{\lambda_j} \quad (4.2)$$

O Quadro 4.6 apresenta o valor  $U$  calculado com base nas fórmulas 4.1 e 4.2 das paredes exteriores antes e após reabilitação.

Quadro 4.6 – Valor de  $U$  das paredes exteriores antes e após reabilitação

Elemento	$U$ (W/(m <sup>2</sup> K))
Paredes exteriores antes da reabilitação	0,961
Paredes exteriores com 3cm de EPS	0,540
Paredes exteriores com 6cm de EPS	0,376
Paredes exteriores com 9cm de EPS	0,288

#### 4.4.1.2.2 Constituição dos pavimentos

Todos os pavimentos, à exceção do rés-do-chão, são constituídos por três camadas, nomeadamente: betão normal com 23cm de espessura, uma camada de betão leve com 10cm de altura e uma camada de linóleo com 0.32cm. A Figura 4.9 apresenta a seção transversal dos pavimentos de todos os pisos com exceção do rés-do-chão.

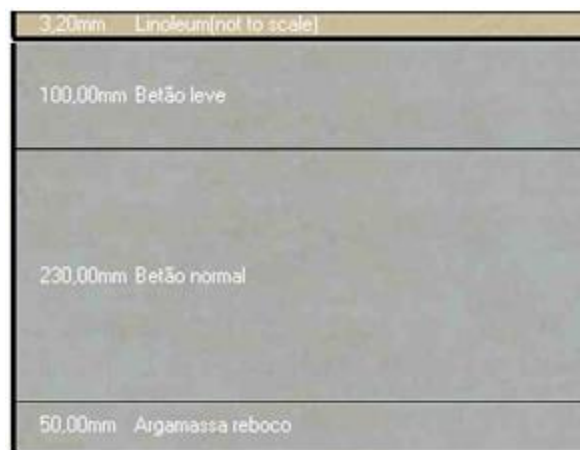


Figura 4.9 - Seção transversal dos pavimentos

Em relação ao rés-do-chão, a situação é, de facto, diferente. Na situação inicial, o pavimento pertencente ao piso 0 é composto pelas mesmas camadas dos restantes pavimentos com a existência de uma camada impermeabilizante, tela betuminosa, com 1.5cm de espessura.

É fundamental que os edifícios contenham uma camada de impermeabilização para impedir a infiltração de água e para proporcionar a sua adequada drenagem.

A medida de reabilitação implementada passou pela introdução de isolamento térmico. Tal como na cobertura, o isolamento escolhido foi o poliestireno extrudado (XPS). As capacidades benéficas que este isolante acarreta justificaram a sua instalação, nomeadamente uma resistência mecânica muito superior ao EPS.

A sua instalação pode ser efetuada acima ou abaixo da laje. A colocação acima da laje faz com que a resposta do sistema de aquecimento do edifício seja muito mais rápida (menor inércia térmica), enquanto que abaixo da laje a capacidade térmica é ampliada, ou seja, as temperaturas internas são mantidas com maior facilidade (maior inércia térmica).

Como medida de reabilitação, propõe-se a colocação do isolamento sobre a laje porque, caso contrário, teria que se retirar a laje existente, tornando-se uma medida de reabilitação mais difícil e onerosa. O maior inconveniente prende-se com o facto de ao adicionar isolamento térmico sobre a laje, é necessário retirar a camada de linóleo e todos os objetos presentes no rés-do-chão.

A Figura 4.10 expõe a seção transversal do pavimento ao nível do rés-do-chão, enquanto que a Figura 4.11 apresenta a seção transversal do rés-do-chão após executada a medida de reabilitação referida.



Figura 4.10 - Seção transversal do rés-do-chão original



Figura 4.11 - Seção transversal do rés-do-chão pós-reabilitação

O Quadro 4.7 expõe a condutibilidade térmica,  $\lambda$ , a resistência térmica, R, e a espessura, d, dos materiais constituintes do pavimento.

Quadro 4.7 – Condutibilidade térmica,  $\lambda$ , resistência térmica,  $R$ , e espessura,  $d$ , dos materiais constituintes do pavimento do rés-do-chão (LNEC, 2006)

<b>Material</b>	<b><math>d</math> (m)</b>	<b><math>\lambda</math> (W/(mK))</b>	<b><math>R</math> (m<sup>2</sup>K/W)</b>	<b>Referências</b>
Pavimento aligeirado	0,230	1,278*	0,180	ITE_50, quadro I.8
Linóleo	0,0032	0,170	0,019*	ITE_50, quadro I.2
Tela betuminosa	0,015	0,230	0,065*	ITE_50, quadro I.2
Betão leve	0,100	0,200	0,500*	ITE_50, quadro I.2
XPS 3cm	0,030	0,037	0,811*	ITE_50, quadro I.1
XPS 6cm	0,060	0,037	1,622*	ITE_50, quadro I.1
XPS 9cm	0,090	0,037	2,432*	ITE_50, quadro I.1
Argamassa reboco	0,050	1,300	0,038*	ITE_50, quadro I.2

\* Condutibilidade térmica equivalente.

Sabendo que a resistência térmica superficial exterior assume o valor de 0,04 m<sup>2</sup>K/W e que a resistência térmica superficial interior toma o valor de 0,17 m<sup>2</sup>K/W, o Quadro 4.8 exhibe os valores  $U$  do pavimento do rés-do-chão antes e após reabilitação.

Quadro 4.8 – Valores de  $U$  do pavimento do rés-do-chão antes e após reabilitação

<b>Elemento</b>	<b><math>U</math> (W/(m<sup>2</sup>K))</b>
Pavimento R/C antes da reabilitação	1,061
Pavimento R/C com 3cm de XPS	0,570
Pavimento R/C com 6cm de XPS	0,390
Pavimento R/C com 9cm de XPS	0,296

#### 4.4.1.2.3 Constituição da cobertura

A cobertura classificada como plana e acessível, contém apenas uma inclinação mínima para facilitar o escoamento das águas pluviais e a sua estanquidade. Tal como todos os restantes constituintes do edifício, não acomoda qualquer tipo de isolamento térmico.

Com uma espessura total de 29,5cm, é estruturada em três camadas, sendo estas: betão normal com 23cm de espessura, uma camada de impermeabilização (tela betuminosa) com 1.5cm e acabamento em gravilha com 5cm de altura.

Ao instalar isolamento térmico numa cobertura de um edifício já existente, é promovida uma diferença significativa ao nível do conforto térmico e no desempenho energético, podendo

diminuir substancialmente o consumo de energia. Colocar isolamento térmico em coberturas planas e acessíveis, como é o presente caso, é uma das medidas de reabilitação mais viáveis.

O isolamento térmico numa cobertura pode ser aplicado por baixo ou por cima da camada de impermeabilização, formando uma cobertura convencional ou invertida, respetivamente. A cobertura mais utilizada hoje em dia é a cobertura invertida, contendo maior número de benefícios comparativamente à cobertura convencional, incluindo a proteção da tela de impermeabilização de elevadas variações de temperatura.

No Quadro 4.9 são discriminadas as vantagens do sistema invertido e desvantagens do sistema convencional.

Quadro 4.9 – Características da cobertura invertida e convencional  
(adaptado de projetista@, 2017)

<b>Cobertura invertida</b>	<b>Cobertura convencional</b>
O sistema de impermeabilização desempenha o papel de barreira pára-vapor	O sistema de impermeabilização fica sujeito ao choque térmico
O isolamento térmico pode ser aplicado sob quaisquer condições meteorológicas, o que permite rapidez na execução	Danos mecânicos na camada de impermeabilização
Facilidade e rapidez de aplicação do isolamento permitindo economizar a mão-de-obra	Degradação da camada de impermeabilização por radiação ultravioleta
Acesso à impermeabilização está facilitado, o que representa uma vantagem em situações de reparação	Degradação do isolamento térmico provocado pela humidade proveniente das chuvas ou da parte inferior da camada de impermeabilização

A cobertura invertida tem inúmeras vantagens o que suporta a adoção deste tipo de sistema. Como medida de reabilitação é, também, mais benéfica pela não interferência com a camada impermeabilizante.

Desta forma, o material definido para implementação no edifício residencial foi o poliestireno extrudido (XPS). É um excelente isolante porque mantém as suas qualidades de isolamento térmico mesmo que esteja em contacto com a água.

Para comparação de resultados, diferentes espessuras de isolamento térmico foram consideradas: 3cm, 6cm e 9cm. A Figura 4.12 identifica estruturalmente a cobertura inicial existente enquanto que a Figura 4.13 revela a constituição da cobertura invertida depois da aplicação da medida de reabilitação mencionada.



Figura 4.12 - Seção transversal da cobertura numa fase inicial



Figura 4.13 - Seção transversal da cobertura invertida pós-reabilitação

O Quadro 4.10 apresenta as propriedades térmicas e geométricas dos materiais constituintes da cobertura.

Quadro 4.10 – Condutibilidade térmica,  $\lambda$ , a resistência térmica,  $R$ , e a espessura,  $d$ , dos materiais constituintes da cobertura (LNEC, 2006)

Material	$d$ (m)	$\lambda$ (W/(mK))	$R$ (m <sup>2</sup> K/W)	Referências
Pavimento aligeirado	0,230	1,278*	0,180	ITE_50, quadro I.8
Tela betuminosa	0,015	0,23	0,065	ITE_50, quadro I.2
XPS 3cm	0,030	0,037	0,811	ITE_50, quadro I.1
XPS 6cm	0,060	0,037	1,622	ITE_50, quadro I.1
XPS 9cm	0,090	0,037	2,432	ITE_50, quadro I.1
Gravilha	0,050	2,000	0,025	ITE_50, quadro I.2
Argamassa reboco	0,050	1,300	0,038	ITE_50, quadro I.2

\* Condutibilidade térmica equivalente.

Tendo em conta as fórmulas 4.1 e 4.2, e sabendo que a resistência térmica superficial exterior assume o valor de 0,04 m<sup>2</sup>K/W e que a resistência térmica superficial interior toma o valor de 0,10 m<sup>2</sup>K/W, o Quadro 4.11 exhibe os valores U da cobertura antes e após reabilitação.

Quadro 4.11 – Valores de U da cobertura antes e após reabilitação

<b>Elemento</b>	<b>U (W/(m<sup>2</sup>K))</b>
Cobertura antes da reabilitação	2,229
Cobertura com 3cm de XPS	0,794
Cobertura com 6cm de XPS	0,483
Cobertura com 9cm de XPS	0,347

#### 4.4.1.3 Janelas

As janelas são aberturas existentes nos edifícios, permitindo tanto a entrada de ar e luz, como a possibilidade da visibilidade para o exterior. São, também, muito importantes em termos arquitetónicos, acrescentando beleza ao edifício.

Para escolher determinada janela é necessário ter em conta diferentes aspetos, tais como, a localização, orientação, tamanho e utilização do compartimento onde se pretende colocar a janela, a direção do vento, o clima e os fatores arquitetónicos.

Em relação à classificação, as janelas podem ser classificadas de acordo com o seu material e configuração. Em relação ao material as janelas podem ser constituídas por vidro simples, duplo ou triplo com diferentes emissividades e por diversas caixilharias, tais como caixilharias em PVC, em alumínio e em madeira. Por outro lado, a configuração das janelas está relacionada com o facto de estas poderem ser fixas, deslizantes e dobradas, podendo conter diferentes sistemas de sombreamento.

