



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Pedro Correia Pereira da Silva

A Integração de Soluções Inovadoras em  
Edifícios com Vista à Reabilitação Energética

Pedro Correia Pereira da Silva  
A Integração de Soluções Inovadoras em  
Edifícios com Vista à Reabilitação Energética

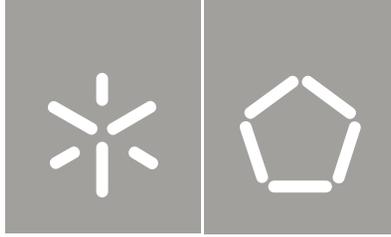


Este trabalho foi financiado pela Empresa DST, S.A. - '96 Domingos da Silva Teixeira S.A. no âmbito da Bolsa de Investigação com a referência SFRH / BDE / 15599 / 2006

**FCT** Fundação para a Ciência e Tecnologia  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA Portugal

Este trabalho foi financiado pelo POPH - QREN - Tipologia 4.1 - Formação Avançada, comparticipado pelo Fundo Social Europeu e por fundos nacionais do MCTES no âmbito da Bolsa de Investigação com a referência SFRH / BDE / 15599 / 2006





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Tese de Doutoramento  
Engenharia Civil

Trabalho efectuado sob a orientação da  
Professora Doutora Manuela Guedes de Almeida  
e do  
Professor Doutor Luís Manuel Bragança de Miranda e  
Lopes

Abril de 2013

## DECLARAÇÃO

Nome

Pedro Correia Pereira da Silva

Endereço electrónico: [psilva@civil.uminho.pt](mailto:psilva@civil.uminho.pt) Telefone: 224030406 / 962702074

Número do Bilhete de Identidade: 11472760

Título dissertação □/tese □

A Integração de Soluções Inovadoras em Edifícios com Vista à Reabilitação Energética

Orientador(es):

Professora Maria Manuela de Oliveira Guedes de Almeida; Professor Luís Manuel Bragança de Miranda e Lopes,

Ano de conclusão: 2013

Designação do Mestrado ou do Ramo de Conhecimento do Doutoramento:

Doutoramento em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_

Assinatura: \_\_\_\_\_

## AGRADECIMENTOS

A realização dos trabalhos de investigação apresentados nesta dissertação, apenas foi possível devido ao apoio a contribuição de diversas pessoas, instituições e empresas. Assim gostaria de deixar aqui o meu profundo agradecimento a todos que colaboraram para a realização deste trabalho. No entanto, gostaria de especificamente reiterar os meus mais sinceros agradecimentos:

*À minha orientadora científica Professora Manuela Almeida, pois apenas contando com o seu vasto conhecimento na área de intervenção e às suas oportunas e decisivas observações, foi possível atingir os resultados propostos com a realização deste trabalho de investigação.*

*Ao meu coorientador científico Professor Luís Bragança, ao qual devo muito do meu conhecimento científico e técnico que fui adquirindo ao longo do período de investigação que incluí a realização do Doutoramento, e não só, mas também aos seus comentários perspicazes e muito benéficos para a realização dos trabalhos de investigação.*

*Aos meus orientadores empresariais Eng.º José Pacheco e Eng.º Vasco Mesquita, fundamentais para permitir o desenvolvimento final da solução proposta, assim como a sua adaptação às necessidades do setor e possibilidade de realização de protótipos.*

*À Fundação para a Ciência e a Tecnologia e à empresa DST, S.A., na pessoa do Eng.º José Teixeira, pelo seu apoio financeiro no âmbito da Bolsa de Doutoramento em Empresa com a referência SFRH/BDE /15599/2006.*

*À Agência para a Energia – ADENE – pela possibilidade de consulta das bases de dados do Sistema de Certificação Energética, através das quais foi possível obter valiosas informações sobre o parque habitacional Português.*

*Às empresas Inor Ibérica e Sofalca, pela generosa oferta de matéria-prima imprescindível para a construção dos protótipos da solução de reabilitação desenvolvida no decorrer dos trabalhos de investigação – MRP.*

*A todos os meus colegas de trabalho na Universidade do Minho, nomeadamente ao Ricardo Mateus e Dinis Leitão, e especialmente à Sandra Silva e Elsa Martins, cuja colaboração foi essencial para a realização das campanhas de medição.*

*É também com grande contentamento que agradeço aos meus Pais, pois sem eles e sua ajuda incondicional, este trabalho nunca poderia ter sido desenvolvido.*

*Por fim, não poderia deixar de expressar um agradecimento muito especial à minha mulher Silvina Fontes, por todo o seu apoio e compreensão e ainda ao meu filho Ricardo Silva, as minhas maiores fontes da necessária inspiração para documentar os trabalhos de investigação e desenvolvimento realizados.*

# A INTEGRAÇÃO DE SOLUÇÕES INOVADORAS EM EDIFÍCIOS COM VISTA À REABILITAÇÃO ENERGÉTICA

## RESUMO

A Eficiência Energética é um dos focos principais da Sociedade atual. Este é um fenómeno globalizado e contando com as mais diversas medidas de implementação e disseminação. O parque edificado é um dos setores de intervenção prioritária, considerando o seu peso excessivo em termos energéticos, muito devido ao aumento dos padrões de conforto da sociedade em geral e da utilização de equipamentos AVAC com maiores potências. É consensual que a diminuição deste elevado consumo não pode passar pela redução do conforto, mas sim pela reabilitação da envolvente dos edifícios e pela utilização de sistemas e equipamentos mais eficientes. Neste contexto, foi realizado um estudo aprofundado do parque edificado relativamente ao seu desempenho energético e patologias energéticas existentes, nomeadamente através da análise das Bases de Dados resultante da implementação do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE) e através de intensivas campanhas de medição. Este levantamento possibilitou a deteção dos tipos de envolventes do edifício que necessitam, com maior urgência da implementação de medidas de reabilitação energética e a adequabilidade das soluções existentes no mercado. Concluiu-se que as fachadas dos edifícios são aquelas que requerem maior atenção e, potencialmente, que incluem as maiores dificuldades para a sua reabilitação. No sentido de se contribuir para a resolução deste problema, foi desenvolvida uma solução inovadora de reabilitação de fachadas de edifícios – MRP – contemplando a utilização de tecnologias de prefabricação. As grandes vantagens desta solução são a sua leveza e facilidade de aplicação, a sua espessura de isolamento otimizada em termos do binómio custo-benefício, a possibilidade de inclusão de negativos no seu interior para a passagem de diversas cablagens e condutas, a redução do tempo de aplicação e a possibilidade de controlo de qualidade. A solução desenvolvida foi devidamente testada e validada, quer através das mais diversas ferramentas de simulação, quer através de ensaios físicos e mecânicos realizados em protótipos. Adicionalmente foi verificado o desempenho energético decorrente da aplicação do módulo MRP a dois casos de estudo – edifício unifamiliar e multifamiliar – através do uso de ferramentas de simulação dinâmicas. Foi igualmente verificado o desempenho energético decorrente de uma intervenção de reabilitação integrada (global) aos mesmos dois casos de estudo, onde se considerou também a aplicação do módulo MRP.



## INTEGRATION OF INNOVATIVE SOLUTIONS FOR BUILDINGS ENERGY RETROFIT

### **ABSTRACT**

Energy Efficiency is a major concern in modern society. This is a global phenomenon with several measures in force for its implementation and dissemination. The building stock is one of the sectors with highest potential of intervention, given its excessive energy consumption (and waste), largely due to the general increase of the society standard of living, and the use of HVAC systems with higher capacity. It is generally accepted that the decrease of this energy consumption cannot be obtained by the reduction of comfort, but instead by the retrofit of buildings envelope and by the use of more efficient systems and equipment's. In this context, a detailed study of the housing stock was carried out, regarding its energy performance and existing energy pathologies, in particular through the analysis of Databases resultant from the implementation of the Portuguese Buildings Energy Certification System (SCE) and through intensive measurement campaigns. This study allowed the detection of the building envelope elements that are, most urgently, in need of the implementation of retrofit measures, but also the adequacy of the retrofit solutions currently available. It was concluded that the buildings' facades are those that require more attention and potentially include the major difficulties for their retrofit. In order to contribute to the solution of this problem, an innovative solution for the building facades retrofit was developed - MRP - contemplating the use of prefabrication technology. The advantages of this solution are its light weight and ease of application, the optimized insulation thickness in terms of cost-effectiveness, the possibility of including negatives therein for the passage of various cables and ducts, the reduction of the application time and the possibility of quality control. The solution developed has been tested and validated not only with several simulation tools, but also by physical and mechanical tests, and also by the monitoring of the thermal performance of several prototypes. In addition, the energy performance resulting from the application of MRP module to two case studies - single family and multifamily building – was evaluated through the use of dynamic simulation tools. The energy performance resulting from an integrated (global) rehabilitation of the same two case studies was evaluated, where we also considered the application of the MRP module.





## ÍNDICE GERAL

Nomenclatura.....	XIV
Índice de Figuras.....	XVI
Índice de Tabelas.....	XXI

### PARTE I

ENQUADRAMENTO, OBJETIVOS E METODOLOGIA EMPREGUE. A REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS E O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

#### Capítulo 1 – Enquadramento, Introdução e Objetivos

1.1 Enquadramento.....	2
1.2 Introdução.....	2
1.3 Objetivos.....	6
1.4 Estrutura da Tese.....	7

#### Capítulo 2 - Reabilitação Energética de Edifícios

2.1 Introdução.....	12
2.2 A urgência do Desenvolvimento Sustentável.....	12
2.2.1 Alterações Climáticas.....	12
2.2.2 Indicadores de Sustentabilidade.....	17
2.3 Energia.....	18
2.3.1 Considerações Gerais.....	18
2.4 Edifícios.....	24
2.4.1 Caracterização Geral.....	24
2.4.2 Caracterização do Parque Edificado Português.....	24
2.5 Caracterização do Setor da Reabilitação de Edifícios.....	27
2.5.1 Estudo do Mercado de Reabilitação.....	27
2.5.2 Perspetivas de Evolução do Setor da Reabilitação.....	31
2.5.3 Motivação para o Desenvolvimento de Soluções de Reabilitação para Fachadas.....	34
2.5.4 Metodologia de Reabilitação.....	39
2.5.5 Soluções Existentes para a Reabilitação de Fachadas.....	40
2.6 Novas Soluções Prefabricadas para Reabilitação de Fachadas.....	43
2.6.1 Motivação da Aplicação da Prefabricação.....	43
2.6.2 Soluções de Reabilitação Prefabricadas – I&D.....	44
2.6.3 Módulos de Reabilitação Estandarizados Semi prefabricados - Suíça.....	45
2.6.4 Módulos de Fachada Prefabricados de Grande Dimensão - Áustria.....	51
2.6.5 Módulos de Reabilitação Prefabricados de Grandes Dimensões - França.....	56



2.6.6 Módulos de Reabilitação Prefabricados - Portugal.....	61
2.7 Conclusões.....	61

### Capítulo 3 - Metodologia

3.1 Introdução .....	64
3.2 Apresentação da Metodologia .....	64
3.2.1 Estudo dos Conceitos Base.....	64
3.2.2 Caracterização do Desempenho Energético do Parque Edificado .....	65
3.2.3 Propostas Iniciais de Soluções de Reabilitação Energética .....	66
3.2.4 Desenvolvimento da Solução Base do Módulo de Reabilitação Prefabricado.....	67
3.2.5 Monitorização do Desempenho do Módulo de Reabilitação Prefabricado .....	67
3.2.6 Solução Final do Módulo de Reabilitação Prefabricado.....	68
3.2.7 Aplicação da Solução Desenvolvida a Casos de Estudo .....	68
3.3 Ferramentas com Potencial para Apoio ao Desenvolvimento da Solução de Reabilitação .....	68
3.3.1 Ferramentas de Simulação Energética.....	69
3.3.2 Ferramentas de Análise Económica .....	77
3.4 Conclusões.....	79

## PARTE II

### DESEMPENHO ENERGÉTICO DO PARQUE EDIFICADO PORTUGUÊS E PROPOSTA DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO INOVADORAS

### Capítulo 4 - Identificação das Necessidades Energéticas do Parque Edificado

4.1 Introdução .....	82
4.2 Motivação.....	82
4.3 Avaliação da Base de Dados do Sistema de Certificação Energética Português .....	83
4.3.1 Introdução.....	83
4.3.2 Representatividade da Amostra.....	84
4.3.2 Indicadores do Desempenho Energético dos Edifícios .....	84
4.3.2 Avaliação do Desempenho Energético do Parque Edificado .....	92
4.4 Campanha de Medições a Edifícios Residenciais.....	93
4.4.1 Identificação das Grandezas a Caracterizar .....	93
4.4.2 Processos de Monitorização .....	94
4.4.3 Casos de Estudo Monitorizados .....	98
4.4.4 Resumo dos Resultados .....	106
4.5 Comparação entre Bases de Dados – SCE – e Campanhas de Medição .....	114
4.5.1 Coeficiente de Transmissão Térmica (U).....	114
4.5.2 Taxa de Renovação do Ar (RPH).....	115
4.6 Conclusões.....	116



## Capítulo 5 – Propostas de Soluções de Reabilitação Inovadoras

5.1 Introdução .....	118
5.2 Conceito Base .....	119
5.3 Soluções Propostas.....	122
5.3.1 Enquadramento .....	122
5.3.2 Módulo de Reabilitação com Painéis Prefabricados de Betão contendo Fibras de Vidro .....	122
5.3.3 Solução de Reabilitação tipo Fachada Ventilada (SFV) .....	124
5.3.4 Módulo de Reabilitação Prefabricado - MRP .....	127
5.3.5 Seleção da Proposta a Desenvolver .....	128
5.4 Conclusões.....	130

### PARTE III

DESENVOLVIMENTO, OTIMIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SOLUÇÃO BASE DO MÓDULO DE REABILITAÇÃO PREFABRICADA PARA FACHADAS – MRP – E SELEÇÃO DA SOLUÇÃO FINAL