A eficiência energética dos edifícios pode ser amplamente melhorada através do restauro das janelas com algumas anomalias ou até da sua substituição por janelas com características mais adequadas para obter um maior conforto térmico. Não só o desempenho energético pode ser melhorado, como também o aspeto visual das janelas do edifício e, até mesmo, o valor da habitação no mercado.

No presente caso de estudo, as janelas são deslizantes em vidro simples. A estratégia de reabilitação passou pela substituição das janelas existentes, incluindo a caixilharia.

##### 4.4.1.3.1 Vidro constituinte das janelas

Numa fase inicial, as janelas pertencentes ao edifício residencial eram constituídas por vidro simples com 6mm de espessura. O coeficiente de transmissão térmica (U) tomava o valor de 5.778 W/(m<sup>2</sup>K).

Quanto menor o valor de U, mais vantajosas serão as características do material em estudo dado que U simboliza o fluxo de calor que atravessa 1m<sup>2</sup> de superfície para uma diferença de temperatura 1 Kelvin entre o interior e o exterior.

A utilização de vidros simples ou duplos está diretamente relacionada com a quantidade de luz solar filtrada podendo fazer a diferença ao nível do custo afiliado à energia e ao nível do conforto térmico e acústico. A possibilidade de utilização de vidros triplos também é válida. O Quadro 4.12 elucida as vantagens e desvantagens dos três tipos de vidros nomeados.

Quadro 4.12 – Características dos diferentes tipos de vidro aplicado em janelas  
(adaptado de araluminios@, 2017)

<b>Vidro simples</b>	<b>Vidro duplo</b>	<b>Vidro triplo</b>
Baixa capacidade de isolamento térmico	Boa capacidade de isolamento térmico	Excelente capacidade de isolamento térmico
Custo reduzido	Excelente capacidade de isolamento acústico	Excelente conforto térmico no Verão
A longo termo o custo pode-se tornar um entrave devido ao consumo energético	Bom conforto térmico ao longo do ano	Economia no aquecimento da habitação
Mau isolante acústico	Boa transmissão de luz solar	Peso excessivo
Material leve		Baixa capacidade de transmissão de luz solar
		Baixo conforto térmico no Inverno
		Isolamento acústico mediano

A principal medida de reabilitação empregue passou pela substituição das janelas com vidro simples por janelas com vidro duplo. A nova janela contém uma seção transversal composta por dois painéis de vidro com 6mm cada, separados por uma seção preenchida com ar com 13mm de espessura. O coeficiente de transmissão térmica deste vidro duplo toma o valor de  $2.665 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Para além das janelas com o vidro duplo referido, foi também estudada a utilização de argon a preencher o espaço entre os dois painéis de vidro.

#### **4.4.1.3.2 Caixilharia**

As janelas originais possuem caixilharia em madeira. A caixilharia é um aspeto muito importante a ter em conta quando se pretende escolher um determinado tipo de janelas. São o



seu suporte principal, garantindo a sua durabilidade. Antes de decidir qual vidro utilizar é fundamental definir a respetiva caixilharia.

Existem diferentes tipos de caixilharia, entre eles a caixilharia em madeira, em alumínio (com e sem corte térmico) ou em PVC.

As caixilharias em madeira têm sido utilizadas durante muitos anos e, durante a evolução dos tempos, continuam a demonstrar excelentes capacidades. A sua grande desvantagem prende-se com o facto de ser muito caro comparativamente com as outras soluções, requerendo alguma manutenção.

As caixilharias em alumínio são as caixilharias mais utilizadas atualmente, com um custo significativamente mais reduzido do que a madeira e não exigem manutenção cuidada. O inconveniente passa pela necessidade de limpeza e pela formação de condensações superficiais. Podem ter corte térmico ou não, sendo a primeira hipótese mais vantajosa.

Contrariamente ao que acontece com a caixilharia em madeira, a caixilharia em PVC não exige manutenção especializada. É um excelente isolante térmico e acústico tornando-se numa opção muito viável. A sua grande desvantagem em relação à caixilharia em alumínio está relacionada com o custo, sendo mais dispendioso.

Várias simulações foram realizadas para permitir a perceção de qual caixilharia seria a mais eficiente em termos energéticos e ambientais, isto é, perceber se a melhor solução passa pela manutenção da caixilharia existente ou pela substituição por outra.

O Quadro 4.13 apresenta o valor U para as diferentes caixilharias.

Quadro 4.13 – Valor de U para as diferentes caixilharias

<b>Elemento</b>	<b>U (W/(m<sup>2</sup>K))</b>
Caixilharia Madeira	3,633
Caixilharia Alumínio sem corte térmico	4,719
Caixilharia Alumínio com corte térmico	5,881
Caixilharia PVC	3,476

#### **4.4.1.3.3 Sombreamento**

No edifício original as janelas são providas de estores exteriores.

Todas as janelas têm capacidade de permitir a passagem de calor proveniente do sol para o interior das habitações. É, portanto, importante proteger as mesmas através de sistemas de sombreamento eficientes.

Os sistemas de sombreamento viabilizam a redução do consumo energético associado ao arrefecimento do espaço e a consequente redução na fatura energética, a diminuição do desgaste dos móveis no interior da habitação, o aumento do conforto térmico e o controlo da luminosidade.

Os sistemas de sombreamento podem ser colocados no exterior ou interior da janela. É necessário optar por um sistema que permita a recolha do dispositivo durante o Inverno para aumentar os ganhos solares para o interior do edifício.

As janelas são, habitualmente, a maior fonte de sobreaquecimento de um edifício durante o Verão, influenciando grandemente os sistemas de ar-condicionado existentes. Ao conseguir reter o calor solar antes da penetração das janelas através de dispositivos de sombreamento, a sua eficiência aumenta significativamente em relação aos dispositivos de sombreamentos colocados no interior da janela. Os sistemas de sombreamento aplicados no exterior podem permitir o bloqueio dos ganhos solares em 95%, enquanto que ao ser aplicados pelo interior, o bloqueio dos raios solares é cerca de 65% (energydepot@, 2017).

A estratégia adotada passou pela manutenção do sistema de sombreamento (tipo estore) colocado na parte exterior da janela.

#### 4.4.1.4 Portas

Não foi aplicada qualquer medida de melhoria nas portas existentes por se perceber que num edifício provido de tantos andares e janelas, as perdas ou ganhos de calor não são predominantemente influenciados pela melhoria das portas interiores e de entrada nos apartamentos.

O Quadro 4.14 apresenta os materiais e as espessuras pertencentes às portas exteriores (Portas exteriores), às portas que dividem as diferentes divisões (Portas interiores) e, finalmente, às portas que permitem acesso a cada habitação (Portas entrada).

Quadro 4.14 – Material, espessura e dimensão das portas

<b>Designação</b>	<b>Material</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Dimensões (m)</b>
Portas exteriores	Ferro	0,035	2,20 por 1,70
Portas interiores	Semidensa	0,035	2,10 por 0,90
Portas de entrada	Madeira densa	0,035	2,10 por 1,00

#### 4.4.1.5 Sistemas de aquecimento e/ou arrefecimento

O edifício original possui um sistema de aquecimento constituído por radiadores elétricos.

Os radiadores não só fornecem calor radiante como também calor por convecção. São uma pertinente solução pela sua simplicidade e pela facilidade de colocação onde exista dificuldade de aplicação/utilização de canalização, por exemplo para circulação de água quente.

Os sistemas de ar-condicionado permitem aquecer o edifício durante o Inverno e arrefecer durante o Verão, mantendo o conforto térmico em ambas as estações. São constituídos por três componentes base: a fonte de aquecimento e/ou arrefecimento do fluido líquido à base de glicol, um meio para distribuição do fluido referido para os compartimentos e um sistema de regulação de temperatura.

Todos os equipamentos destinados ao aquecimento e arrefecimento consomem combustível. O combustível consumido pode ser gás, óleo ou eletricidade. Conforme o combustível é despendido, o calor é produzido para aquecer e arrefecer o espaço pretendido.

Os principais tipos de aquecimento dividem-se em três grupos: aquecimento elétrico, hidráulico e ar-condicionado. O Quadro 4.15 explicita as suas vantagens e desvantagens.

Quadro 4.15 – Vantagens e desvantagens dos principais tipos de aquecimento  
(adaptado de solarwaters@ 2017)

<b>Aquecimento elétrico</b>	<b>Aquecimento hidráulico</b>	<b>Ar-condicionado</b>
Instalação simples e económica	Instalação mais complexa e dispendiosa	Solução económica
Elevados custos de exploração	Quando associado com outras fontes de calor, os custos de exploração são baixos	Grande capacidade de aquecimento e arrefecimento
Originam gradientes de calor conforme a distância		Exigem cuidados de manutenção

O sistema de aquecimento quando combinado com outros sistemas pode dar origem ao sistema AVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado).

A ventilação é a introdução, de uma forma intencional, do ar exterior para o interior, proporcionando a sua qualidade através da diluição ou, até, da eliminação das impurezas presentes no ar e da respetiva desumidificação (Hussain *et al.*,2006). É categorizada em ventilação natural e mecânica.

Como o próprio nome indica, a ventilação natural é consentida por meios naturais como, por exemplo, a abertura de uma janela. A ventilação mecânica é adquirida por meios mecânicos como, por exemplo, a utilização de uma ventoinha.

Contrariamente à ventilação, a infiltração de ar sucede de uma forma não intencional, ocorrendo predominantemente através de fendas/frinchas que possam existir no edifício. A sua redução pode aumentar significativamente os ganhos energéticos.

Na presente análise, a ventilação considerada foi a ventilação natural e a infiltração de ar tomou o valor de 0.6 renovações de ar por hora (DDEE, 2010). No modelo *DesignBuilder*, a infiltração do ar ocorre durante todo o dia, enquanto que a ventilação natural apenas ocorre consoante a ocupação dos habitantes, conforme irá ser explicado posteriormente.

Com o sistema AVAC é possível garantir o conforto térmico e uma ótima qualidade do ar no interior da habitação. É, portanto, um sistema muito importante para todo o tipo de edifícios, desde os destinados a habitação, a edifícios industriais onde a importância do conforto térmico também esteja presente.

A estratégia de reabilitação passou pela substituição do sistema de aquecimento existente, os radiadores, pelo sistema AVAC, com ventilação natural e com capacidade de aquecimento e arrefecimento proveniente do sistema de ar-condicionado do tipo Split.

O sistema de ar-condicionado funciona como um sistema independente de divisão para divisão, ou seja, é possível ativar o mesmo apenas na(s) divisão(ões) que o proprietário achar pertinente. É bastante vantajoso em termos económicos devido à elevada eficiência energética que este sistema proporciona.

O controlo da humidade e o aquecimento das águas sanitárias foram parâmetros não contabilizados por estarem fora dos objetivos da presente dissertação.

Para uma boa análise do equipamento em estudo é fundamental conhecer o respetivo COP (*coefficient of performance*) ou eficiência do sistema. Quanto maior for o COP, menor serão os custos associados à utilização do equipamento.

Em relação ao ar-condicionado considerado, o COP toma o valor de 4 para o aquecimento e de 3 para o arrefecimento, enquanto que para os radiadores elétricos o COP toma o valor de 1. Ao assumir o valor de 1, o aparelho converte na totalidade toda a energia em calor. Tomando o valor de 4, o aparelho fornece ou retira (dependendo se a sua finalidade é para aquecimento ou para arrefecimento, respetivamente) 4 unidades de calor por cada unidade de energia consumida.

Tal como acontece na ventilação natural, o sistema de ar-condicionado está dependente do horário de ocupação dos habitantes do edifício em estudo, que irá ser explicado posteriormente.

#### **4.4.1.6 Horários de ocupação e funcionamento**

O horário de ocupação e funcionamento foi definido consoante a ocupação dos residentes, ou seja, foi definido consoante o horário e os dias úteis, tendo em conta os fins-de-semana.

O programa *DesignBuilder* contém uma base de dados que definem os horários de ocupação e funcionamento de cada divisão: casa de banho, sala de estar, cozinha, quarto, corredor, marquise, arrumos e escadas. Cada uma destas divisões tem um horário de funcionamento que influencia a atividade do sistema de ar-condicionado e da iluminação.

A iluminação não foi contabilizada por não se enquadrar no principal objetivo da presente dissertação.

As divisões pertencentes às escadas e aos arrumos foram programadas como “*semi-exterior unconditioned*”, ou seja, são zonas que não são aquecidas ou arrefecidas (espaços não condicionados), não interferindo diretamente nos resultados obtidos em termos energéticos.

## 5 ANÁLISE PARAMÉTRICA

### 5.1 Introdução

No programa utilizado, *DesignBuilder*, foram definidos critérios para obtenção de diversas medidas de reabilitação. Primeiramente, foi prevista uma análise prévia a fim de detetar eventuais lacunas no modelo. A análise referida teve como base a comparação de diferentes variáveis tais como a existência ou não de sombreamento e de ventilação natural. Posteriormente efetuou-se a avaliação/comparação de várias alternativas de reabilitação constituídas por dissemelhantes tipos de isolamento térmico em distintos elementos constituintes do edifício, diferentes tipos de vidros utilizados e a introdução de um sistema de ar-condicionado com e sem capacidade de arrefecimento. No Quadro 5.1 constam as medidas estudadas.

Quadro 5.1 - Medidas de reabilitação estudadas

Nomenclatura	Sombreamento	Ventilação natural
<b>“No shading + no natural ventilation” (análise prévia)</b>	Não	Não
<b>“No shading + natural ventilation” (análise prévia)</b>	Não	Sim
<b>“Shading + no natural ventilation” (análise prévia)</b>	Sim	Não
<b>“Shading + natural ventilation” (análise prévia)</b>	Sim	Sim
<b>Isolamento na cobertura</b>	Sim	Sim
<b>Isolamento nas paredes exteriores</b>	Sim	Sim
<b>Isolamento no pavimento R/C</b>	Sim	Sim
<b>Vidro duplo c/ caixilharia em alumínio com corte térmico</b>	Sim	Sim
<b>Ar condicionado s/ arrefecimento</b>	Sim	Sim
<b>Ar condicionado c/ arrefecimento</b>	Sim	Sim

Depois de analisados todos os resultados relativos a cada uma das medidas, foram também realizados estudos das combinações entre as soluções referidas.

Antes da interpretação dos resultados, é necessário perceber os três parâmetros base em estudo: necessidades de aquecimento/arrefecimento sensível, consumo de combustível e produção de dióxido de carbono.

As necessidades de aquecimento (ZSH – “Zone Sensible Heating”) e/ou arrefecimento sensível (ZSC – “Zone Sensible Cooling”) traduzem-se como as quantidades de calor que é necessário

fornecer ou remover do edifício, respetivamente, para manter a temperatura de conforto no seu interior. Quanto menor for este valor, maior será a eficiência da solução de reabilitação encontrada.

Como o próprio nome indica, o consumo de combustível representa a quantidade de combustível (ou energia final) gasto para fornecer as condições de conforto à habitação. Quanto menor, melhor será a medida de reabilitação encontrada.

Finalmente, o parâmetro tido em conta designa-se pela produção de CO<sub>2</sub>. Os benefícios a nível ambiental são tanto maiores, quanto menor for a sua produção.

Os três parâmetros mencionados estão relacionados entre si, ou seja, quanto maior for o consumo anual de combustível, maior serão as produções anuais de dióxido de carbono e as necessidades de aquecimento e/ou arrefecimento sensível.

## 5.2 Análise prévia

Antes de realizar o estudo das diferentes soluções de reabilitação apresentadas anteriormente, foi necessário efetuar uma análise prévia. Esta análise teve como base a presença ou ausência de sombreamento e de ventilação natural.

Os resultados foram interpretados de forma a que fosse possível a perceção da correta calibração do modelo. A Figura 5.1 apresenta o consumo energético para todo o edifício e a Figura 5.2 exhibe a produção de dióxido de carbono.

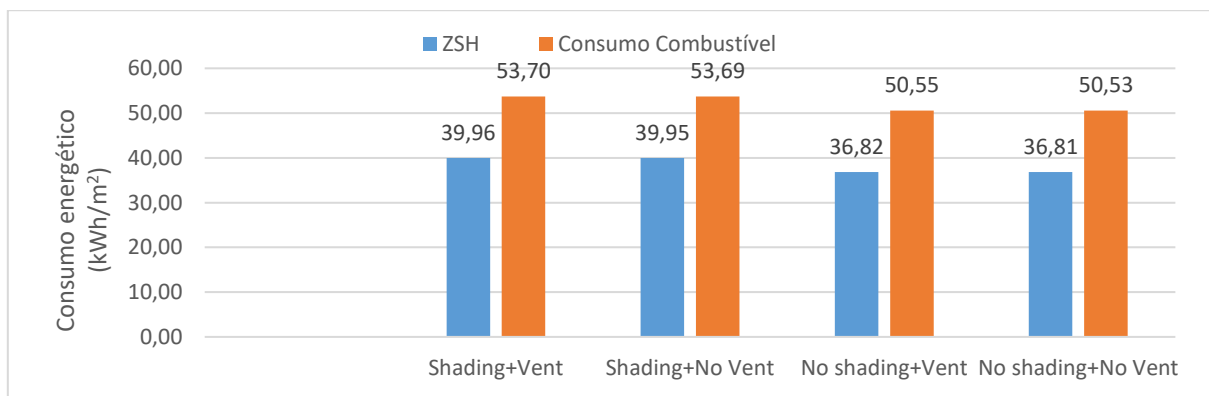


Figura 5.1 - Resultados da análise prévia em kWh/m<sup>2</sup>

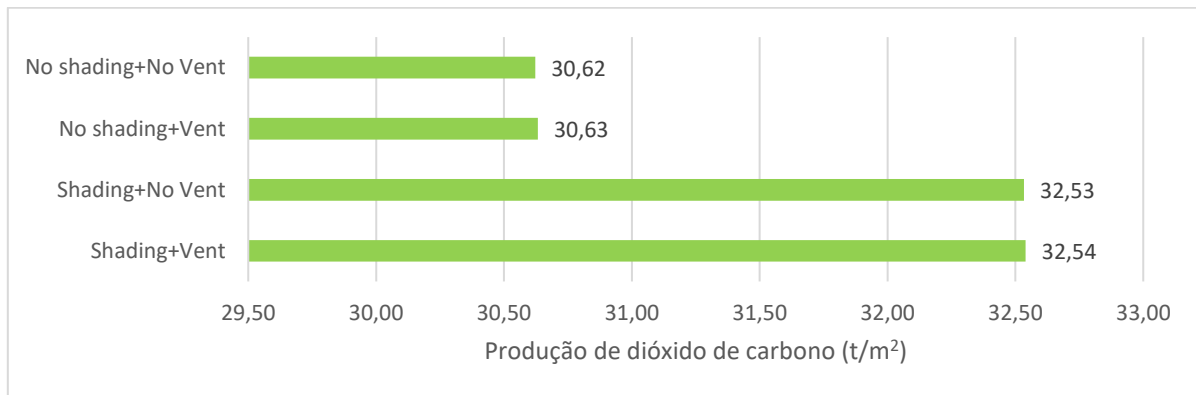


Figura 5.2 - Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) da análise prévia

A presença ou a ausência de sombreamento e de ventilação afetam diretamente os resultados energéticos. Apesar de pequenas, as variações nos resultados ocorrem.

Para o mesmo edifício, a sua necessidade de aquecimento é inferior 7.90% e o consumo de combustível e a produção de CO<sub>2</sub> é inferior 5.89% para uma situação sem ventilação e sombreamento comparativamente ao edifício provido de ventilação e de sombreamento.

Não existindo ventilação não ocorrem trocas de ar entre o interior e o exterior do edifício. Consequentemente, não há perdas de calor por ventilação e, portanto, a energia necessária para aquecimento dos espaços interiores irá ser inferior.

O sistema de sombreamento protege as janelas dos raios solares, não permitindo o aumento da temperatura interior no Verão. O aumento da temperatura necessário para alcançar o conforto térmico no Inverno é compensado por outros mecanismos internos como, por exemplo, o aquecimento por parte dos radiadores. Esta compensação traduz um maior consumo energético e uma maior produção de dióxido de carbono durante o Inverno. Os resultados apresentados estão relacionados com a média anual.

Visto que o COP dos radiadores elétricos é igual à unidade, era espectável que o consumo de combustível e as necessidades de aquecimento sensível tomassem valores iguais. Tal acontece porque o consumo de combustível total é igual ao somatório das necessidades de aquecimento sensível e do consumo elétrico por parte dos diversos equipamentos constituintes do edifício.



## 5.3 Influência do isolamento térmico

### 5.3.1 Paredes

Como referido em 4.4.1.2.1, uma das soluções para reabilitação do presente edifício passou pela introdução de isolamento térmico nas paredes duplas exteriores. O isolamento escolhido foi o poliestireno expandido (EPS) aplicado pelo exterior.

Diferentes espessuras de isolamento térmico foram analisadas para tornar possível a perceção da influência do mesmo no consumo energético, na necessidade de aquecimento e na consequente produção de dióxido de carbono. As espessuras consideradas foram de 3cm, 6cm e 9cm. A

Figura 5.3 expõe o consumo de combustível e as necessidades anuais de consumo de calor (sensível) e a Figura 5.4 indica a produção de CO<sub>2</sub> para uma situação desprovida da aplicação de isolamento e para mais três cenários com as diferentes espessuras de isolamento térmico.