## Capítulo 6 – Módulo de Reabilitação Prefabricado – MRP – Solução Base

6.1 Introdução .....	132
6.2 MRP – Desenvolvimento do conceito.....	132
6.2.1 Evolução do Módulo .....	132
6.2.2 Dados Gerais da Solução Base .....	134
6.2.3 Pormenorização .....	135
6.2.4 Previsão do Coeficiente de Transmissão Térmica .....	140
6.3 Otimização do Desempenho do MRP.....	142
6.3.1 Enquadramento .....	142
6.3.2 Apresentação das Soluções do Módulo MRP em Estudo.....	142
6.3.3 Espessura do Isolamento .....	143
6.3.4 Avaliação do Desempenho Higrotérmico .....	148
6.4 Conclusões.....	154

## Capítulo 7 – Avaliação do Desempenho do Módulo de Reabilitação Prefabricado

7.1 Introdução .....	158
7.2 Motivação.....	158
7.3 Produção dos Protótipos .....	159
7.4 Avaliação do Desempenho Térmico .....	161
7.4.1 Definição da Metodologia de Avaliação.....	161
7.4.2 Análise dos Resultados.....	166
7.5 Avaliação do Desempenho Mecânico .....	167



7.5.1 Definição da Metodologia de Avaliação.....	167
7.5.2 Análise dos Resultados.....	169
7.6 Conclusões.....	172

## **Capítulo 8 – Módulo de Reabilitação Prefabricado – MRP – Solução Final**

8.1 Introdução .....	174
8.2 MRP – Seleção da Solução Final .....	174
8.2.1 Avaliação da Presença de Pontes Térmicas .....	175
8.2.2 Avaliação do Risco de Formação de Condensação .....	177
8.2.3 Determinação do Rácio Custo-Benefício.....	177
8.2.4 Conclusões .....	178
8.3 MRP – Solução Final .....	178
8.3.1 Composição.....	178
8.3.2 Pormenorização .....	179
8.3.3 Aspetos Ecológicos.....	180
8.3.4 Aceitação por Parte dos Utilizadores .....	182
8.3.5 Qualidade de Execução .....	182
8.4 Conclusões.....	182

## PARTE IV

### CASOS DE ESTUDO PARA ANÁLISE DA APLICAÇÃO DO MRP E DA REABILITAÇÃO INTEGRADA

## **Capítulo 9 – Casos de Estudo – Reabilitação Energética de Edifícios**

9.1 Introdução .....	184
9.2 Apresentação dos Casos de Estudo .....	184
9.2.1 Enquadramento .....	184
9.2.2 Edifício Multifamiliar Efenau.....	185
9.2.3 Edifício Unifamiliar Aldeia de Leste.....	186
9.3 Caso de Estudo I – Edifício Multifamiliar “Efenau” .....	187
9.3.1 Avaliação do Desempenho Térmico Inicial do Edifício Multifamiliar.....	188
9.3.2 Avaliação do Desempenho Térmico do Edifício Multifamiliar após Aplicação do MRP.....	190
9.3.3 Análise Económica da Aplicação do MRP no Edifício Multifamiliar .....	191
9.3.4 Proposta de Soluções para a Reabilitação Integrada do Edifício .....	194
9.3.5 Avaliação do Desempenho Térmico Final do Edifício Multifamiliar.....	197
9.3.6 Análise Económica da Reabilitação Integrada do Edifício Multifamiliar .....	198
9.4 Caso de Estudo II – Edifício Unifamiliar “Aldeia de Leste” .....	200
9.4.1 Avaliação do Desempenho Térmico Inicial do Edifício Unifamiliar .....	200
9.4.2 Avaliação do Desempenho Térmico do Edifício Unifamiliar após Aplicação do MRP.....	202
9.4.3 Proposta de Soluções para a Reabilitação Integrada do Edifício .....	203



9.4.4 Avaliação do Desempenho Térmico Final do Edifício Unifamiliar.....	204
9.5 Conclusão .....	206

## PARTE V

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### **Capítulo 10 – Conclusões e Trabalhos Futuros**

10.1 Conclusões.....	210
10.2 Trabalhos Futuros.....	214

#### **Referências Bibliográficas**

Referências Bibliográficas.....	218
---------------------------------	-----

#### **Anexos**

Anexo I – Bases de Dados do Desempenho Energético dos Edifícios (SCE) .....	232
Anexo II – Gráficos da Campanha de Medições a Edifícios Residenciais.....	239
Anexo III – Mapa de Quantidades para Produção de 4 Protótipos do Módulo MRP .....	257
Anexo IV – Gráficos da Campanha de Monitorização ao MRP .....	259
Anexo V – Brochura do Módulo de Reabilitação Prefabricado (MRP) .....	261



## NOMENCLATURA

**ADENE** – Agência para a Energia

**AICCOPN** – Associação dos Industriais da Construção Civil e Obras Públicas;

**APA** – Associação Portuguesa do Ambiente;

**AQS** – Água Quente Sanitária;

**ASHRAE** – American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refregação e Ar-Condicionado);

**ASTM** - American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Ensaios e Materiais);

**AVAC** – Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado;

**BCSD** - Business Council for Sustainable Development (Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável);

**DGEG** - Direção Geral de Energia e Geologia;

**DST** – Domingos da Silva Teixeira;

**ECBCS** – Energy Conservation in Buildings and Community Systems (Conservação de Energia em Edifícios e Sistemas da Comunidade);

**EDP** - Eletricidade de Portugal;

**EPBD** – Energy Performance of Buildings Directiva (Diretiva do Desempenho Energético dos Edifícios);

**EPS** – Expanded Polystyrene (Poliestireno Expandido);

**ETICS** – External Thermal Insulation Composite System (Sistema de Isolamento Térmico Exterior Compósito);

**EU / UE** – European Union / União Europeia;

**FCT** – Fundação para a Ciência e Tecnologia;

**FEE** - Fundo de eficiência energética;

**FPP** – Fundação Portuguesa do Pulmão;

**GEE** – Gases de Efeito de Estufa;



- IEA** – International Energy Agency (Agência Internacional de Energia);
- I&D** – Investigação & Desenvolvimento;
- INE** – Instituto Nacional de Estatística;
- IPCC** - Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intragovernamental sobre as Alterações Climáticas);
- ISO** - International Organization for Standardization (Organização Internacional de Normalização);
- MFPGD** – Módulo de Fachada Prefabricado de Grande Dimensão;
- MRESP** – Módulo de Reabilitação Estandarizado semi-prefabricado;
- MRP** – Módulo de Reabilitação Prefabricado;
- PNAC** – Plano Nacional para as Alterações Climáticas;
- QAI** – Qualidade do Ar Interior;
- RECOLCI** - Módulo de Reabilitação Prefabricado de Grande Dimensão;
- RCCTE**– Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios;
- RSECE** – Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização de Edifícios;
- SCE** – Sistema de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior;
- SIDS** - Sistema de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável;
- UN / NU** – United Nations / Nações Unidas
- UNEP** – United Nations Environmental Program (Programa Ambiental das Nações Unidas);
- WMO** – World Meteorological Organization (Organização Mundial de Meteorologia);
- XPS** – Extruded Polystyrene (Poliestireno Expandido Extrudido);



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Evolução da temperatura média global, nível médio do mar e altura do manto de neve no hemisfério Norte. Fonte: IPCC 2007, Lorenz 2008 .....	13
Figura 2.2 – Cenários com previsões da evolução da temperatura média global. Fonte: IPCC 2007, Lorenz 2008.....	13
Figura 2.3 – Fotografias identificando o degelo dos glaciares – Glaciar Athbasca, Parque Nacional Jasper, Canada. Fonte: <a href="http://www.worldviewofglobalwarming.org">http://www.worldviewofglobalwarming.org</a> @ Gary Braasch .....	14
Figura 2.4 – Eco-eficiência do setor energético – produção e transformação de energia. Fonte: APA, 2007 .....	17
Figura 2.5 – Tipos de fontes de energia renováveis. Fonte: EDP, 2006.....	19
Figura 2.6 – Tipos de fontes de energia não renováveis. Fonte: EDP, 2006.....	19
Figura 2.7 – Quantidade de eletricidade consumida em média por pessoa anualmente. Fonte: Arthus-Bertrand, 2009.....	20
Figura 2.8 – Evolução do PIB, Necessidades energéticas e intensidade energética mundial. Fonte: EU, 2006b.....	21
Figura 2.9 – Produção bruta elétrica a partir de Fontes de Energias Renováveis (FER), em Portugal Continental. Fonte: DGEG/MEID, PORDATA, 2012 .....	22
Figura 2.10 – Peso dos sectores no consumo de energia. Fonte: DGEG, 2009 .....	23
Figura 2.11 – Repartição dos consumos de eletricidade pelos diferentes usos finais. Fonte: ADENE, 2009 .....	23
Figura 2.12 - Edifícios segundo o tipo de estrutura, revestimento exterior e cobertura. Fonte: Censos, 2001.....	26
Figura 2.13 – Época de construção do parque habitacional português. Fonte: Censos, 2001.....	26
Figura 2.14 – Edifícios por época de construção e por necessidade de reparação nas paredes e caixilharias. Fonte: Censos 2001.....	27
Figura 2.15 – Necessidades de reparação. Fonte: Censos 2001.....	27
Figura 2.16 – Peso do setor da reabilitação no setor da construção em 2007 nos países Euroconstruct. Fonte: Euroconstruct.....	28
Figura 2.17 - Número de obras de reabilitação do edificado, por concelho, 2008. Fonte: INE. 2008.....	30
Figura 2.18 - Reabilitações do edificado e construções novas, Portugal, 1995-2008. Fonte: INE. 2009.....	30
Figura 2.19 – Aplicação do Sistema de Certificação Energética. Fonte: ADENE, 2011.....	32
Figura 2.20 – Reabilitação para patamares de edifícios de energia quase zero - edifício multifamiliar em Graz – Dieselweg, Áustria. Fonte: Miloni et al, 2011.....	34
Figura 2.21 – Reabilitação para patamares de edifícios de energia quase zero – edifício multifamiliar em Zurique, Suíça. Fonte: Miloni et al, 2011.....	34
Figura 2.22 – Exemplos do parque habitacional Português. Fonte: Santo, 2009.....	36
Figura 2.23 – Exemplos de patologias no parque habitacional. Esquerda – humidade ascensional; Direita – incrustações salina. Fonte: Rabun, Kelso, 2009.....	37
Figura 2.24 - Isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS. Fonte: ©Cype Ingenieros, S.A. ....	41
Figura 2.25 – Pormenor de fachada ventilada. Fonte: ©Cype Ingenieros, S.A. ....	42
Figura 2.26 – Composição do módulo base de reabilitação. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c.....	47



Figura 2.27 – Vista em planta do painel aplicado à parede do edifício a reabilitar. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	47
Figura 2.28 – Secção de corte do painel aplicado à parede do edifício a reabilitar. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	48
Figura 2.29 – Vista em planta do painel aplicado à parede do edifício a reabilitar - Fachada rebocada. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c.....	48
Figura 2.30 – Vista em planta do painel aplicado à parede do edifício a reabilitar - Fachada ventilada. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c.....	49
Figura 2.31 – Fachada com isolamento insuflado. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	49
Figura 2.32 – Processo de montagem do módulo. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c.....	50
Figura 2.33 – Valores de U ao longo do módulo de reabilitação. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	51
Figura 2.34 – Obtenção de resistência ao fogo para módulo base. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c ...	51
Figura 2.35 – Composição do módulo. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	53
Figura 2.36 – Detalhe do módulo prefabricado aplicado a uma parede existente. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	53
Figura 2.37 – Transporte do módulo até ao local e montagem. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	54
Figura 2.38 – Secção de corte com pormenor das juntas horizontais dos módulos. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	55
Figura 2.39 – Pormenor de favo solar. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	55
Figura 2.40 – Produção do protótipo do módulo de reabilitação prefabricado. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	58
Figura 2.41 – Colocação dos elementos de fixação. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c.....	59
Figura 2.42 – Primeira camada de isolamento. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	59
Figura 2.43 – Instalação das janelas no módulo. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c.....	59
Figura 2.44 – Isolamento entre os módulos. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	60
Figura 2.45 – Colocação do revestimento. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c .....	60
Figura 3.1 – Escolha dos dados climáticos e sombreamentos na ferramenta SOLTERM. ....	70
Figura 3.2 – Menus pop-up da ferramenta RCCTE-STE com as características genéricas do edifício. ....	71
Figura 3.3 – Tipologias de edifícios incluídos no Retrofit Advisor. ....	73
Figura 3.4 – Editor de colocação de envidraçados do HEED. ....	74
Figura 4.1 – Percentagem de frações certificadas por período de construção .....	84
Figura 4.2 – Número de edifícios certificados por ano construção .....	84
Figura 4.3 – Coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca dos edifícios por ano de construção .....	85
Figura 4.4 – Coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados dos edifícios por ano de construção	86
Figura 4.5 – Taxa de renovação do ar dos edifícios por ano de construção.....	87
Figura 4.6 – Necessidades energéticas dos edifícios por ano Construção .....	88
Figura 4.7 – Necessidades de energia primária dos edifícios por ano Construção .....	88
Figura 4.8 – Potência instalado dos sistemas de climatização dos edifícios por ano Construção.....	89
Figura 4.9 – Distribuição da classe energética de edifícios de habitação com sistemas de climatização (Potencia instalada superior a 25 kW).....	90
Figura 4.10 – Distribuição da classe energética de edifícios de habitação sem sistemas de climatização (Potencia instalada inferior a 25 kW) .....	90
Figura 4.11 – Distribuição da classe energética de pequenos edifícios de serviços com sistemas de climatização (Potencia instalada superior a 25 kW).....	91
Figura 4.12 – Distribuição da classe energética de pequenos edifícios de serviços sem sistemas de climatização (Potencia instalada inferior a 25 kW) .....	91
Figura 4.13 – Distribuição da classe energética de grandes edifícios de serviços.....	91



Figura 4.14 – Colocação e identificação dos sensores de fluxo de calor e termopares .....	95
Figura 4.15 – a) Porta-Ventiladora; b) Fluxo de calor na interceção entre parede e laje (cálculos realizados com a ferramenta de simulação – THERM).....	97
Figura 4.16 – Ponte térmica identificada através de câmara termográfica e respetiva correspondência com o RCCTE.....	97
Figura 4.17 – Vista aérea do edifício CS1. Fonte: Bing Maps .....	99
Figura 4.18 – Vista aérea do edifício CS2. Fonte: Bing Maps .....	99
Figura 4.19 – Vista aérea do edifício CS3. Fonte: Bing Maps .....	100
Figura 4.20 – Vista aérea do edifício CS4. Fonte: Bing Maps .....	101
Figura 4.21 – Vista aérea do edifício CS5. Fonte: Bing Maps .....	101
Figura 4.22 – Vista aérea do edifício CS6. Fonte: Bing Maps .....	102
Figura 4.23 – Vista aérea do edifício CS7. Fonte: Bing Maps .....	103
Figura 4.24 – Vista aérea do edifício CS8. Fonte: Bing Maps .....	103
Figura 4.25 – Vista aérea do edifício CS9. Fonte: Bing Maps .....	104
Figura 4.26 – Vista aérea do edifício CS10. Fonte: Bing Maps .....	104
Figura 4.27 – Vista aérea do edifício CS11. Fonte: Bing Maps .....	105
Figura 4.28 – Vista aérea do edifício CS12. Fonte: Bing Maps .....	106
Figura 4.29 – Resultados obtidos da medição do coeficiente de transmissão térmica (U) da envolvente opaca .....	109
Figura 4.30 – Resultados obtidos na medição da taxa de renovação do ar das habitações .....	110
Figura 4.31 – Imagens termográficas das habitações em estudo .....	112
Figura 4.32 – Resultados obtidos na medição do nível de iluminação natural das habitações .....	114
Figura 5.1 – Solução prefabricada e solução semi-prefabricada.....	120
Figura 5.2 – Isolamento da fachada compacta.....	121
Figura 5.3 – Isolamento da fachada ventilada.....	121
Figura 5.4 – Módulo de fachada prefabricado .....	121
Figura 5.5 – Módulo para ampliação de um espaço.....	121
Figura 5.6 – Solução tipo de painel GRC (betão com fibras de vidro) .....	122
Figura 5.7 – Aplicação do painel GRC (betão com fibras de vidro) (Fonte: F. Barth, L. Vefago, 2008).....	123
Figura 5.8 – Solução proposta para o sistema de reabilitação .....	125
Figura 5.9 – Processo de montagem do sistema de reabilitação – SFV .....	126
Figura 5.10 – Processo de montagem do sistema de reabilitação – SFV .....	126
Figura 5.11 – Processo de montagem do sistema de reabilitação – SFV .....	126
Figura 5.12 – Composição base do Módulo de Reabilitação Prefabricado .....	127
Figura 5.13 – Processo de aplicação do sistema de reabilitação – MRP – a um edifício. a) estrutura de suporte; b) pontos singulares; c) módulos de canto; d) aspeto final do edifício .....	128
Figura 5.14 – Modelo 3D da Habitação da Aldeia de Leste adaptado à ferramenta eQuest. ....	129
Figura 6.1 – Modelo 3D da 1ª versão do sistema de reabilitação .....	132
Figura 6.2 – Modelo 3D da 2ª versão do sistema de reabilitação .....	133
Figura 6.3 – Modelo 3D da 3ª versão do sistema de reabilitação. ....	133
Figura 6.4 – Composição do módulo MRP (vista de topo) .....	134
Figura 6.5 – Perspetiva 3D do MRP (a); Corte transversal com a estrutura de suporte (b); Corte transversal com o perfil-U (c); Corte transversal no centro do módulo (d). ....	135
Figura 6.6 – Módulos MRP sem o revestimento e barreira para-vapor. ....	135
Figura 6.7 – Módulos MRP sem o revestimento, barreira para-vapor e camada exterior do isolamento de cortiça .....	136
Figura 6.8 – Módulos MRP sem o revestimento, barreira para-vapor, camada exterior do isolamento de cortiça e isolamento de PXS. ....	136
Figura 6.9 – Vista de topo do módulo com orifício para passagem de tubagens.....	137



Figura 6.10 – Soluções existentes para o módulo MRP – a) base; b) com orifício para tubagens existentes ou cablagens; c) com tubagens novas.....	137
Figura 6.11 – Dimensões dos perfis laterais dos módulos e da estrutura de suporte .....	138
Figura 6.12 – Sistema de encaixe do módulo na subestrutura .....	138
Figura 6.13 – MRP: Ligação lateral entre módulos.....	139
Figura 6.14 – Ligação topo/base.....	139
Figura 6.15 – MRP: Ligação topo/base entre módulos .....	139
Figura 6.16 – Elemento de remate para janelas e portas.....	140
Figura 6.17 – Identificação das diferentes secções do painel MRP.....	141
Figura 6.18 – Solução alternativa do MRP.....	143
Figura 6.19 – Custo da intervenção Vs Amortização do investimento.....	145
Figura 6.20 – MTIR para as diferentes alternativas do MRP com diferentes cenários de taxas de atualização.....	146
Figura 6.21 – VAL para as diferentes alternativas do MRP com diferentes cenários de taxas de atualização.....	147
Figura 6.22 – VAL e MTIR para as diferentes alternativas do MRP .....	147
Figura 6.23 – Secção onde o painel encaixa na estrutura de suporte.....	148
Figura 6.24 – Módulo MRP – solução base: módulo colocado na estrutura de suporte – a) secção do módulo; b) magnitude do fluxo; c) diagrama de infravermelhos; d) linhas isotérmicas.....	149
Figura 6.25 – Módulo MRP – solução alternativa: módulo colocado na estrutura de suporte – a) secção do módulo; b) magnitude do fluxo; c) diagrama de infravermelhos; d) linhas isotérmicas.....	149
Figura 6.26 – Módulo MRP – solução base - Detalhe das linhas isotérmicas.....	150
Figura 6.27 – Módulo MRP – solução alternativa - Detalhe das linhas isotérmicas.....	150
Figura 6.23 – Secção transversal do módulo MRP em zona corrente – solução base.....	152
Figura 6.24 - Secção transversal do módulo MRP em zona corrente – solução alternativa .....	152
Figura 6.30 - Resultados obtidos para a temperatura e humidade ao longo da secção transversal do MRP em zona corrente – solução base.....	153
Figura 6.31 - Resultados obtidos para a temperatura e humidade ao longo da secção transversal do MRP em zona corrente – solução alternativa.....	153
Figura 7.1 - Perfis-U em aço (esq.) e estrutura de suporte (dir.).....	159
Figura 7.2 – Dimensões da subestrutura de suporte metálica (perspetiva). .....	160
Figura 7.3 – Pormenor do entalhe na estrutura metálica de suporte.....	160
Figura 7.4 – Localização dos parafusos de ligação das peças da subestrutura à parede existente.....	160
Figura 7.5 – Ligação isolamento XPS com perfis-U em aço (esq.); revestimento em alumínio em forma de caixa com isolamento de cortiça (centro); colagem do revestimento ao perfil-U (dir.) .....	161
Figura 7.6 – Aplicação da barreira pára-vapor (esq.); protótipo finalizado (dir.).....	161
Figura 7.7 – Fachada Sul das células de teste e pormenor do interior da célula de teste Passys com parede para teste .....	162
Figura 7.8 – Colocação da estrutura de suporte, aplicação dos módulos e preenchimento com isolamento.....	163
Figura 7.9 – Instrumentação dos painéis.....	164
Figura 7.10 – Modelo 3D das células de teste e esquema da instrumentação dos painéis .....	164
Figura 7.11 – Resultados obtidos pelo Sistema de monitorização.....	166
Figura 7.12 – Imagens termográficas dos protótipos MRP instalados nas células de teste.....	167
Figura 7.13 – Esfera de aço de 1kg .....	168
Figura 7.14 – Esfera de aço de 0,5 kg .....	168
Figura 7.15 – Definição do ponto de impacto no painel .....	169
Figura 7.16 – Ensaio de impacto com esfera de aço de 1kg e respetiva deformação.....	170



Figura 7.17 – Ensaio de impacto com esfera de aço de 0,5kg – altura de 0,20m .....	171
Figura 7.18 - Ensaio de impacto com esfera de aço de 0,5kg – altura de 0,61m .....	171
Figura 7.19 - Ensaio de impacto com esfera de aço de 0,5kg – altura de 1,22m .....	171
Figura 8.1 – Módulo MRP – a) fluxo de calor em zona corrente; b) fluxo de calor em zona de cavidade	175
Figura 8.2 – Módulo MRP – exemplo de secções críticas.....	176
Figura 8.3 – Módulo MRP – imagem de infravermelhos para identificação de pontes térmicas .....	177
Figura 8.4 – Composição do MRP.....	178
Figura 8.5 – Perspetiva 3D do MRP (a); Corte transversal com a estrutura de suporte (b); Corte transversal com o perfil-U (c); Corte transversal no centro do módulo (d). .....	179
Figura 8.6 – Soluções existentes para o módulo MRP – a) base; b) com orifício para tubagens existentes ou cablagens; c) com tubagens novas. ....	179
Figura 8.7 – MRP: Ligação lateral entre módulos.....	180
Figura 8.8 – MRP: Ligação topo/base entre módulos .....	180
Figura 8.9 – Elemento de remate para janelas e portas.....	180
Figura 8.10 – Interligações do módulo MRP: perfil-U com isolamento XPS (esq.); revestimento de alumínio e isolamento de aglomerado de cortiça (centro); aplicação do revestimento de alumínio (dir.) .....	181
Figura 9.1 – Caso de estudo 1 - Fachada a SE e SW, respetivamente .....	185
Figura 9.2 – Planta dos pisos 1,2 e 3 e respetivos apartamentos - B1Px_E (Bloco 1, Piso x, Esquerdo), B1Px_D (Bloco 1, Piso x, Direito), B2Px_E (Bloco 2, Piso x, Esquerdo), B2Px_D (Bloco 2, Piso x, Direito)	185
Figura 9.3 – Planta do sótão e respetivos apartamentos - B1S_F (Bloco 1, Sótão, Frente), B1S_E (Bloco 1, Sótão, Esquerdo), B2S_F (Bloco 2, Sótão, Frente), B2S_E (Bloco 2, Sótão, Esquerdo).....	186
Figura 9.4 – Características e fotografias do edifício Aldeia de Leste .....	187
Figura 9.5 – Edifício Efenau – Vista SW-SE (esquerda) e vista NW-SW .....	188
Figura 9.6 – Edifício Efenau – Vista SE-NE .....	189
Figura 9.7 – Modelação dos pisos com o DesignBuilder .....	189
Figura 9.8 – Necessidades nominais de aquecimento (Nic), de arrefecimento (Nvc) e de produção de águas quentes sanitárias (Nac) – Aplicação do módulo MRP.....	191
Figura 9.9 – Cortes do edifício reabilitado.....	194
Figura 9.10 –Planta da cave do edifício original (esq.) e reabilitado (dir.) .....	195
Figura 9.11 – Planta de piso do edifício original (esq.) e reabilitado (dir.).....	195
Figura 9.12 – Planta do sótão do edifício original (esq.) e reabilitado (dir.) .....	195
Figura 9.13 – Necessidades nominais de aquecimento (Nic), de arrefecimento (Nvc) e de produção de águas quentes sanitárias (Nac) – Reabilitação Integrada.....	197
Figura 9.14 – Modelo 3D do caso de estudo original: a) perspetiva frente; b) perspetiva traseiras .....	200
Figura 9.15 – Modelo 3D do caso de estudo original: a) corte do alçado Oeste; b) perspetiva de topo .	201
Figura 9.16 – Necessidades nominais de aquecimento (Nic), de arrefecimento (Nvc) e de produção de águas quentes sanitárias (Nac) – Aplicação do módulo MRP.....	203
Figura 9.17 – Estudo da aplicação das medidas de melhoria energética .....	204



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Edifícios concluídos para habitação familiar, por tipo de obra, 2001-2004. Fonte: INE. 2009 .....	29
Tabela 2.2 – Edifícios concluídos para habitação familiar, por tipo de obra, 2005-2008. Fonte: INE. 2009 .....	29
Tabela 2.3 – Proporção de reabilitação do edificado relativamente às construções novas de edifícios concluídos para habitação familiar, 2001-2008. Fonte: INE. 2009.....	29
Tabela 2.4 – Propriedades térmicas dos materiais com potencial de utilização no módulo de reabilitação .....	50
Tabela 4.1 – Identificação dos casos de estudo .....	94
Tabela 4.2 – Valor de FLD recomendado para tipo de espaço .....	98
Tabela 4.3 – Resumo das principais características dos edifícios estudados .....	106
Tabela 4.3 – Valor de U medido, estimado e de referência para os casos de estudo da campanha de medições .....	108
Tabela 4.5 – Valor da taxa de renovação do ar medido, estimado e valor mínimo para os casos de estudo da campanha de medições.....	109
Tabela 4.6 – Valor do fator luz-dia medido e recomendado para os casos de estudo da campanha de medições .....	113
Tabela 4.7 – Valor de U para os casos de estudo da campanha de medições e bases de dados SCE .....	115
Tabela 4.8 – Valor de infiltrações para os casos de estudo da campanha de medições e bases de dados SCE .....	115
Tabela 5.1 – Avaliação do desempenho energético das soluções de reabilitação.....	130
Tabela 6.1 – Caracterização dos materiais .....	141
Tabela 6.2 – Coeficiente de transmissão térmica por secção do MRP.....	141
Tabela 6.3 – Variação da espessura de isolamento do MRP e características associadas. ....	144
Tabela 6.4 – Variação da espessura de isolamento do MRP e características associadas. ....	145
Tabela 6.5 – Coeficiente de transmissão térmica das soluções .....	151
Tabela 7.1 – Nível de energia indicado para ensaio de impacto de corpo duro em paredes exteriores .	169
Tabela 7.2 – Nível de energia indicado para ensaio de impacto de corpo duro em paredes exteriores .	170
Tabela 7.3 – Cálculo das alturas a que deve ser largado o corpo de impacto.....	170
Tabela 7.4– Diâmetro e máxima profundidade das mossas resultantes dos ensaios de impacto.....	172
Tabela 8.1 – Coeficiente de transmissão térmica da zona de ponte térmica e corrente do MRP .....	176
Tabela 8.2 – Análise do rácio custo-benefício do módulo MRP para diferentes soluções.....	177
Tabela 9.1 – Características do edifício multifamiliar .....	186
Tabela 9.2 – Resultados obtidos para o edifício multifamiliar .....	189
Tabela 9.3 - Resultados obtidos para a simulação do edifício multifamiliar .....	190
Tabela 9.4 – Custo estimado para produção e aplicação do módulo MRP .....	192
Tabela 9.5 – Resultados obtidos para o edifício multifamiliar original e reabilitado .....	192
Tabela 9.6 – Características do edifício antes e depois de reabilitado.....	196
Tabela 9.7 – Distribuição da produção solar .....	196
Tabela 9.8 - Resultados obtidos para a simulação do edifício multifamiliar .....	197
Tabela 9.9 – Custo das intervenções a realizar no edifício multifamiliar .....	198
Tabela 9.10 – Resultados obtidos para o edifício multifamiliar original e reabilitado .....	199