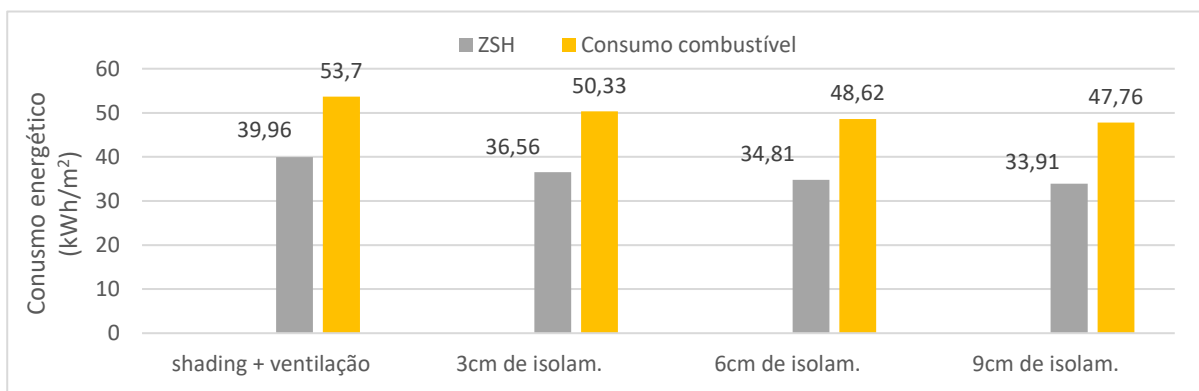


Figura 5.3 - Consumo energético em kWh/m<sup>2</sup> para diferentes espessuras de isolamento térmico nas paredes exteriores

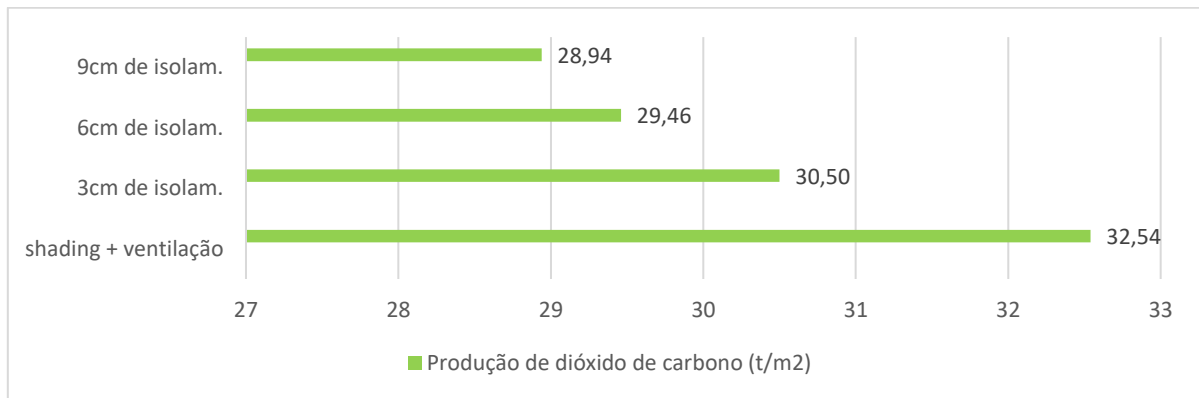


Figura 5.4 - Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) para diferentes espessuras de isolamento térmico nas paredes

Com o aumento da espessura do isolamento, os consumos energéticos diminuem e, por conseguinte, a produção de CO<sub>2</sub> também. Em percentagem, a diminuição de consumo combustível para o mesmo edifício com 3cm de espessura de EPS é cerca de 6.26%. Para 6cm de espessura existe uma diminuição de 9.45% e para 9cm de espessura é cerca de 11.06%. Como a produção de CO<sub>2</sub> está diretamente relacionada com o consumo energético (menor consumo, menor produção de dióxido de carbono), os valores percentuais tomam o mesmo significado.

Relativamente às necessidades de calor, existe, também, uma redução com o incremento da espessura de isolamento térmico. Para os isolamentos com 3cm, 6cm e 9cm de espessura ocorrem diminuições na ordem dos 8.51%, 12.59% e 15.14%, respetivamente.

As reduções poderão ser de uma ordem de grandeza superior com a introdução de isolamento térmico nas paredes pertencentes aos pisos intermédios. O Quadro 5.2 apresenta os valores, em percentagem, das necessidades de aquecimento do edifício para o segundo piso.

Quadro 5.2 – Diferença percentual das necessidades de aquecimento para o 2º piso

	Espessura de isolamento		
	3cm	6cm	9cm
<b>Diferença percentual (%)</b>	14,57	21,88	25,78

As necessidades de calor diminuem em maior quantidade ao analisar apenas o segundo piso, confirmando o maior impacto da aplicação de isolamento nas paredes nos pisos intermédios.

### 5.3.2 Pavimento térreo

Uma das medidas de reabilitação passou pela aplicação de isolamento no pavimento do rés-do-chão por ser neste piso que existem trocas de calor (usualmente perdas) entre o interior do edifício e o solo.

A aplicação do poliestireno extrudado (XPS) ocorreu sobre a laje existente com espessuras variadas: 3cm, 6cm e 9cm. A Figura 5.5 expõe o consumo energético em kWh/m<sup>2</sup> e a Figura 5.6 denota a produção de dióxido de carbono.

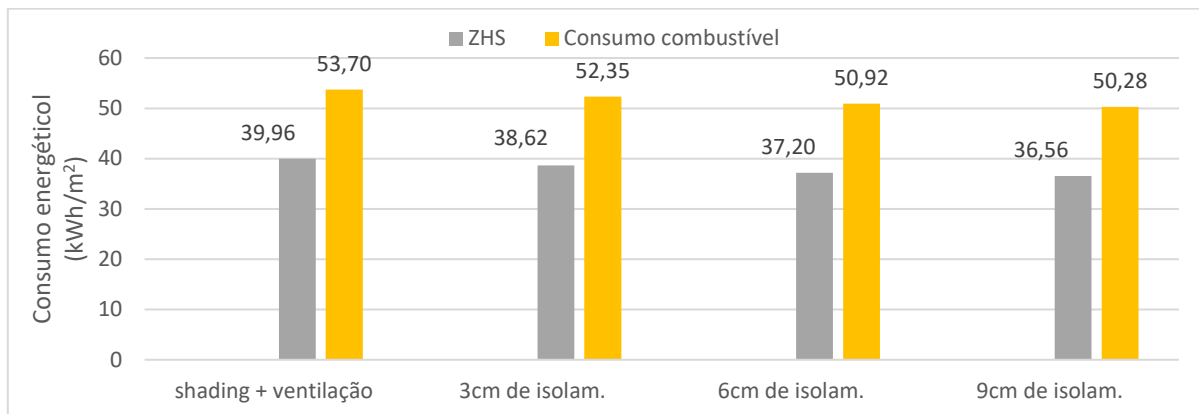


Figura 5.5 - Consumo energético em kWh/m<sup>2</sup> da aplicação de diferentes espessuras de isolamento térmico no rés-do-chão

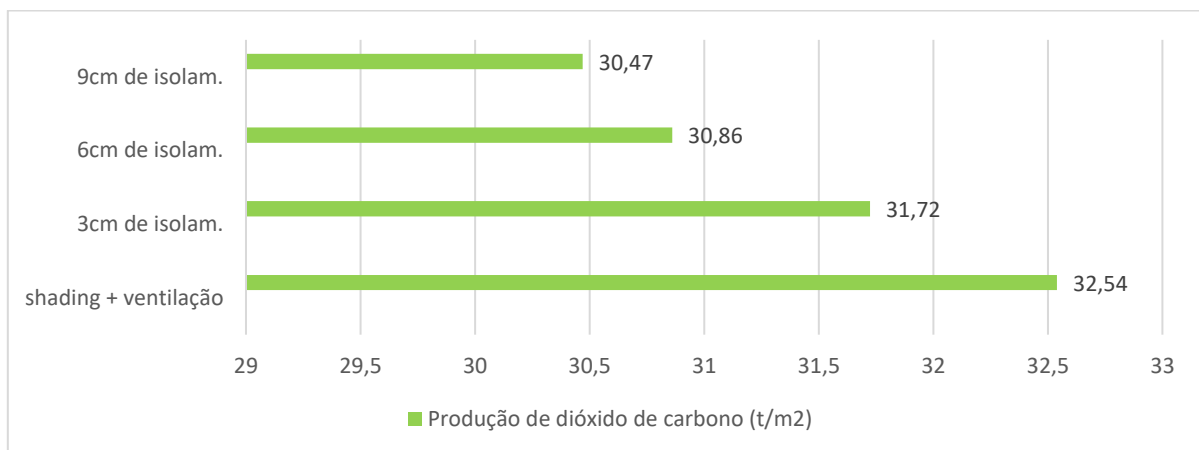


Figura 5.6 - Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) da aplicação de diferentes espessuras de isolamento térmico no rés-do-chão

A descida no consumo de combustível e na produção de dióxido de carbono ronda os 2.51%, 5.16% e 6.36% para o pavimento com isolamento com espessuras de 3cm, 6cm e 9cm respetivamente.

No que diz respeito às necessidades de aquecimento da habitação, a diminuição em percentagem abrange os 3.35%, 6.90% e 8.51% para as espessuras de isolante de 3cm, 6cm e 9cm, nesta ordem.

Ao adicionar isolamento térmico no pavimento referente ao rés-do-chão, o piso mais afetado será, logicamente, o piso do rés-do-chão. Como acontece na situação das paredes em que o piso mais afetado é o piso intermédio, para o rés-do-chão é possível verificar o mesmo cenário. O Quadro 5.3 indica as diferenças percentuais entre a situação inicial do edifício e o mesmo edifício contendo isolamento com as espessuras mencionadas nos parágrafos anteriores.

Quadro 5.3 - Diferença percentual das necessidades de aquecimento para o rés-do-chão

	Espessura de isolamento		
	3cm	6cm	9cm
Diferença percentual (%)	11,88	24,52	30,13

Tal como esperado, pode-se afirmar que ao adicionar isolamento no rés-do-chão, o maior impacto energético será no piso correspondente, ou seja, no rés-do-chão. As necessidades de aquecimento para este piso diminuem significativamente, principalmente com a adição de XPS com 6cm de espessura. A espessura de 6cm tem grande influência energética tendo associada uma diferença percentual de aproximadamente o dobro da provocada pelo isolamento com espessura de 3cm. O isolamento XPS com espessura de 9cm apesar de ter uma diferença percentual superior, ao comparar o mesmo com a espessura de 6cm apenas existe uma diferença de 5.61%.

Os baixos valores percentuais comprovam a existência de outros elementos existentes no edifício com resistência térmica mais fraca, ou seja, com o parâmetro U mais alto, como é o caso da cobertura e das janelas.

### 5.3.3 Cobertura

A cobertura existente era uma cobertura desprovida de qualquer tipo de isolamento, contendo na sua origem uma camada de impermeabilização. Conforme as vantagens apresentadas em 4.4.1.2.3, a principal medida de reabilitação passou pela aplicação de poliestireno extrudido (XPS) com diversas espessuras (3cm, 6cm e 9cm) sobre a camada de impermeabilização, formando uma cobertura invertida.

A importância desta análise prende-se com a perceção da influência do isolamento térmico. A Figura 5.7 expressa o consumo energético do edifício com as várias espessuras e a Figura 5.8 demonstra a produção de CO<sub>2</sub> associada.