Tabela 9.11 – Resultados obtidos para o edifício multifamiliar .....	201
Tabela 9.12 - Resultados obtidos para a simulação do edifício multifamiliar .....	202
Tabela 9.13 – Carga térmica associada aos diferentes elementos do edifício .....	203
Tabela 9.14 – Necessidades energéticas obtidas por simulação energética.....	205
Tabela 9.15 – Balanço energético do caso de estudo .....	206



## **CAPÍTULO 1 – ENQUADRAMENTO, INTRODUÇÃO E OBJETIVOS**

*"Todos somos responsáveis de tudo, perante todos." - Fiodor Dostoievski, Escritor. Rússia, 1821  
// 1881*



## 1.1 ENQUADRAMENTO

Os trabalhos de investigação e desenvolvimento expostos no decorrer desta tese de Doutoramento foram realizados ao abrigo da Bolsa de Investigação em Empresa BDE - SFRH/BDE /15599/2006 – e cofinanciados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) e pela empresa Domingos da Silva Teixeira - DST.

O objeto de investigação e desenvolvimento apresentado na tese, incluindo o Módulo de Reabilitação Prefabricado (MRP) – foi desenvolvido enquadrado no Projeto da Agência Internacional de Energia – IEA ECBCS Annex 50 - Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings – cujo principal objetivo era o desenvolvimento de sistemas de reabilitação prefabricados.

O enquadramento nacional do Projeto Internacional IEA Annex 50 foi assegurado através do Projeto financiado pela FCT – Reabilitação Energética de Edifícios – com a referência FCT - FCOMP-01-0124-FEDER-007189, o qual tinha como objetivo principal o desenvolvimento de soluções de reabilitação de fachadas através de sistemas prefabricados ajustados à realidade nacional.

## 1.2 INTRODUÇÃO

Atualmente é um facto consensual que um dos grandes desafios com que a humanidade se depara são as alterações climáticas e degradação do meio ambiente, os quais estão intimamente relacionados com o excessivo consumo e produção de energia.

Com vista ao desenvolvimento sustentável - conceito definido pelo relatório Brundtland, 1987 como a satisfação das necessidades presentes sem comprometer a capacidade de gerações futuras satisfazerem as suas necessidades - é crucial reduzir o consumo energético e o consumo intensivo de matérias-primas, de modo a que o nível de consumo de matérias-primas não seja superior à capacidade do planeta em as regenerar.

Um dos setores que mais contribui para o consumo global e emissões de Gases de Efeito de Estufa para a atmosfera é o setor da construção. Tal deve-se a diversos fatores, desde a utilização de processos de construção com elevados consumos energéticos e de matérias-primas, até à construção de edifícios sem preocupações de qualidade de envolvente e adequação ao clima local, bem como a utilização de sistemas pouco eficientes.



Por outro lado, as sociedades atuais exigem, cada vez mais, padrões de conforto mais elevados, o que, em conjugação com o baixo nível de qualidade da envolvente de grande parte do parque de edifícios, solicita a instalação de sistemas de climatização com potências elevadas e consequentemente com elevados consumos energéticos.

Considerando estes desafios, foram definidas diversas políticas e implementadas diversas estratégias com vista ao aumento da eficiência dos edifícios, com aplicação centrada na publicação de regulamentos mais exigentes, campanhas de informação dirigidas a diversos públicos-alvo e formação específica para os diversos intervenientes no projeto e construção de edifícios.

Algumas das mais importantes e recentes diretivas Europeias, em termos de eficiência energética dos edifícios, têm como objetivo alcançar as metas 20-20-20, obrigando à redução em 20% do consumo energético e utilização de 20% de fontes de energias renováveis até 2020, tal como é possível observar na recentemente remodelada Diretiva do Desempenho Energético do Edifícios (EPBD-recast) da União Europeia (EPBD, 2010) e na Diretiva relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis (EU, 2009).

Estas diretivas apresentam elevados níveis de exigência, uma vez que os novos edifícios já apresentam desempenhos energéticos elevados, e exigem também a utilização de fontes de energia renovável. Como tal, as mais recentes metas de desempenho para os novos edifícios apontam já para que estes sejam de energia quase zero ou até de balanço energético positivo, ou seja, o balanço entre a energia que consomem e a que produzem por via renovável é positiva.

No entanto, os edifícios existentes são aqueles que mais contribuem para o excessivo consumo energético do setor dos edifícios, considerando que o ciclo de vida do parque edificado é longo (> 50 anos) e que estes apresentam ainda um desempenho energético muito deficitário - muitas vezes nem com a aplicação de sistemas energéticos com elevadas potências é possível garantir as condições adequadas para o conforto térmico.

Assim, a **Reabilitação Energética** dos edifícios é um setor de atuação prioritária, tendo como objetivo atingir padrões energéticos que se coadunem com o desenvolvimento sustentável.

Em Portugal a discrepância entre o desempenho de edifícios novos e de existente é ainda mais premente, visto que desde os anos 80 até à introdução do sistema de certificação energética dos edifícios (SCE) em 2006, ter existido uma forte pressão por parte do setor da construção



em apenas se apostar na construção de edifícios em massa, sem preocupações de qualidade térmica, sendo apenas importante garantir os elevados índices de construção.

Por outro lado, o setor de arrendamento esteve durante muitos anos estagnado devido ao congelamento das rendas da maior parte dos contratos de arrendamento com mais de 30 anos. Tal significou uma diminuta aposta e investimento no mercado de arrendamento, verificando-se que este não era lucrativo, visto as rendas não serem suficientes nem para a realização de obras de conservação. Sendo assim, verifica-se que o parque habitacional Português apresenta um elevado estado de degradação, não tendo as condições de conforto térmico e de qualidade do ar interior adequadas, apresentando uma percentagem muito elevada de fogos com necessidade de reabilitação (INE, 2009).

Recentemente entrou em vigor o Decreto-Lei nº 31/2012, revendo o regime jurídico do arrendamento urbano e que tem como objetivo agilizar e facilitar o desenvolvimento do setor do arrendamento, com maior proteção dos proprietários e possibilitando a existência de uma alternativa viável à aquisição de habitação própria (DL nº 31/2012). Espera-se que este D.L. venha a alterar a atual situação do mercado de arrendamento.

Adicionalmente, devido à recente crise económica e bancária, a aquisição de habitação própria foi muito dificultada, através do aumento de taxas de crédito e impossibilidade de empréstimo da totalidade do valor da aquisição (é necessário, pelo menos, possuir 20% do valor da aquisição em capital próprio).

Por outro lado, com a entrada em vigor do sistema de certificação energética dos edifícios (SCE, 2006), sempre que haja um processo de venda ou aluguer de uma habitação é necessário a apresentação do certificado energético contendo a classe energética da mesma. Este facto resulta na possibilidade para quem compra ou arrenda de comparar as várias possibilidades em termos do seu desempenho energético, sabendo que quanto melhor a classe energética, menores serão os seus gastos em termos da fatura energética para manter a mesma com as condições térmicas adequadas.

Devido à combinação de todos os fatores anteriormente apresentados, verifica-se uma previsão consensual de uma elevada taxa de crescimento do setor da reabilitação energética dos edifícios. Desde já verifica-se uma grande aposta do setor da construção para a adequação das estruturas empresariais para a reabilitação energética dos edifícios.

No entanto, das soluções construtivas atualmente existentes no mercado para a reabilitação energética dos edifícios, poucas foram desenvolvidas especificamente para este setor, sendo baseadas em tecnologias convencionais, que se traduzem em intervenções demasiado



morosas, com elevados custos, principalmente de mão-de-obra, e que são muito dependentes de uma elevada competência da mesma.

Adicionalmente, no decorrer de grandes intervenções de reabilitação é comum que os mais recentes sistemas de climatização, ventilação, assim como as novas tecnologias (TV por cabo, Internet banda larga, etc.) necessitem de diversas condutas e cablagens, as quais, muitas vezes são de aplicação complexa em edifícios existentes, ou obrigando a “soluções à vista”.

Assim, é relevante o desenvolvimento de novas soluções otimizadas especificamente para este setor e para as reais necessidades e patologias do parque habitacional nacional, de forma a estarem disponíveis e adequadamente estudadas e pormenorizadas, antecipando assim os requisitos futuros que as empresas vão ter que imprimir aquando da sua aposta mais significativa neste setor.

Tal implica o desenvolvimento de soluções que não só assegurem o aumento da eficiência energética dos edifícios, mas que também possuam processos de aplicação adequados às especificidades deste tipo de intervenção, assim como garantam a qualidade final da mesma.

Considerando que o tipo de envolvente dos edifícios com maiores trocas térmicas com o exterior são as paredes de fachada, assim como são aquelas que exigem a intervenção mais morosa e complexa, será prioritário o desenvolvimento de soluções inovadoras para este tipo de envolvente.

Uma das tecnologias que apresenta maior potencial para aplicação em sistemas de reabilitação é a prefabricação. Esta tecnologia já tem sido aplicada ao setor da construção civil principalmente em termos estruturais, desde a aplicação de blocos prefabricados de betão a estruturas pré-moldadas (Richard, 2005).

A prefabricação permite a redução dos custos, a produção das soluções em série, uma maior rapidez na construção, redução da necessidade de acabamento em obra, possibilita um maior controlo de qualidade e não é tão dependente da qualidade da mão-de-obra.

Consequentemente, esta é uma tecnologia de uso elementar para a reabilitação de edifícios, visto permitir obras com menor duração, logo menor incomodo para os ocupantes, podendo significar a realização de intervenções que beneficiam significativamente o desempenho energético dos edifícios, com custos competitivos.

Atentando as problemáticas referidas, a Agência Internacional de Energia (IEA) iniciou um projeto de investigação e cooperação internacional – IEA ECBCS Annex 50 (Zimmerman, 2006a)



– cujos objetivos foram baseados no estudo das características dos parques habitacionais de diversos países (Suíça, Áustria, França, Suécia, Portugal, etc.), verificação da adequação das metodologias de cálculo das necessidades energéticas dos edifícios incluídas nos regulamentos nacionais e discutidas medidas inovadoras para a reabilitação energética de edifícios, incluindo diretrizes para o desenvolvimento de soluções de reabilitação prefabricadas.

De forma a adaptar e traduzir estas diretrizes para a realidade Portuguesa, foi criado um Projeto nacional financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, FCT – Reabilitação Energética de Edifícios.

Assim, esta Tese de Doutoramento apresenta parte dos trabalhos de Investigação e Desenvolvimento que o autor realizou no decorrer da sua participação nos projetos de investigação referidos e suportado pela Bolsa de Doutoramento em Empresa, cofinanciada pela FCT e pela empresa DST, S.A..

### 1.3 OBJETIVOS

As atividades de Investigação & Desenvolvimento apresentadas neste trabalho têm como principal objetivo o desenvolvimento de uma solução inovadora de reabilitação de fachadas, com recurso à tecnologia da prefabricação, e otimizada para o parque habitacional Português.

Como objetivos secundários foi definido a utilização de ferramentas de simulação, assim como a construção de protótipos da solução e sua monitorização, para validação do seu desempenho.

Com vista ao desenvolvimento e estudo da introdução no mercado da solução desenvolvida, mas também para cumprir os objetivos estipulados pelos projetos Annex 50 e FCT – Reabilitação Energética de Edifícios, foram definidos diversos objetivos complementares:

- 1) Verificar as atuais necessidades de reabilitação energética do parque edificado, nomeadamente as características térmicas da envolvente que necessitem da implementação de medidas corretivas, com o objetivo de atingir índices de eficiência energética adequados, e assim adequar a solução a desenvolver ao parque edificado Português;
- 2) Simular a aplicação da solução desenvolvida a casos de estudo selecionados, de uma forma isolada ou em conjunto com outras medidas de reabilitação tradicionais – climatização, ventilação, envidraçados, etc.

## 1.4 ESTRUTURA DA TESE

Os conteúdos apresentados ao longo da tese assentam em diferentes orientações seguidas para os trabalhos de Investigação & Desenvolvimento. Estas são refletidas na divisão da presente tese em cinco partes, composta por dez capítulos e quarenta e seis subcapítulos. A estrutura seguida para o desenvolvimento da tese foi a seguinte:

### **\_Parte I**

Composta pelos três primeiros Capítulos da tese, apresenta os objetivos e motivação para o trabalho, e analisa a importância da reabilitação energética dos edifícios com vista ao desenvolvimento sustentável da sociedade.

O Capítulo 1 tem como propósito o enquadramento da tese, a apresentação dos seus objetivos e respetiva organização.

O Capítulo 2 apresenta o estado da arte e enquadra a necessidade do desenvolvimento de soluções de reabilitação inovadoras, através da caracterização do parque edificado, o seu contributo para o setor energético e para as alterações climáticas.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia seguida para o desenvolvimento da solução de reabilitação de fachadas de edifícios, o estudo das ferramentas utilizadas, mas também os procedimentos de reabilitação que devem ser seguidos aquando de intervenções de reabilitação em edifícios.

### **\_Parte II**

Composta por dois Capítulos da tese, apresenta a identificação e análise do desempenho energético do parque edificado Português, assim como a apresentação do conceito base, segundo o qual devem ser desenvolvidas as soluções de reabilitação.

O Capítulo 4 inclui a identificação do desempenho energético de uma amostra representativa do parque habitacional Português, através da análise das Bases de Dados decorrentes do Sistema de Certificação Energética Português (SCE) dos edifícios, assim como da realização de uma campanha de medições a edifícios residenciais, com diferentes tipologias e em diferentes regiões climáticas.

O Capítulo 5 apresenta o conceito base para o desenvolvimento de soluções inovadoras para a reabilitação energética de fachadas de edifícios, assim como as decorrentes propostas de soluções.



### **\_Parte III**

Composta por três Capítulos da tese, apresenta o desenvolvimento da solução base do módulo de reabilitação prefabricada de fachadas de edifícios – MRP, assim como os métodos seguidos para a otimização do seu desempenho, a seleção da solução final através dos resultados obtidos através dos ensaios numéricos assim como da campanha de medições realizada aos protótipos do módulo e a apresentação da solução final.

O Capítulo 6 inclui a apresentação do Módulo de Reabilitação Prefabricado, desde os seus aspetos gerais, até à sua pormenorização e método de aplicação. Seguidamente foi apresentada a verificação numérica do desempenho da solução base, passando pela avaliação do desempenho higrotérmico – pontes térmicas e ocorrência de condensações – além da obtenção da espessura ótima de isolamento.

O Capítulo 7 apresenta os ensaios laboratoriais realizados a protótipos do MRP, em termos do seu desempenho térmico e mecânico, através da aplicação dos mesmos a um edifício de teste e respetiva monitorização.

No Capítulo 8 é apresentada a versão final do módulo prefabricado de reabilitação – MRP – incluindo as suas características gerais, pormenorização e indicadores do desempenho térmico. A solução final do módulo MRP foi desenvolvida tendo em consideração os resultados obtidos com a otimização do desempenho higrotérmico, a identificação da espessura ótima, e a validação obtida através dos ensaios laboratoriais.

### **\_Parte IV**

Composta por um Capítulo da tese, inclui a apresentação dos casos de estudo utilizados para a análise da aplicação do módulo MRP.

O Capítulo 9 apresenta a aplicação do módulo MRP a dois casos de estudo com duas tipologias diferentes – edifício multifamiliar e edifício unifamiliar - para verificação do seu desempenho energético, através da utilização de ferramentas de simulação energética dinâmica. Foi avaliado o contributo do MRP de uma forma isolada ou em conjunto com outras medidas de reabilitação (Reabilitação Integrada).

### **\_Parte V**

Composta por um Capítulo da tese, inclui as considerações finais.

O Capítulo 10 incluiu a apresentação das conclusões obtidas no decorrer dos trabalhos de I&D realizados, assim como as propostas de trabalhos futuros a realizar de modo a otimizar e



prosseguir os estudos sobre a reabilitação energética de edifícios, nomeadamente a implementação no mercado da solução MRP.





## CAPÍTULO 2 – REABILITAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS

*“Abraçar uma economia de baixa emissão de carbono será tão importante quanto as anteriores revoluções industriais. Tal como a mudança do carvão para o petróleo. E a mudança da iluminação a gás para a iluminação elétrica. Ele tem o potencial para nos dar uma vantagem competitiva na nova economia global. A escala deste desafio é extraordinária. Teremos de nos reinventar, a maneira como vivemos as nossas vidas, a forma como o mundo funciona” - Charles Hendry, Ministro da Energia, Governo do Reino Unido (Junho, 2010)*



## 2.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo o enquadramento dos trabalhos de investigação na necessidade de desenvolvimento de soluções inovadoras com vista à reabilitação energética.

Para tal é apresentada a problemática das alterações climáticas decorrentes do excessivo consumo energético das sociedades modernas e o contributo do parque habitacional existente para o mesmo, apresentando-se assim a caracterização geral e energética do parque habitacional.

Seguidamente é introduzida a temática da reabilitação energética dos edifícios, o seu estado atual e perspetivas futuras. São também apresentadas as soluções de reabilitação mais correntes em Portugal e verificada a necessidade de desenvolver novas soluções de reabilitação aplicando novas tecnologias específicas para as particularidades existentes em obras de reabilitação. Identifica-se as vantagens da aplicação de tecnologias de prefabricação para a reabilitação energética de edifícios e apresentam-se algumas soluções de reabilitação inovadoras desenvolvidas para o mercado da França, Suíça e Áustria, com a aplicação da prefabricação.

## 2.2 A URGÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

### 2.2.1 Alterações Climáticas

As alterações climáticas são um fenómeno à escala mundial, que tem vindo a ser observado e monitorizado de forma intensa por diversos cientistas e organizações, reportando as suas conclusões maioritariamente em termos de aumento da temperatura média global e nível médio do mar. Tem sido uma tarefa muito árdua a chegada a um consenso relativamente à forma de obtenção dos indicadores apresentados.

Com o objetivo de garantir uma visão científica e consensual do estado do conhecimento sobre as alterações climáticas e os potenciais impactos ambientais e socioeconómicos, foi criado um Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC), estabelecido pelo Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP) e pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO). Até ao momento, O IPCC publicou quatro relatórios globais de avaliação do clima, os quais apresentam, de uma forma científica e validada, a evolução do clima terrestre, os quais têm vindo a ser utilizados por investigadores e entidades diversas (Lorenz, 2008) para demonstrar as alterações climáticas através da monitorização de parâmetros indicadores

dessas alterações (Figura 2.1), tais como os modelos de previsões da evolução da temperatura média global terrestre (Figura 2.2).

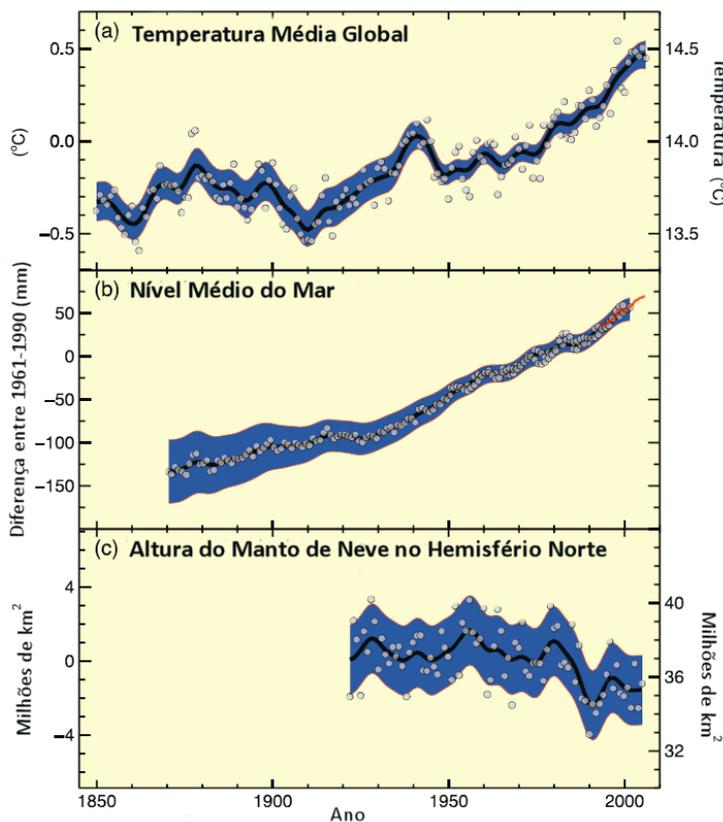


Figura 2.1 – Evolução da temperatura média global, nível médio do mar e altura do manto de neve no hemisfério Norte. Fonte: IPCC 2007, Lorenz 2008

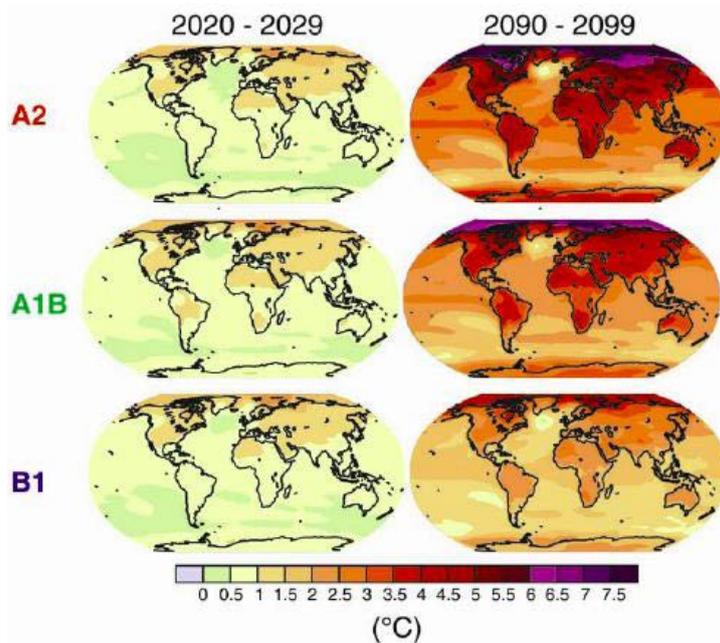


Figura 2.2 – Cenários com previsões da evolução da temperatura média global. Fonte: IPCC 2007, Lorenz 2008



Através dos indicadores de alterações climáticas monitorizados é possível concluir que, a partir da revolução industrial e consequente massificação da utilização das máquinas a vapor no final do século XIX, a temperatura média global apresenta uma tendência vincada de aumento, resultando assim na redução dos glaciares e aumento do nível médio da água dos mares, como se pode observar na Figura 2.3.

As temperaturas médias globais subiram  $0,74\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , quando estimados através de tendência linear ao longo do últimos 100 anos (1906-2005). A taxa de aquecimento nos últimos 50 anos é quase o dobro da taxa dos últimos 100 anos ( $0,13\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$  vs  $0,07\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$  por década) (IPCC, 2007).

As temperaturas médias globais das superfícies terrestres e oceânicas, obtidas a partir de três diferentes estimativas, cada qual ajustada independentemente para várias questões de homogeneidade, são consistentes dentro das estimativas da incerteza durante o período de 1901-2005 e mostram taxas de crescimento semelhantes para as últimas décadas (Lorenz, 2008).



Figura 2.3 – Fotografias identificando o degelo dos glaciares – Glaciar Athabasca, Parque Nacional Jasper, Canada. Fonte: <http://www.worldviewofglobalwarming.org> @ Gary Braasch

Adicionalmente, o IPCC no seu último relatório sobre o clima (IPCC, 2007), apresenta vários cenários para a evolução da temperatura média global até ao final do século XXI. Assim, a Figura 2.2 apresenta três possíveis cenários para a evolução da temperatura média:

- \_A2 – rápido crescimento social, menor crescimento económico e menor grau de globalização;
- \_A1B – rápido crescimento económico e social, continuando a ser baseada numa estrutura de consumo intenso de combustíveis fósseis;
- \_B1 – mitigação das emissões nocivas devido à crescente eficiência na utilização dos recursos e avanço tecnológico.

A ênfase das previsões realizadas está na adoção de soluções globais para o desenvolvimento da sustentabilidade económica, social e ambiental, incluindo a melhoria da equidade, mas sem



incluir medidas específicas para mitigar as alterações climáticas. Mesmo considerando as mais favoráveis previsões apresentadas, estas indicam um aumento da temperatura média global que pode atingir os 4°C.

Assim, cada vez mais existe um consenso global que dois dos grandes desafios com que atualmente a Humanidade se depara, são a problemática das alterações climáticas e a depleção das matérias-primas, incluindo combustíveis fósseis. (Williams, 2002).

No entanto uma total e inequívoca imputação da causa das alterações climáticas apenas às atividades humanas é algo quase impossível de comprovar, considerando todas as variáveis envolvidas (Todorovic, Kim, 2012).

Surge assim o conceito do **desenvolvimento sustentável**, ou seja, *um desenvolvimento que tem como objetivo satisfazer as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades* (Bruntland, 1987).

Outro importante conceito é o **desenvolvimento humano**, o qual envolve a *expansão das liberdades das pessoas e capacidades para levar uma vida que eles valorizam e têm razão para valorizar*. Diversos meios são necessários para conseguir atingir os padrões atuais de qualidade de vida, os quais podem ser intrínsecos bem como externos – por exemplo, a biodiversidade ou a beleza natural, podem ser considerados como importantes independentemente da sua contribuição para os padrões de vida atuais (UNDP, 2011).

Com base nos relatórios previamente mencionados, foi possível prever cinco mecanismos através dos quais as alterações climáticas podem inverter o atual desenvolvimento humano (UN, 2007):

- Produção agrícola e segurança alimentar – devido ao aumento da pluviosidade e temperatura;
- Crise e insegurança da água – devido ao degelo e subida dos níveis de água;
- Subida do nível dos oceanos e exposição a desastres climáticos – provoca inundações e o aquecimento dos mares fomenta tempestades tropicais mais intensas;
- Ecossistemas e biodiversidade - branqueamento dos corais, aumento da acidez dos oceanos;
- Saúde humana.



Assim, atualmente foram criados diversos mecanismos e iniciativas, nacionais e internacionais, para o desenvolvimento sustentável e humano, sendo o Protocolo de Quioto um dos mais importantes e reconhecidos acordos Internacionais para a redução das emissões dos GEE (United Nations, 1998), com vista à redução dos atuais impactes ambientais.

No entanto, a urgência da imposição de medidas para combater as alterações climáticas e promover o desenvolvimento sustentável não é consensual. Tal é devido, essencialmente, à forma politizada da cobertura de certa imprensa com elevada tiragem relativamente ao aquecimento global (New York Post, Times, etc.), principalmente entre 1988 e 2002, o que contribuiu para uma significativa divergência entre o discurso popular e o discurso científico (Boykoff, Boykoff, 2004). Mesmo considerando alguma contrainformação sobre as alterações climáticas, verificou-se que as sociedades, em geral e gradualmente, dedicam maiores recursos a esta problemática.