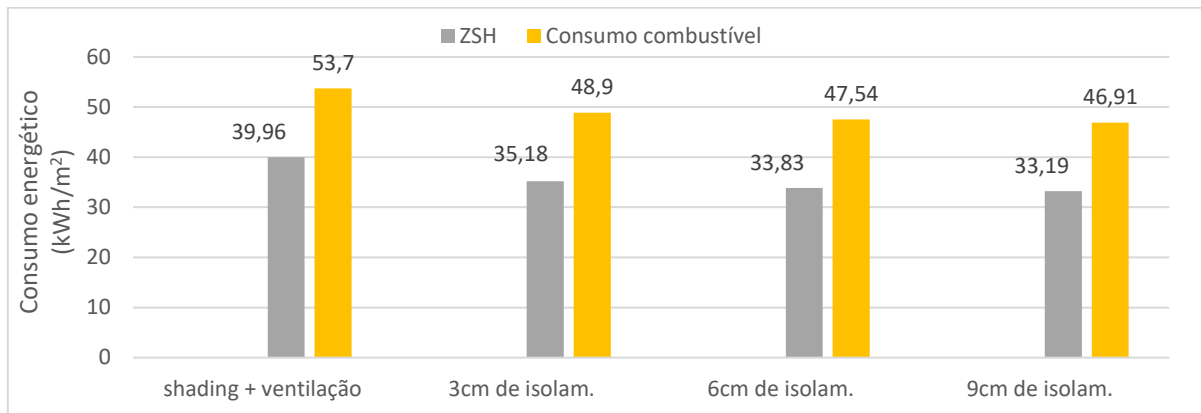


Figura 5.7 - Consumo energético em kWh/m<sup>2</sup> da aplicação de diferentes espessuras de isolamento térmico na cobertura

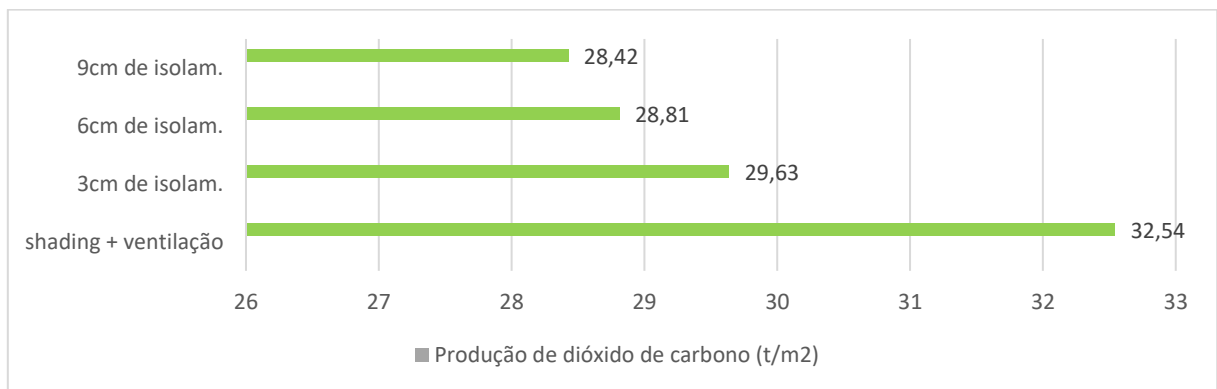


Figura 5.8 – Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) da aplicação de diferentes espessuras de isolamento térmico na cobertura

A diminuição no consumo energético e na correspondente produção de CO<sub>2</sub> está conectada com a colocação de isolamento na cobertura com distintas espessuras. A nível percentual, o consumo de combustível e a redução da produção de CO<sub>2</sub> são reduzidos cerca de 8.94%, 11.47% e 12.64% para as espessuras de 3cm, 6cm e 9cm nesta ordem.

A necessidade de aquecimento do edifício diminui substancialmente na ordem dos 11.96%, 15.34% e 16.94% para as espessuras de 3cm, 6cm e 9cm, respetivamente.

O aumento da espessura do isolamento tem maior impacto com a sua colocação na cobertura do que no piso correspondente ao rés-do-chão. Tal facto pode ser comprovado pela maior redução no consumo energético e na produção de dióxido de carbono. Estas reduções são explicadas com base no coeficiente *U*, apresentado anteriormente, para o piso do rés-do-chão e para a cobertura. Com a introdução de isolamento no rés-do-chão, o parâmetro *U* tem uma

menor redução em relação à diminuição do mesmo com a introdução de isolamento na cobertura.

A circulação do ar ocorre de uma maneira cíclica, ou seja, o ar quente sobe e o frio desce. O maior impacto a nível energético por parte da cobertura em relação ao rés-do-chão é comprovado pelo facto de que o rés-do-chão não têm tanta influência no impedimento da ascensão do ar quente como a cobertura. As perdas de calor por radiação para o céu são, também, superiores na cobertura.

A adição do isolamento na cobertura provoca uma maior influência energética ao nível do último andar. O Quadro 5.4 exhibe as diferenças percentuais em relação às necessidades de aquecimento energético do 4º piso.

Quadro 5.4 - Diferença percentual das necessidades de aquecimento para o 4º piso

	Espessura de isolamento		
	3cm	6cm	9cm
Diferença percentual (%)	35,35	42,67	47,00

As diferenças percentuais em relação à situação inicial do edifício (sem isolamento na cobertura) são muito superiores quando analisados os resultados para o último piso. Como o edifício tem muitos andares, estas diferenças diminuem ao nível global porque os restantes andares não estão em contacto direto com a cobertura, contendo pavimentos que os separam.

O isolamento com 6cm de espessura é o isolamento mais adequado a utilizar porque o consumo anual diminui significativamente em relação à introdução do isolamento com 3cm de espessura e a sua redução é ligeiramente inferior, na ordem dos 4.34%, comparativamente ao isolamento com 9cm de espessura.

## 5.4 Influência da substituição das janelas

### 5.4.1 Tipo de vidro

O edifício, inicialmente, dispunha de janelas providas de vidro simples com 6mm de espessura com um coeficiente de transmissão térmica (U) de  $5.778 \text{ W/m}^2\text{-K}$ . A primeira medida de reabilitação pertinente passa pela substituição das janelas com vidro simples para janelas com vidro duplo.

O vidro duplo adotado continha dois painéis com 6mm de espessura separados por ar ou argon. Para melhorar a envolvente do edifício, uma das medidas mais preponderantes é a diminuição do coeficiente de transmissão térmica (U). Os novos vidros duplos aplicados possuem um U igual a  $2.665 \text{ W/m}^2\text{-K}$ .

Para uma facilitada análise, primeiramente apenas se estudou o impacto energético do vidro duplo sem modificação da caixilharia existente (madeira). A Figura 5.9 salienta o consumo energético em kWh/m<sup>2</sup> e a Figura 5.10 identifica a produção de dióxido de carbono do edifício residencial em destaque.

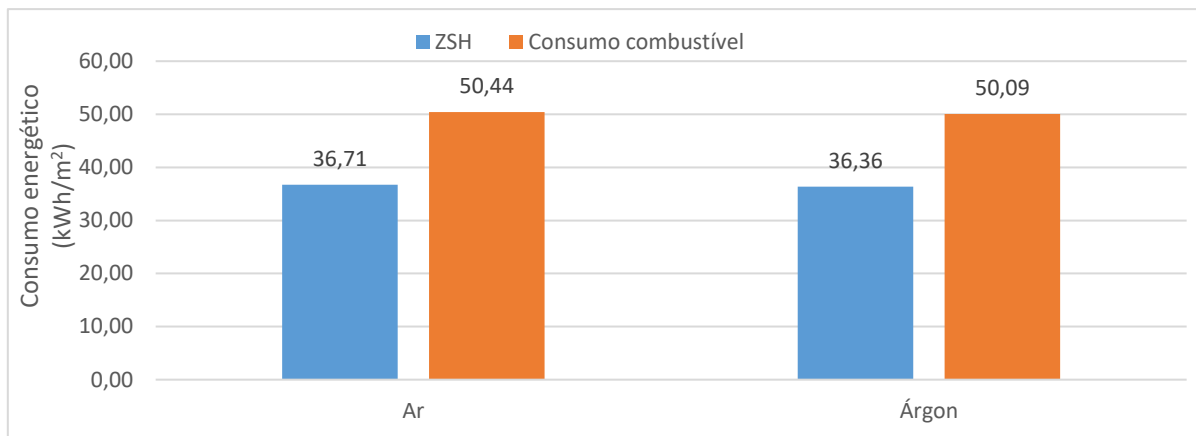


Figura 5.9 – Consumo energético em kWh/m<sup>2</sup> da aplicação de vidro duplo com painéis de 6mm separados por ar ou árgon

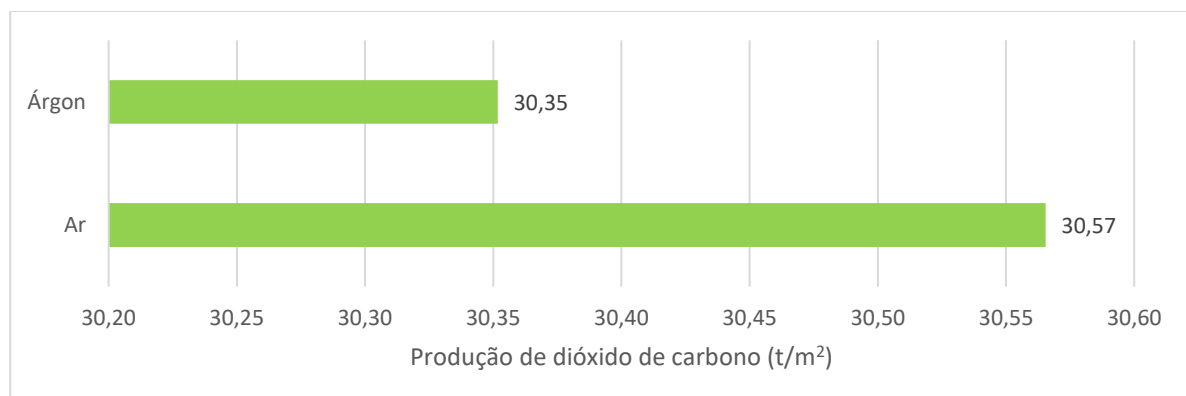


Figura 5.10 - Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) da aplicação de vidro duplo com painéis de 6mm separados por ar ou árgon

Com base nos gráficos anteriores, é exequível o apuramento da diminuição do consumo energético e da produção de dióxido de carbono em 6.07% e 6.73% para a presença de ar e de árgon, respetivamente, entre os painéis duplos.

Em relação às necessidades de aquecimento dos espaços interiores, a sua redução ronda os 8.13% e 9.01% para a presença de ar e árgon, na mesma ordem.

O argón é um gás mais caro devido à sua raridade e, na presente análise, a redução de consumo energético não compensa comparativamente com a colocação de ar (diferença de aproximadamente 1%).

#### 5.4.2 Tipo de caixilharia

O próximo passo ocorreu com a transição para a análise de diferentes caixilharias. As caixilharias estudadas foram as seguintes: alumínio com e sem corte térmico, madeira e PVC. A Figura 5.11 apresenta o consumo energético em kWh/m<sup>2</sup> e a Figura 5.12 exibe a produção de dióxido de carbono do edifício numa situação original e com as medidas de reabilitação referidas (introdução de variadas caixilharias).