Ao nível da União Europeia, a problemática das alterações climáticas e proteção do meio ambiente tem vindo a ser considerada em diversas vertentes:

- Implementação de regulamentação energética mais exigente (assunto a ser abordado no ponto 2.3.2 e Capítulo 4) para a drástica redução do consumo energético e adoção de fontes de energia renováveis – proteção do meio ambiente através da redução das emissões de GEE e menor intensidade de utilização de matérias-primas;
- Criação de redes, à escala da EU, nas áreas da conservação da natureza, como a rede Natura 2000 – proteção do meio ambiente através da garantia da sobrevivência das espécies mais importantes da Europa e dos seus habitats (EU, 2009);
- Implementação de novas estratégias da UE para a poluição do ar – CAFE (Clean Air For Europe) – considerando que as alterações climáticas também se podem observar ao nível da qualidade do ar atmosférico e meio ambiente, causada sobretudo pelas atividades económicas, tais como indústria, transporte, geração de energia e agricultura, bem como pelas famílias. Estas estratégias pretendem obter melhorias significativas na qualidade do ar até 2020 e, assim, proteger os cidadãos e o ambiente de forma mais eficaz (EU, 2005).

Por outro lado, a União Europeia concluiu que a investigação e desenvolvimento são fundamentais para alcançar a sustentabilidade, ajudando a compreender e avaliar os padrões insustentáveis, fornecendo ferramentas para analisar a eficácia das diferentes opções políticas, e desenvolvimento e demonstração de tecnologias mais limpas. Desde o início de 1980, a União Europeia financiou programas de I&D com o objetivo de atingir uma maior

sustentabilidade, colocando sofisticadas ferramentas de avaliação de impacto e de monitorização, bem como pesquisas do estado de arte, à disposição dos responsáveis políticos e partes interessadas (EU, 2006a).

Em Portugal, uma das principais iniciativas para a mitigação das alterações climáticas é o Plano Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC), tendo a última versão (2006) sido ratificada pela Presidência do Conselho de Ministros (D.R. nº 104/2006), para limitar o aumento das emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE) a 27% face aos valores de 1990.

Um dos principais pontos desta resolução é o suporte para a preparação do plano nacional de atribuição de licenças de emissão, pelo qual todas as empresas que potencialmente produzam emissões de GEE, vão necessitar de obter as licenças de emissão ficando assim limitadas às emissões incluídas na licença, possibilitando um controlo rigoroso de todas as emissões de GEE em Portugal.

Desde a implementação do PNAC, em 2001, é possível observar um aumento das despesas com a proteção dos solos, águas subterrâneas e superficiais; proteção da biodiversidade e paisagem; e gestão dos resíduos; investimento em tecnologias de redução e controlo da poluição (INE, 2006).

## 2.2.2 Indicadores de Sustentabilidade

A monitorização do estado do ambiente e da sustentabilidade é um ponto relevante, para o desenvolvimento sustentado das sociedades, possibilitando assim a melhoria da qualidade das decisões em gestão da sustentabilidade.

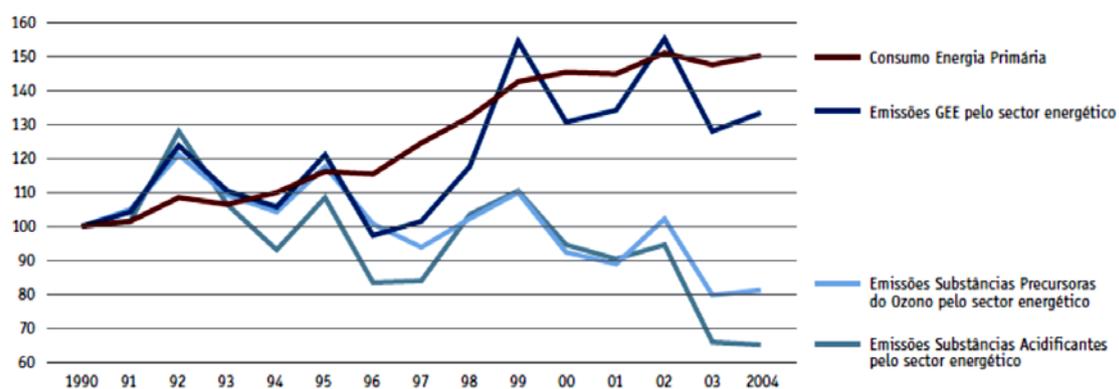


Figura 2.4 – Eco-eficiência do setor energético – produção e transformação de energia. Fonte: APA, 2007

Para tal foi criado um Sistema de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável – SIDS. Os indicadores de desenvolvimento sustentável constituem um instrumento fundamental no contexto da avaliação do desempenho da sustentabilidade, entre os quais é possível



encontrar: consumo de água, consumo de energia final, eco-eficiência dos setores de atividade económica, etc. (APA, 2007).

Estes indicadores foram monitorizados e estudados, possibilitando verificar a sua evolução ao longo dos anos, e atuar de forma a inverter os parâmetros com as evoluções mais negativas, tal como o consumo de energia primária pelo setor energético (Figura 2.4).

Com recurso aos indicadores apresentados, assim como outras fontes de informação, o conselho empresarial para o desenvolvimento sustentável – BSCD – apontava como principais desafios em Portugal para a construção sustentável os seguintes pontos (BSCD, 2006):

- O Ordenamento do Território, o Clima e o Lugar. A Paisagem e os Solos;
- O Uso Eficiente e Criterioso dos Recursos;
- A Qualidade do Ambiente Interior e da Saúde dos Utilizadores;
- Materiais de Construção mais Sustentáveis.

Considerando que o desenvolvimento sustentável tem como principal objetivo integrar os ciclos produtivos, tecnológicos e biológicos a fim de garantir o desenvolvimento contínuo de uma sociedade eficiente e integrada no seu ambiente, é fundamental desde a fase inicial de projeto a procura e otimização da totalidade do ciclo de vida de produtos, desde as matérias-primas, passando pelos materiais na sua forma final, componentes, produto obsoleto, até ao seu processamento em fim de vida. Tal envolve a otimização de recursos materiais, energia e capital (BSCD, 2007).

## 2.3 ENERGIA

### 2.3.1 Considerações Gerais

A energia pode ser caracterizada consoante a sua forma – térmica, mecânica, elétrica, radiante, química, nuclear – ou o tipo de fonte – renovável (Figura 2.5) ou não renovável (Figura 2.6).

Em 1880, 97% da energia consumida no mundo provinha do carvão. Hoje, o petróleo é a principal fonte energética do mundo, satisfazendo 37% do consumo, seguido do carvão que representa 27% (EDP, 2006).

A União Europeia identifica como os grandes desafios globais de energia garantir o suprimento de energia para atender à crescente procura, proporcionando a todos o acesso aos serviços de energia e combater as causas e impactos das mudanças climáticas.



Figura 2.5 – Tipos de fontes de energia renováveis. Fonte: EDP, 2006

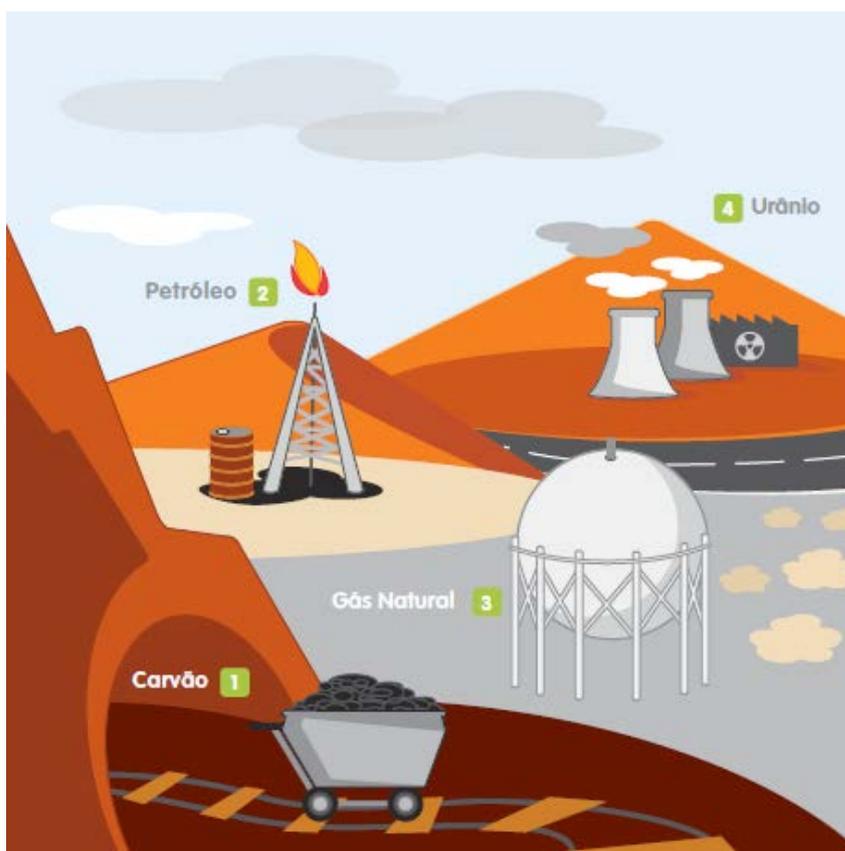


Figura 2.6 – Tipos de fontes de energia não renováveis. Fonte: EDP, 2006

Entre as prioridades específicas em matéria de energia, estas podem variar de região para região:



- Países industrializados e economias em rápido crescimento - apresentam como foco a segurança do abastecimento e a redução dos impactos ambientais decorrentes da utilização de energia, nomeadamente as alterações climáticas e a poluição atmosférica;
- Países e regiões mais pobres - para garantir o acesso aos serviços de energia de forma confiável, sustentável e acessível continua a ser um desafio fundamental. A energia é necessária para estimular a produção e geração de riqueza, o desenvolvimento social, mas também para reduzir os problemas de saúde graves causados pelo uso de lenha e outros combustíveis sólidos. (EU, 2006b).

Esta disparidade da intensidade elétrica nas diversas sociedades pode ser observada na Figura 2.7.

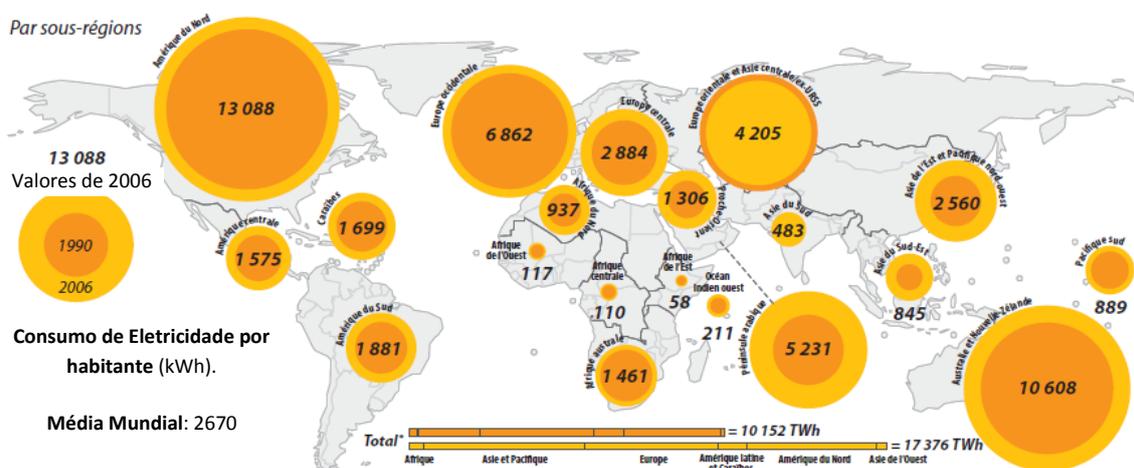


Figura 2.7 – Quantidade de eletricidade consumida em média por pessoa anualmente. Fonte: Arthus-Bertrand, 2009

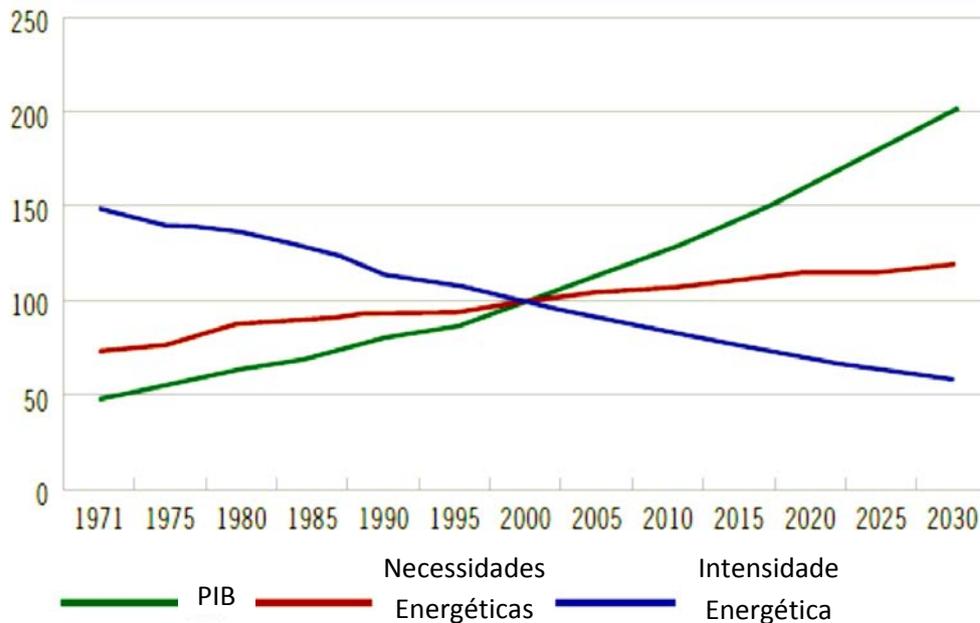
No entanto, se as políticas energéticas se mantiverem inalteradas, as necessidades energéticas mundiais vão continuar a aumentar, podendo estas duplicar em 2030, conforme apresentado na Figura 2.8 (EU, 2006b).