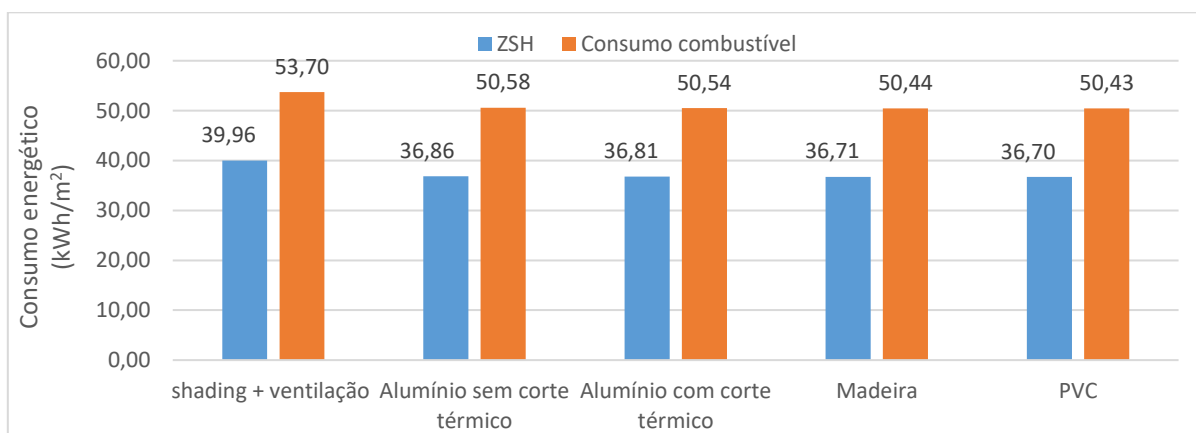


Figura 5.11 - Consumo energético em kWh/m<sup>2</sup> da aplicação de diversos tipos de caixilharia

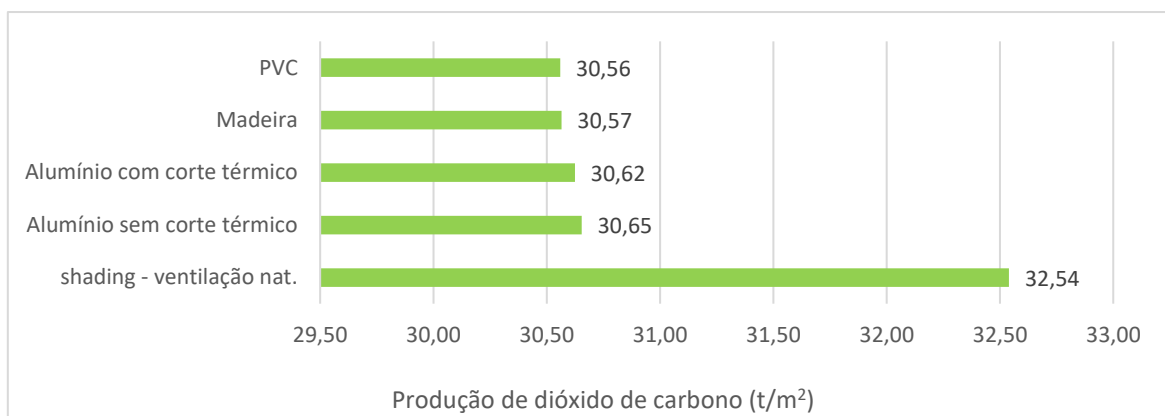


Figura 5.12 - Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) da aplicação de diversos tipos de caixilharia

A diminuição no consumo de combustível, nas necessidades de aquecimento da habitação e na produção de dióxido de carbono ocorre de maneira idêntica para todos os tipos de caixilharia (reduções à volta dos 7%).



A caixilharia que sofre uma menor redução é a caixilharia de alumínio sem corte térmico. A caixilharia de alumínio com corte térmico apresenta, embora diminuta, uma redução maior porque serve como uma barreira à transferência de calor, apresentando um desempenho energético superior.

A caixilharia em madeira e PVC contêm valores muito próximos à caixilharia em alumínio com corte térmico. Após análise das vantagens e desvantagens referidas em 4.4.1.3.2 e dos gráficos anteriores, a caixilharia utilizada para implementação das medidas de reabilitação foi a caixilharia em alumínio com corte térmico.

### 5.5 Influência do sistema de ar-condicionado

Numa fase inicial, o sistema de aquecimento era provido de um conjunto de radiadores elétricos. A medida de reabilitação aplicada foi a substituição deste sistema de aquecimento por um sistema de ar-condicionado do género “split” com a admissão de um COP igual a 4 para o sistema de aquecimento e 3 para o sistema de arrefecimento.

Até então, apenas foram apreciados valores dependentes do aquecimento. Como o sistema inicial era desprovido de qualquer método de arrefecimento, a introdução do mesmo comporta-se como um bónus, intervindo fortemente no conforto térmico, principalmente durante os meses quentes.

Os resultados provenientes do ar-condicionado estão relacionados apenas com o aquecimento ou com a junção do aquecimento e arrefecimento. A Figura 5.13 expõe o consumo energético em kWh/m<sup>2</sup> e a Figura 5.14 indica a produção de dióxido de carbono provocado pela introdução do sistema de ar condicionado.

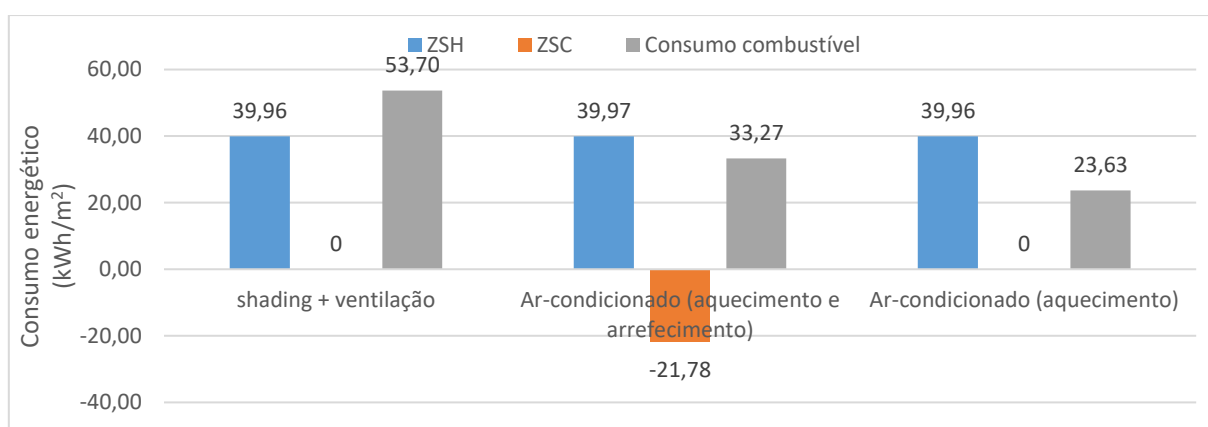


Figura 5.13 - Consumo energético em kWh/m<sup>2</sup> da aplicação do sistema de ar-condicionado com e sem arrefecimento

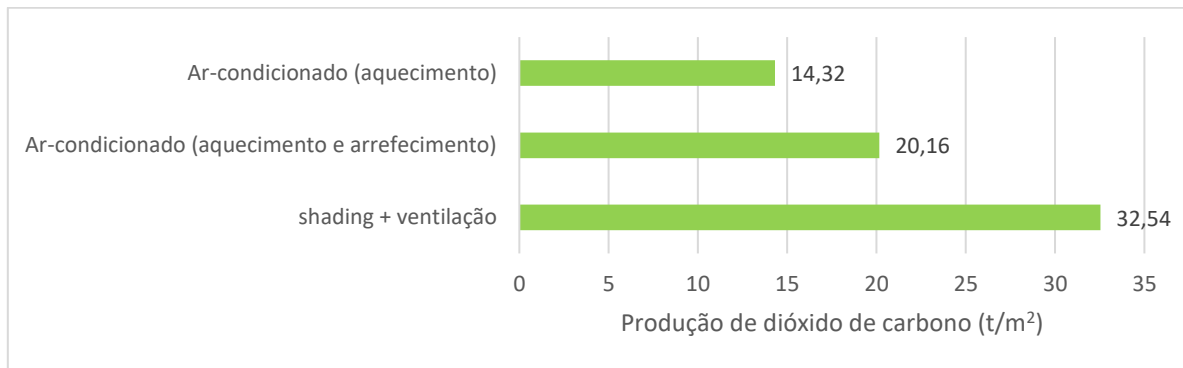


Figura 5.14 - Produção de dióxido de carbono (em toneladas por metro quadrado) da aplicação do sistema de ar-condicionado com e sem arrefecimento

As necessidades de aquecimento mantêm-se iguais à situação inicial. Esta ocorrência acontece porque a envolvente do edifício permanece igual, sendo substituído apenas o sistema de radiadores. A mínima diferença entre o sistema de ar-condicionado com aquecimento e arrefecimento e os valores base das necessidades energéticas verifica-se porque o programa *DesignBuilder* considera que com a capacidade de arrefecimento, a quantidade de calor para aquecer o espaço irá ser ligeiramente superior com uma diferença de 0.02%.

O consumo combustível engloba dois parâmetros: o consumo de eletricidade e o consumo energético para aquecimento e arrefecimento. O consumo de eletricidade ocorre devido aos gastos associados aos equipamentos inseridos em cada divisão. Mantendo-se o consumo de eletricidade, visto que permanece o mesmo edifício, apenas existe uma variação no consumo elétrico por parte do sistema de ar-condicionado.

Ao introduzir o sistema de ar-condicionado, as melhorias energéticas são visíveis. Quando as temperaturas de conforto interior do edifício são inferiores ou superiores às temperaturas definidas como ideais, o sistema de ar-condicionado é ativo, aquecendo ou arrefecendo o edifício tornando possível alcançar o conforto térmico. A nível percentual, ao substituir o sistema existente por ar-condicionado, o consumo de combustível decresce em 55.99% e 38.04% para um sistema de ar-condicionado sem e com capacidade de arrefecimento, respetivamente.

O sistema de ar-condicionado tipo “split” com capacidade de arrefecimento origina um consumo superior comparativamente ao sistema de ar-condicionado sem a mesma competência. A diferença entre os dois sistemas é de 17.94% e resulta no maior consumo por parte do sistema com capacidade de arrefecimento. Tal facto é explicado porque o sistema para além de consumir energia para aquecimento dos espaços, consome energia para o respetivo arrefecimento.

Como a produção de dióxido de carbono está diretamente relacionada com o consumo de combustível energético, as diferenças percentuais são idênticas às diferenças percentuais do consumo de combustível.

## **5.6 Combinações das diferentes soluções de reabilitação**

Após análise de todas as medidas de reabilitação implementadas de um modo individual, é necessário estudar as combinações de todas as soluções.

As medidas de reabilitação com menor influência nos impactos energéticos aconteceram com a introdução de isolamento no rés-do-chão. De facto, a redução nos impactes energéticos é diminuta.

A inclusão de novas janelas com vidro duplo e caixilharia em alumínio com corte térmico, a colocação de isolamento na cobertura e nas paredes são soluções com resultados mais favoráveis.

A melhor solução passou pela substituição do sistema de radiadores por um sistema de ar-condicionado. As melhorias energéticas são bem visíveis com a grande diminuição no consumo de combustível e na produção de dióxido de carbono.

O Quadro 5.5 apresenta as diferenças percentuais do consumo de combustível entre a situação do edifício antes e depois da implementação das várias medidas de reabilitação aplicadas.