Portugal é um país com uma elevada dependência energética, visto produzir apenas 15% da energia que consome. Fica, deste modo muito exposto às flutuações do mercado, situação que se agrava significativamente em períodos de crise económica, conforme se observa atualmente.

É possível verificar que entre 2004 e 2005 os custos com a importação de petróleo aumentaram em mais de 38%, muito devido ao aumento do consumo de eletricidade - 6% - enquanto que na UE25 este aumento foi apenas de 1,7% (EDP, 2006).

Para fazer face a esta dependência, verifica-se a necessidade de criar condições para a promoção e desenvolvimento de um mercado dos serviços energéticos, e para o desenvolvimento de medidas de melhoria da eficiência energética destinadas aos consumidores finais.

**Mtep** (Milhões de Toneladas Equivalentes de Petróleo)



**Figura 2.8 – Evolução do PIB, Necessidades Energéticas e Intensidade Energética Mundial.** Fonte: EU, 2006b

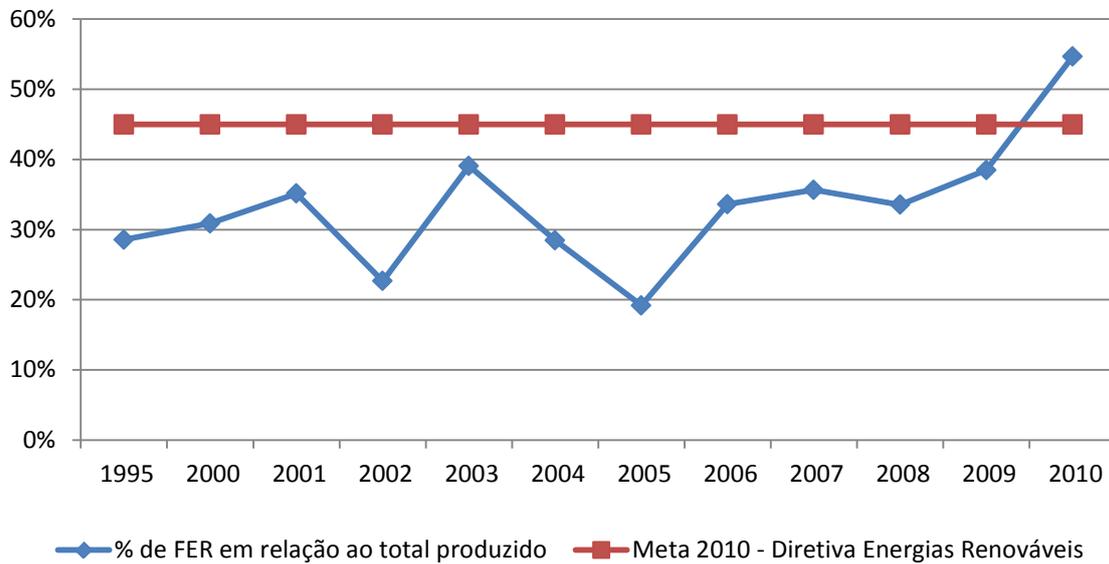
Tal pode ser atingido através de incentivos e quadros institucionais, financeiros e jurídicos necessários para ultrapassar os atuais constrangimentos e lacunas do mercado que impedem uma melhor eficiência na utilização final de energia através da penetração de equipamentos de baixo consumo e de medidas de racionalização do consumo de energia a adotar pelos consumidores finais, prevendo-se assim uma economia energética de 9 % para 2016 (DL nº 319/2009).

Uma das medidas apresentadas foi a criação de um Fundo de Eficiência Energética (FEE), o qual tem como objetivos incentivar a eficiência energética por parte dos cidadãos e das empresas; apoiar projetos de eficiência energética em áreas onde esses projetos não tinham sido desenvolvidos e promover a alteração de comportamentos nesta matéria (DL nº 50/2010).

Adicionalmente foi previsto o aumento da produção de energia elétrica através de fontes renováveis, em linha também com as metas previstas pela União Europeia - Produção de energia elétrica com origem em energias renováveis – 45% em 2010, tendo Portugal atingido a



meta imposta pela Diretiva Energias Renováveis e adotada para a regulamentação Portuguesa a partir da Estratégia Nacional para a Energia pela Resolução do Conselho de Ministros nº 169/2005, conforme apresentado na Figura 2.9.



**Figura 2.9 – Produção bruta elétrica a partir de Fontes de Energias Renováveis (FER), em Portugal Continental.**  
Fonte: DGEG/MEID, PORDATA, 2012

Atualmente o total da potência instalada a partir de fontes de energia renovável, em Portugal, atingiu 15 458 MW, em 2010, tendo beneficiado de um aumento de potência instalada eólica, hídrica, de biomassa sem cogeração e em microprodução.

Assim, a produção total de energia elétrica, a partir de fontes de energia renovável, cresceu 78% no 1º trimestre de 2010, relativamente a igual período de 2009 – componente hídrica aumentou 175% relativamente ao mês homólogo do ano anterior.

A produção eólica, no 1º trimestre de 2009, também cresceu de forma acentuada, principalmente devido a condições meteorológicas favoráveis, conjugadas com o aumento da potência instalada. Resultando num acréscimo de 57% relativamente a igual período do ano anterior (DGEG, 2010).

No entanto, as mais recentes metas impostas pela União Europeia (EPBD, 2010), já apontam que 20% do consumo de energia tenha de ser proveniente de fontes renováveis, até 2020. Quer isto dizer que a aplicação de painéis solares térmicos, microturbinas eólicas, painéis solares fotovoltaicos, entre outros, terá certamente um desenvolvimento acelerado.

Em termos do peso de cada setor económico no consumo de energia em Portugal, conforme apresentado na Figura 2.10, é possível verificar que o setor mais influente é o dos transportes,

com um aumento de 7% entre 1990 e 2008, seguido pelo setor da indústria, com um abrandamento de 6%, e o setor doméstico, com uma redução de 5% (DGEG, 2008).

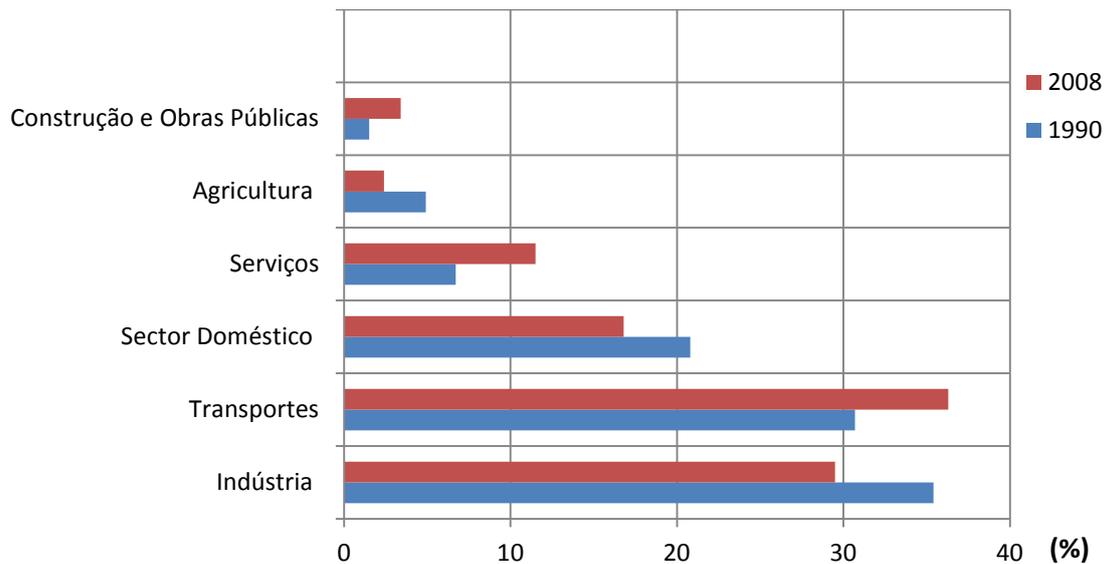


Figura 2.10 – Peso dos sectores no consumo de energia. Fonte: DGEG, 2009

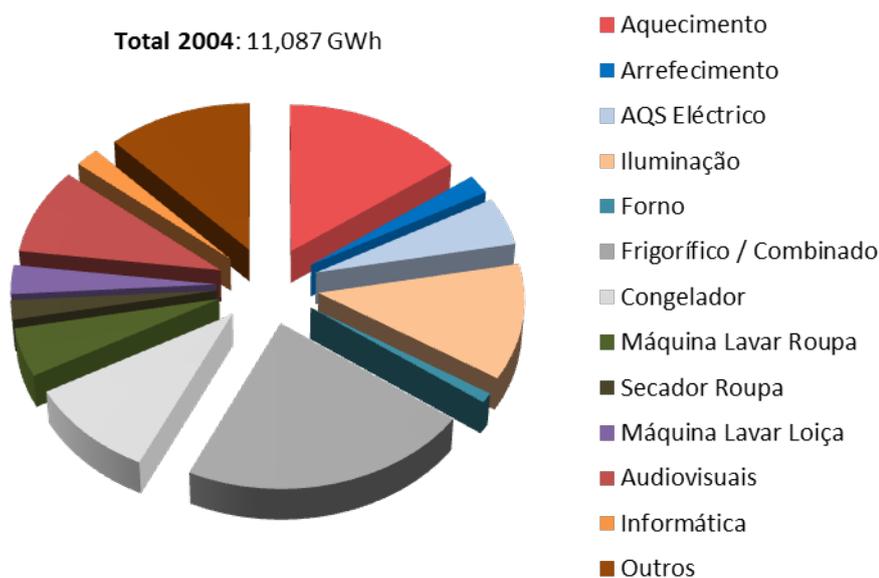


Figura 2.11 – Repartição dos consumos de eletricidade pelos diferentes usos finais. Fonte: ADENE, 2009

Relativamente à distribuição do consumo de eletricidade pelos diferentes usos finais, conforme apresentado na Figura 2.11, verifica-se que o tipo de uso com maior consumo elétrico são os frigoríficos / combinados, seguidos de perto pelo aquecimento, iluminação, congelador e AQS (ADENE, 2009).



## 2.4 EDIFÍCIOS

### 2.4.1 Caracterização Geral

Um dos sectores com maior peso no consumo de energia é o sector dos edifícios. Por exemplo, o parque de edifícios Europeu é responsável pela utilização de 33% das matérias-primas, 50% do consumo de eletricidade e 26% da energia final (16% por edifícios residenciais e 10% por edifícios de serviços) (Eurostat, 2010; Poel, 2007; Balaras, 2005).

Os edifícios e espaços envolventes respondem às necessidades humanas, originando na sua construção, operação e desativação, impactes mais ou menos diretos: nos recursos, nas emissões, nas cargas e nos ambientes construídos e de forma indireta nos ambientes naturais.

Um aspeto relevante a considerar assenta no facto de que para os edifícios satisfazerem as funções para que foram criados (por exemplo, residências, escritórios, entre outros) necessitam de infraestruturas e por isso, de forma indireta, também os impactes a elas associados podem decorrer da presença e operação dos edifícios.

Assim, para atingir a sustentabilidade devem ser consideradas as várias vertentes numa abordagem integrada, tendo em consideração a relação entre diferentes aspetos como a localização, o consumo de recursos que se traduzem na energia, na água, nos materiais e ainda na diminuição das cargas como os efluentes, as emissões e os resíduos e assegurar a qualidade do ar interior, a durabilidade e as acessibilidades dos empreendimentos (Pinheiro, 2006).

### 2.4.2 Caracterização do Parque Edificado Português

A partir dos Censos 2001 (INE, 2002), informações atualizadas anualmente fornecidas pelo INE e publicações do INE (INE, 2009) foram analisadas as tipologias caracterizadoras do parque edificado português e as necessidades de reabilitação. No desenvolvimento de sistemas de prefabricação torna-se necessário perceber a realidade do parque edificado, mais concretamente, o tipo de edifícios, as fachadas mais representativas, as necessidades de reabilitação e o potencial para essas ações de reabilitação.

É a década entre 1970 e 1980 que apresenta um maior número de edifícios construídos. Os edifícios mais numerosos possuem de um a três pisos (95%). O número de edifícios com mais de quatro pisos tem vindo a aumentar ligeiramente. Os edifícios exclusivamente residenciais representam 92% do parque edificado total. Um alojamento com um, dois e três pisos são o tipo de edifícios mais dominantes (88,3%), o que significa que as moradias são preponderantes no parque habitacional. O boletim Estatísticas do INE (INE, 2009) refere que comparando a evolução do número de fogos com a dos edifícios construídos, entre 1991 e 2007, conclui-se

que o ritmo superior da primeira variável tem implicado o aumento do número de fogos por edifício construído, permitindo concluir a preferência para a construção de edifícios de apartamentos em detrimento de moradias. Dois alojamentos e dois pisos também representam a maioria das situações (67%), ou seja, representa o típico edifício residencial com um alojamento por piso. Edifícios com quatro e cinco pisos e com cinco a nove alojamentos têm pouca significância em comparação com os anteriores mas mesmo assim ainda possuem alguma representatividade – 14%.

Nos edifícios com utilização parcialmente residencial são predominantes os edifícios de dois pisos e uma fração autónoma, o que caracteriza o edifício residencial com estabelecimento comercial no rés-do-chão. É também predominante a existência de um a três pisos e uma fração autónoma (62,4% do número total de edifícios parcialmente residenciais). Também são representativos edifícios com cinco a nove frações autónomas, sendo a maioria de três a cinco pisos. A partir de cinco pisos a existência de mais de dez frações autónomas já começa a ser relevante. Os edifícios predominantes têm fachadas de pequena altura apesar de os edifícios de grande altura continuarem com um crescimento importante.

A estrutura em betão armado e as paredes de alvenaria são sem dúvida os tipos de estrutura mais frequente. Os revestimentos mais utilizados são o betão à vista e o revestimento tradicional de argamassa. A cobertura inclinada continua a ser o tipo mais comum (Figura 2.12).