Quadro 5.5 – Diferenças percentuais do consumo de combustível após implementação de diversas combinações de medidas de reabilitação

Medidas de reabilitação		Diferenças percentuais (%)
Ar-condicionado (quente+frio) + Cobertura	3cm de isolam.cob.	-42,14
	6cm de isolam.cob.	-43,14
	9cm de isolam.cob.	-43,59
Ar-condicionado (quente+frio) + Janelas alum.		-40,68
Ar-condicionado (quente+frio) + Paredes	3cm de isolam.par.	-41,53
	6cm de isolam.par.	-42,83
	9cm de isolam.par.	-43,61
Ar-condicionado (quente+frio) + Paredes + Janelas	3cm de isolam.par.	-44,26
	6cm de isolam.par.	-45,60
	9cm de isolam.par.	-46,40
Ar-condicionado (quente+frio) + paredes + cobertura	3cm par.+3cm cob.	-45,79
	3cm par.+6cm cob.	-46,83
	6cm par.+3cm cob.	-47,15
	6cm par.+6cm cob.	-48,20
Ar-condicionado (quente+frio) + janelas + cobertura + paredes	3cm par.+3cm cob.	-48,61
	3cm par.+6cm cob.	-49,68
	6cm par.+3cm cob.	-50,02
	6cm par.+6cm cob.	-51,10
Ar-condicionado (quente+frio) + R/C + cobertura + janelas	3cm r/c+3cm cob.	-44,90
	3cm r/c+6cm cob.	-45,92
	6cm r/c+3cm cob.	-44,96
	6cm r/c+6cm cob.	-45,98
Ar-condicionado (quente+frio) + R/C + paredes + janelas	3cm r/c+3cm par.	-44,45
	3cm r/c+6cm par.	-45,81
	6cm r/c+3cm par.	-44,47
	6cm r/c+6cm par.	-45,84
Ar-condicionado (quente+frio)+ R/C + cobertura + paredes +janelas	3cm r/c+3cm cob.+ 3cm par.	-48,80
	3cm r/c+3cm cob.+ 6cm par.	-50,22
	3cm r/c+6cm cob.+ 3cm par.	-49,87
	3cm r/c+6cm cob.+ 6cm par.	-51,30
	6cm r/c+3cm cob.+ 3cm par.	-48,83
	6cm r/c+3cm cob.+ 6cm par.	-50,26
	6cm r/c+6cm cob.+ 3cm par.	-49,89
6cm r/c+6cm cob.+ 6cm par.	-51,33	
Ar-condicionado (quente+frio) + R/C + cobertura	3cm r/c+3cm cob.	-42,20
	3cm r/c+6cm cob.	-43,09
	6cm r/c+3cm cob.	-42,21
	6cm r/c+6cm cob.	-43,13
Ar-condicionado (quente+frio) + R/C + paredes	3cm r/c+3cm par.	-41,65
	3cm r/c+6cm par.	-42,98
	6cm r/c+3cm par.	-41,67
	6cm r/c+6cm par.	-42,99

O quadro anterior apenas expõe as combinações de soluções que apresentam melhorias mais significativas nos resultados energéticos. O sistema de ar-condicionado exposto contém características de aquecimento e arrefecimento porque é o sistema com melhor desempenho energético.

É admissível concluir que a inclusão de isolamento térmico com 9cm de espessura não é, à partida, uma medida viável economicamente porque as diferenças em relação à espessura de 6cm são muito reduzidas. Por esse mesmo motivo, as espessuras dos isolamentos para alguns dos diferentes elementos construtivos, quando combinados entre si, excluem a espessura de 9cm para mais fácil compreensão dos resultados.

Uma redução do consumo de combustível na ordem dos 40% tem grande impacto a nível económico, ambiental e social. Social porque o conforto térmico é mantido no interior do edifício; económico porque as despesas energéticas diminuem com a redução das necessidades de aquecimento dos espaços; e, finalmente, ambiental porque com a diminuição da produção anual de dióxido de carbono, as emissões de CO<sub>2</sub> são amplamente reduzidas, salvaguardando o meio ambiente.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 6.1 Conclusões

Na presente dissertação foram avaliadas e caracterizadas diversas medidas de reabilitação energética, entre elas a introdução de isolamento nas paredes, no pavimento do rés-do-chão e na cobertura, a substituição do vidro e da caixilharia das janelas e, finalmente, a substituição do sistema de aquecimento elétrico por um sistema de ar-condicionado com e sem capacidade de arrefecimento. Deste modo, pretendeu-se não só avaliar os aspetos energéticos, como também os aspetos ambientais das diferentes estratégias de reabilitação implementadas num edifício multifamiliar situado em Nápoles, Itália.

Para uma avaliação mais correta foi necessário avaliar as medidas de melhoria individualmente e combinadas entre si. Por vezes, as estratégias de reabilitação quando combinadas apresentam valores muito diferentes dos valores associados à individualidade de cada uma. Por este mesmo motivo, foi necessário considerar os diferentes cenários possíveis.

Tal como verificado na revisão do estado-da-arte, os edifícios são responsáveis por grande parte das emissões de gases com efeito de estufa, contribuindo para os impactos adversos no meio ambiental, na saúde humana e na economia do país. Portanto, é fundamental a adoção de diversas estratégias para a construção sustentável de edifícios e, principalmente, para a reabilitação sustentável dos edifícios existentes.

Do ponto de vista da sustentabilidade, em que o equilíbrio entre os aspetos económicos, ambientais e sociais é muito importante, a decisão sobre qual medida de reabilitação deve ser implementada requer uma avaliação pormenorizada de forma a garantir esse equilíbrio.

A introdução de isolamento nos diversos elementos construtivos, tal como a substituição das janelas existentes e do sistema de aquecimento são medidas de reabilitação energética com grande importância para a reabilitação dos edifícios.

Primeiramente foi realizada uma análise prévia para despistar possíveis lacunas no modelo do programa *DesignBuilder*. A presença ou a ausência de sombreamento e de ventilação afeta o desempenho energético do edifício. A ventilação permite as trocas de ar entre o interior e o exterior do edifício, salvaguardando a qualidade do ar no seu interior. No caso de não existir ventilação, o ar não é renovado e, conseqüentemente, não existem perdas de calor associadas e, portanto, a energia necessária para aquecimento diminui.

Os sistemas de sombreamento têm extrema importância visto que impedem o aumento da temperatura no interior do edifício durante os meses de Verão. Contudo, os sistemas de

sombreamento podem ser desfavoráveis nos meses de Inverno, sendo de extrema importância a escolha correta dos mesmos, assim como o seu controlo adequado em termos de ativação e desativação.

Após a referida análise prévia do modelo, foi possível prosseguir para a avaliação das diversas estratégias de reabilitação energética. Os resultados para cada uma das medidas comprovam que à medida que os consumos energéticos são diminuídos, e conseqüentemente a produção de dióxido de carbono diminui.

Introduziram-se dois tipos de isolamento térmico, o EPS e o XPS, com diferentes espessuras (3cm, 6cm e 9cm). Enquanto que o EPS foi inserido nas paredes de fachada, o XPS foi inserido na cobertura e no pavimento do rés-do-chão, dado ter uma resistência mecânica superior.

A introdução de EPS nas paredes de fachada é mais significativa para o piso intermédio (2º piso) pelo facto de neste piso ocorrerem predominantemente perdas energéticas através das paredes. Os resultados apresentados permitiram concluir que uma das possíveis soluções de reabilitação pode passar pela introdução de isolamento térmico nas paredes.

Os resultados relativos à introdução de isolamento térmico no pavimento do rés-do-chão permitiram constatar que ao colocar isolamento térmico no correspondente piso, o respetivo impacto energético inferior ao caso das paredes. Analogamente aos restantes elementos construtivos com isolamento térmico, os resultados permitiram afirmar que o maior impacto energético será no piso correspondente, neste caso no rés-do-chão.

O isolamento na cobertura tem um maior impacto na poupança energética do que o rés-do-chão devido à sua baixa resistência térmica. Outra justificação prende-se com o facto de a cobertura impedir a ascensão de ar quente e ter uma forte influência nas perdas de calor por radiação. Optou-se pela cobertura invertida para aumentar a durabilidade da camada de impermeabilização. Da mesma forma que as paredes, os resultados foram analisados, de uma forma isolada, para o último piso do edifício (4º piso), sendo as diferenças percentuais muito superiores em relação aos resultados analisados para a globalidade do edifício.

Para os três elementos referidos, a espessura de 6cm para ambos os isolamentos é a mais adequada para implementação porque o consumo energético diminui significativamente em relação à espessura de 3cm e é apenas ligeiramente inferior à espessura de 9cm.

Os vidros simples existentes na situação inicial do edifício comportam-se como os elementos com pior resistência térmica, ou seja, com um valor de U superior. Primeiramente estudou-se a introdução de vidro duplo com ar e argón a separar os respetivos painéis. Concluiu-se que a diferença ao nível energético entre os dois gases era muito pequena, optando-se pela utilização de ar pelo seu menor custo em relação ao argón. Posto isto, estudou-se o efeito energético das

diferentes caixilharias, sendo possível constatar que a caixilharia com melhor custo-benefício em termos energéticos e económicos foi a caixilharia em alumínio com corte térmico.

Finalmente, substituiu-se o sistema de aquecimento existente por um sistema de ar-condicionado com capacidade de aquecimento e arrefecimento. Ao introduzir o sistema de ar-condicionado, as melhorias energéticas são bem visíveis devido à elevada eficiência deste equipamento. Quando as temperaturas de conforto interior do edifício são inferiores ou superiores às temperaturas definidas como ideais, o sistema de ar-condicionado é ativado, aquecendo ou arrefecendo o edifício tornando possível alcançar o conforto térmico pretendido. Ao substituir o sistema existente por ar-condicionado, o consumo de combustível diminuiu drasticamente, sendo a medida com maior impacto energético no edifício em estudo, dada a grande diferença de eficiência energética entre os referidos equipamentos.

Avaliadas todas as medidas de reabilitação energética, procedeu-se ao estudo das respetivas combinações. Como a estratégia com maior impacto foi a substituição do sistema de aquecimento por ar-condicionado, o sistema de ar-condicionado foi incluído em todas as combinações estudadas.

A introdução de isolamento no piso correspondente ao rés-do-chão traduz-se numa solução com baixa viabilidade para o presente estudo pelo facto de não ter grande influência no desempenho energético no edifício quando analisada individualmente e combinada com outras medidas de reabilitação. As reduções no consumo de combustível devido à implementação das estratégias de reabilitação, têm um grande impacto a nível económico, ambiental e social, indo de encontro a um conceito fundamental e cada vez mais atual: a sustentabilidade dos edifícios.

## **6.2 Propostas para desenvolvimentos futuros**

Apresentam-se algumas sugestões para estudos futuros a fim de complementar todo o trabalho desenvolvido na presente dissertação:

- Estudo do desempenho energético do edifício quando sujeito a ventilação mecânica;
- Utilização de painéis fotovoltaicos e realização de uma análise paramétrica a fim de auscultar o efeito dos mesmos no desempenho energético do edifício;
- Contabilização dos ganhos energéticos, considerando a iluminação e a eletricidade consumida pelos diferentes equipamentos existentes no interior do edifício;
- Estudo dos impactos energéticos das variadas medidas de reabilitação no edifício em estudo, considerando o controlo da humidade e a influência de coletores solares para produção de AQS (águas quentes sanitárias);



- Utilização dos resultados obtidos para contabilização dos custos e respetivos benefícios associados a cada medida de reabilitação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

araluminios@ (2017) <http://araluminios.pt/?p=175>. Tipos de vidro (página internet oficial). (Acedido em abril de 2017)

Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., Mistretta, M., (2011) “Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, pp. 460–470.

Ascione, F., Bianco, N., Masi, R.F., Rossi, F., Vanoli, G.P., (2015), “Energy retrofit of an educational building in the ancient center of Benevento. Feasibility study of energy savings and respect of the historical value”. *Energy and Buildings*, Vol. 95, pp. 172–183.

Ascione, F., Rossi, F., Vanoli, G.P., (2011), “Energy retrofit of historical buildings: theoretical and experimental investigations for the modelling of reliable performance scenarios”. *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 1925–1936.

ASHRAE (2014). “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”. ISSN 1041-2336, American National Standards Institute, USA.

Bellia, L., Alfano, F.R.A., Giordano, J., Ianniello, E., Riccio, G., (2015), “Energy requalification of a historical building: A case study”. *Energy and Buildings*, Vol. 95, pp. 184–189.

Ben, H., Steemers, K., (2014), “Energy retrofit and occupant behaviour in protected housing: A case study of the Brunswick Centre in London”. *Energy and Buildings*, Vol. 80, pp. 120–130.

Berardinis, P., Rotilio, M., Marchionni, C., Friedman, A., (2014), “Improving the energy-efficiency of historic masonry buildings. A case study: A minor centre in the Abruzzo region, Italy”. *Energy and Buildings*, Vol. 80, pp. 415–423.

Brás, A., Rocha, A., Faustino, P., (2015), “Integrated approach for school buildings rehabilitation in a Portuguese city and analysis of suitable third party financing solutions in EU”. *Journal of Building Engineering*, Vol. 3, pp. 79–93.

Bojic, M., Djordjevic, S., Stefanovic, A., Miletic, M., Cvetkovic, D., (2012), “Decreasing energy consumption in thermally non-insulated old house via refurbishment”. *Energy and Buildings*, Vol. 54, pp. 503–510.

Cardoso B. (2013). “Análise Paramétrica de uma Solução Passiva para uma Moradia com Estrutura em Aço Leve”. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal.

Chidiac, S.E., Catania, E.J.C., Morofsky, E., Foo, S., (2011a), “A screening methodology for implementing cost effective energy retrofit measures in Canadian office buildings”. *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 614-620.

Chidiac, S.E., Catania, E.J.C., Morofsky, E., Foo, S., (2011b), “Effectiveness of single and multiple energy retrofit measures on the energy consumption of office buildings”. *Energy*, Vol. 36, pp. 5037-5052.

climate@ (2017). <http://climate.ncsu.edu/edu/k12/.lsheat>. Latent and Sensible Heat (página internet oficial). (Acedido em fevereiro de 2017)

designbuilder@ (2017) <https://www.designbuilder.co.uk/>. DesignBuilder (página internet oficial). (Acedido em março de 2017)

designbuildersoftware@, (2017). [http://www.designbuildersoftware.com/docs/designbuilder/DesignBuilder\\_2.1\\_Users-Manual\\_Ltr.pdf](http://www.designbuildersoftware.com/docs/designbuilder/DesignBuilder_2.1_Users-Manual_Ltr.pdf). DesignBuilder 2.1. Users Manual (página internet oficial). (Acedido em novembro de 2017)

Diretiva 2002/91/CE. “Diretiva 2002/91/CE do parlamento europeu e do conselho de 16 de dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios”. Versão portuguesa.

Diretiva 2010/31/EU. “Diretiva 2010/31/EU do parlamento europeu e do conselho de 19 de maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)”. Versão portuguesa.

Diretiva 2012/27/EU. “Diretiva 2012/27/EU do parlamento europeu e do conselho de 25 de outubro de 2012 relativa à eficiência energética, que altera as Diretivas 2009/125/CE e 2010/30/UE e revoga as Diretivas 2004/8/CE e 2006/32/CE”. Versão portuguesa.

ecen@ (2017). <http://ecen.com/eee18/enerequi.htm>. Energia Final e Equivalente - Procedimento Simplificado de Conversão (página internet oficial). (Acedido em junho de 2017)

emu@ (2017). <http://me.emu.edu.tr/hacisevki/MENG443%20PPT1B.pdf>. Thermal confort (página internet oficial). (Acedido em abril de 2017)

energydepot@ (2017). <https://www.energydepot.com/RPUcom/library/MISC001.asp>. Window shading (página internet oficial). (Acedido em abril de 2017)

Ferrante, A., (2014). “Energy retrofit to nearly zero and socio-oriented urban environments in the Mediterranean climate”. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 13, pp. 237–253.

google@ (2017). <https://www.google.pt/maps>. Street view (página internet oficial). (Acedido em fevereiro de 2017)

Hamdy, M., Hasan, A., Siren, K., (2011), “Impact of adaptive thermal comfort criteria on building energy use and cooling equipment size using a multi-objective optimization scheme”. *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 2055–2067.

Heo, Y., Choudhary, R., Augenbroe, G.A., (2012), “Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty”. *Energy and Buildings*, Vol. 47, pp. 550–560.

Hestnes, A.G., Kofoed, N.U., (2002), “Effective retrofitting scenarios for energy efficiency and comfort: results of the design and evaluation activities within the OFFICE project”. *Building and Environment*, Vol. 37, pp. 569 – 574.

ISO 10211 (2007) - Thermal performance of buildings and building components (2007). “Thermal bridges in building construction”. English Version, EN ISO 10211:2007 (E).

isover@ (2017).  
[http://www.isover.com/sites/isover.com/files/assets/documents/brochurebreeam\\_2016.pdf](http://www.isover.com/sites/isover.com/files/assets/documents/brochurebreeam_2016.pdf).  
BREEAM with ISOVER insulation solutions For a Sustainable Habitat (página internet oficial). (Acedido em março de 2017)

Katafygiotou, M.C., Serghides, D.K., (2014), “Analysis of structural elements and energy consumption of school building stock in Cyprus: Energy simulations and upgrade scenarios of a typical school”. *Energy and Buildings*, Vol. 72, pp. 8–16.

Khatib, H., (2012), “IEA World Energy Outlook 2011—A comment”. *Energy Policy*, Vol. 48, pp. 737-743.

Li, C., Hong, T., Yan, D., (2014), “An insight into actual energy use and its drivers in high-performance buildings”. *Applied Energy*, Vol. 131, pp. 394-410.

Ma, Z., Cooper, P., Daly, D., Ledo, L., (2012), “Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art”. *Energy and Buildings*, Vol. 55, pp. 889–902.

Mazzarella, L., (2015), “Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view”. *Energy and Buildings*, Vol. 95, pp. 23–31.

Menassa, C.C., (2011), “Evaluating sustainable retrofits in existing buildings under uncertainty”. *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 3576-3583.

Menassa, C.C., Baer, B., (2014), “A framework to assess the role of stakeholders in sustainable building retrofit decisions”. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 10, pp. 207–221.

Meyers, R.J., Williams, E.D., Matthews, H.S., (2010), “Scoping the potential of monitoring and control technologies to reduce energy use in homes”. *Energy and Buildings*, Vol. 42, pp. 563-569.

Milone, D., Peri, G., Pitruzzella, S., Rizzo, G., (2015), “Are the Best Available Technologies the only viable for energy interventions in historical buildings?”. *Energy and Buildings*, Vol. 95, pp. 39–46.

Morais A (2015). “Avaliação do Comportamento Térmico de uma Moradia Residencial Experimental”. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Portugal.

Munarim, U., Ghisi, E., (2016), “Environmental feasibility of heritage buildings rehabilitation”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 58, pp. 235-249.

Nemry, F., Uihlein, A., Colodel, C. M., Wetzel, C., Braune, A., Wittstock, B., Hasan, I., Kreibig, J., Gallon, N., Niemeier, S., Frech, Y., (2010) “Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union—Potential and costs”. *Energy and Buildings*; Vol. 42, pp. 976–984.

Paiho, S., Abdurafikov, R., Hoang, H., (2015), “Cost analyses of energy-efficient renovations of a Moscow residential district”. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 14, pp. 5–15.

Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., (2007), "Updated world map of the Köppen–Geiger climate classification". *Hydrol Earth Syst*, Vol. 11, pp. 1633–1644.

Poel, P., Cruchten, G., Balaras, C.A., (2007), “Energy performance assessment of existing dwellings”. *Energy and Buildings*, Vol. 39, pp. 393–403.

portal-energia@ (2017). <https://www.portal-energia.com/a-importancia-e-fases-de-uma-auditoria-energetica/>. A importância e as fases de uma auditoria energética (página internet oficial). (Acedido em maio de 2017)

projetista@ (2017). <http://www.projectista.pt/wp-content/uploads/2010/09/Grazimac%20Cat%C3%A1logo2009%20-%20e-mail.pdf>. Coberturas planas invertidas (página internet oficial). (Acedido em março de 2017)

pvhvac@ (2017). <http://www.pvhvac.com/blog/sensible-latent-heat-matter-hvac/>. What are sensible and latent heat – And why do they matter for HVAC? (página internet oficial). (Acedido em junho de 2017)

Rolfman, B., (2002), “CO2 emission consequences of energy measures in buildings”. *Building and Environment*, Vol. 37, pp. 1421-1430.

Santamouris, M. (2012). “Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments”. *Solar Energy*, Vol. 103, pp. 682–703.

Santos, P., Matias, L., (2006). “Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios”. *ICT informação técnica, Edifícios – ITE 50*, LNEC. Lisboa, Portugal.

solarwaters@ (2017). <http://www.solarwaters.pt/aquecimento-central-%E2%80%93-solucoes-disponiveis-e-a-suas-vantagens>. Aquecimento Central – Soluções disponíveis e a suas vantagens (página internet oficial). (Acedido em março de 2017)

Tahsildoost, M., Zomorodian, Z.S., (2015), “Energy retrofit techniques: An experimental study of two typical school buildings in Tehran”. *Energy and Buildings*, Vol. 104, pp. 65–72.

thegreenage@ (2017). <https://www.thegreenage.co.uk/external-wall-insulation-versus-internal-wall-insulation/>. External Wall insulation versus internal Wall insulation (página internet oficial). (Acedido em março de 2017)

Utochkina, E. (2014). “Heat insulation materials from environmental aspect”. Tese de Licenciatura, Universidade das ciências aplicadas da Universidade da Finlândia, Finlândia.

Vasconcelos, A.B., Pinheiro, M.D., Manso, A., Cabac, A., (2016), “EPBD cost-optimal methodology: Application to the thermal rehabilitation of the building envelope of a Portuguese residential reference building”. *Energy and Buildings*, Vol. 111, pp. 12–25.

Wikimedia@, (2017). [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9a/Italy\\_koppen.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9a/Italy_koppen.svg). Koppen climate types of Italy (página internet oficial). (Acedido em abril de 2017)