Observando a Figura 2.13 constata-se que cerca de 81% do parque habitacional português foi construído antes de 1990, ou seja, antes da entrada em vigor do primeiro Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), DL 40/90 de 6 de Fevereiro (RCCTE, 1990). Como tal, grande parte destes edifícios não tiveram quaisquer preocupações térmicas ou relativas a questões como o conforto e a eficiência energética, apresentando deficientes condições de conforto, consumos de energia excessivos e possíveis patologias associadas a uma inferior qualidade da envolvente e à idade dos edifícios (INE, 2009).

Uma grande percentagem dos edifícios construídos entre 1961 e os dias de hoje mostra necessidades de reparação. Os edifícios construídos entre 1961 e 1980 são os que apresentam maior necessidade de pequenas reparações embora um número significativo de edifícios mais recentes (64,406 - 18%), construídos entre 1996 e 2001, apresente também necessidades de reparações à data da realização do censo - 2000. Já relativamente aos edifícios anteriores a 1961, as necessidades de reparação médias, grandes e muito grandes são já em grande número, como seria previsível (Figura 2.14) (INE, 2009).

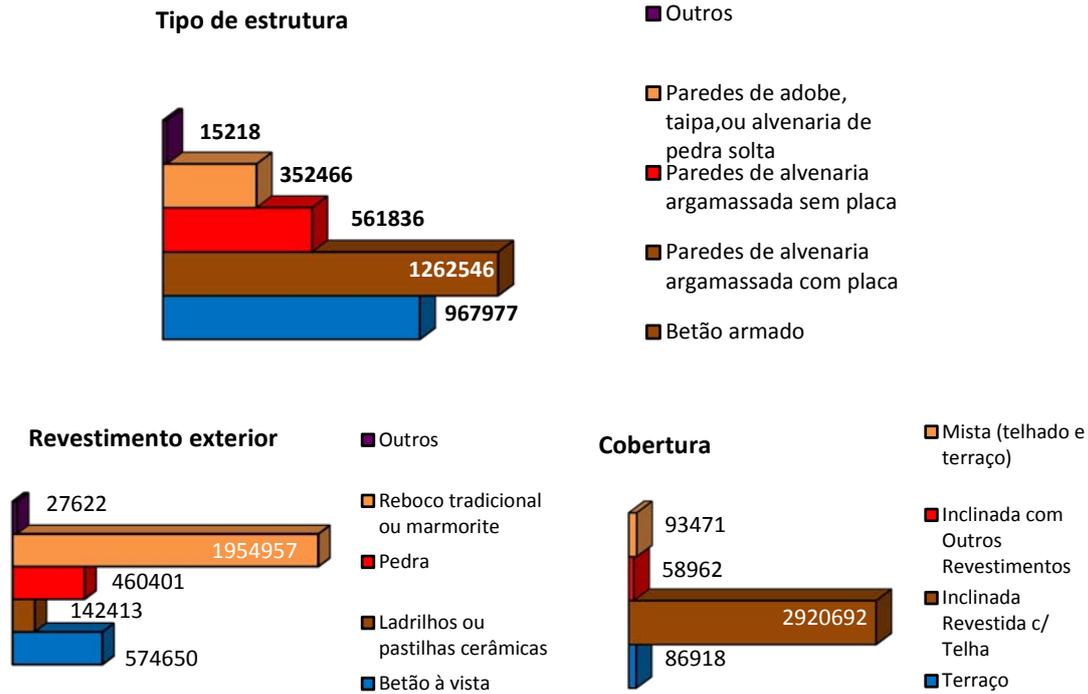


Figura 2.12 - Edifícios segundo o tipo de estrutura, revestimento exterior e cobertura. Fonte: Censos, 2001

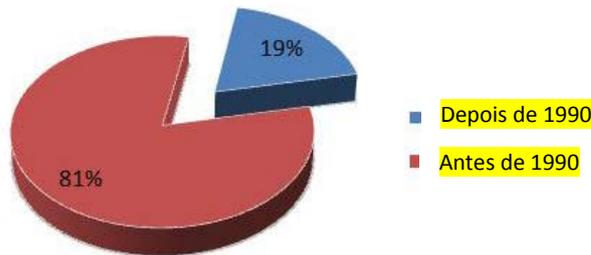


Figura 2.13 – Época de construção do parque habitacional português. Fonte: Censos, 2001

Não se encontrou facilmente informação disponível quanto à utilização de isolamento térmico na envolvente dos edifícios, embora existam alguns estudos sobre durabilidade. Em face disto, pode-se partir do pressuposto que a partir de 1991 (data de entrada em vigor do primeiro RCCTE) os edifícios apresentam algum nível de isolamento térmico.

Refira-se que se notou a necessidade de que este levantamento fosse ainda mais específico e pormenorizado nas questões relativas a materiais e elementos de construção constituintes dos edifícios. A informação disponibilizada quanto a necessidades de reparação também é muito limitada, já que não é definida a escala nem os limites do que se considerou pequena, média, grande e muito grande reparação.

No entanto, com a entrada em vigor do sistema de certificação energético de edifícios Português (SCE, 2006), tem vindo a ser possível a organização de uma base de dados muito útil

em termos de indicadores do desempenho energético dos edifícios, cujas conclusões serão apresentadas no Capítulo 4.

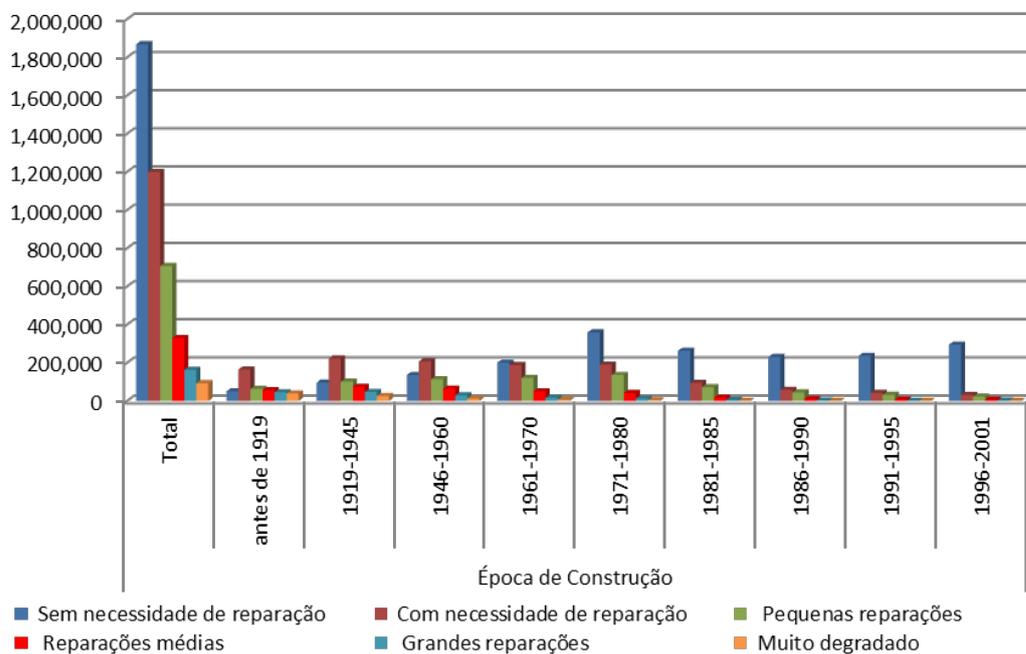


Figura 2.14 – Edifícios por época de construção e por necessidade de reparação nas paredes e caixilharias. Fonte: Censos 2001

## 2.5 CARACTERIZAÇÃO DO SETOR DA REABILITAÇÃO DE EDIFÍCIOS

### 2.5.1 Estudo do Mercado de Reabilitação

Atualmente em Portugal, cerca de 41% dos edifícios necessitam de obras de reabilitação (Figura 2.15). Consta-se que o sector da reabilitação representa apenas 26,5% do sector da construção o que é um valor muito abaixo da média europeia, sendo apenas superado pela Eslováquia (15,7%) e Irlanda (20,8%) (Euroconstruct, 2005). Em termos médios, o peso do sector da reabilitação no sector da Construção é de 43,1% (DGGE, 2005; IEA, 2002) como se pode comprovar pelo gráfico apresentado na Figura 2.16.

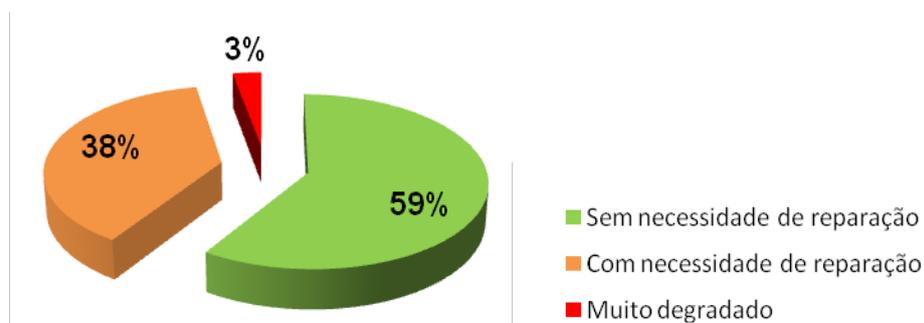


Figura 2.15 – Necessidades de reparação. Fonte: Censos 2001

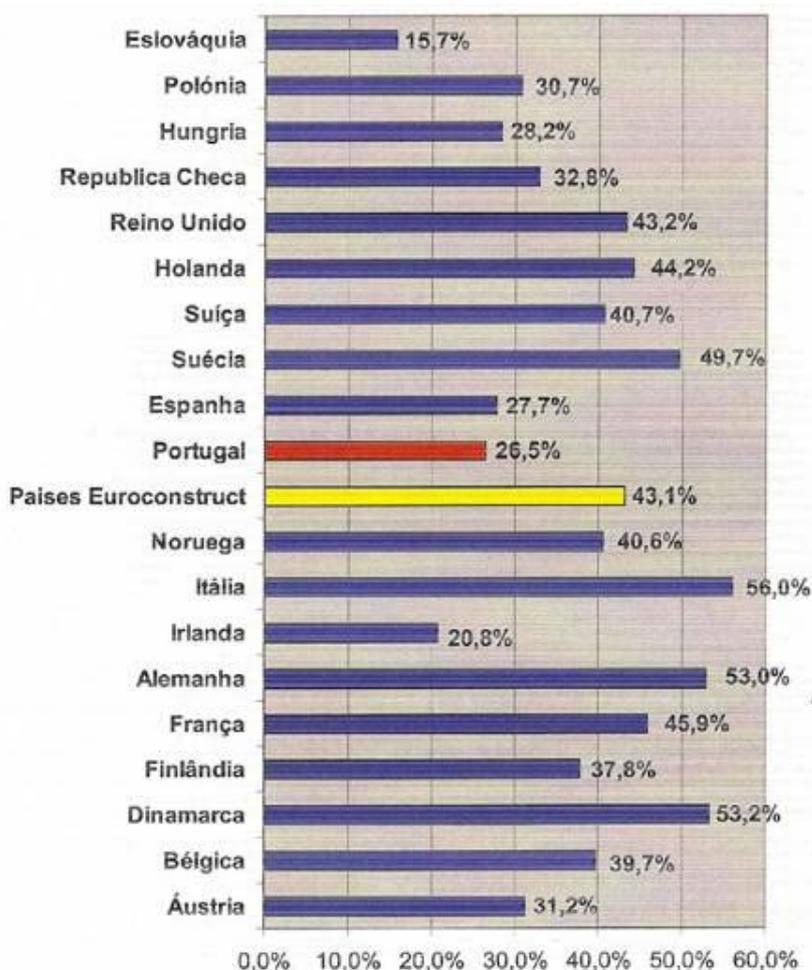


Figura 2.16 – Peso do setor da reabilitação no setor da Construção em 2007 nos países Euroconstruct. Fonte: Euroconstruct

Segundo os dados das Estatísticas da Construção e Habitação - 2008 do Instituto Nacional de Estatística (INE, 2009) o parque habitacional português possuía 3,4 milhões de edifícios e 5,7 milhões de fogos no ano de 2008, registando-se face ao ano anterior um acréscimo de 0,1% e 1,6% respetivamente.

Desde 2001 a 2008 é possível verificar uma redução no número de novas construções, conforme se verifica nas Tabelas 2.1 e 2.2. Embora, em 2008, 79,1% do total das construções correspondam a edifícios em construções novas, denota-se que a reabilitação de edifícios tem vindo a assumir um papel cada vez mais importante na atividade de construção em Portugal, ilustrado na Tabela 2.3.

Segundo o mesmo estudo efetuado pelo INE este facto comprova que existe uma saturação do mercado de novas habitações, centrando-se agora as empresas de construção no âmbito da reabilitação do edificado.

Em 2008 foram concluídas 43 582 obras das quais 35 748 eram construções novas para habitação, o que representa um crescimento de cerca de 5% face ao ano anterior, conforme apresentado na Tabela 2.2.

Dos 43 582 edifícios concluídos em 2008, cerca de 7 834 correspondiam a reabilitação do edificado (cerca de 21,9%). A reabilitação engloba obras de alteração, ampliação e reconstrução. Verificou-se relativamente ao ano de 2007 um acréscimo de 5,7% do número de edifícios reabilitados (Tabela 2.2 e 2.3) (INE, 2009).

**Tabela 2.1 – Edifícios concluídos para Habitação Familiar, por Tipo de Obra, 2001-2004.** Fonte: INE. 2009

	2001		2002		2003		2004	
	Construção Nova	Reabilitação do edificado						
<b>Total</b>	43219	8073	46470	7834	40542	7525	32534	6618

**Tabela 2.2 – Edifícios concluídos para Habitação Familiar, por Tipo de Obra, 2005-2008.** Fonte: INE. 2009

	2005		2006		2007		2008	
	Construção Nova	Reabilitação do edificado						
<b>Total</b>	33693	6666	29647	6430	33946	7550	35748	7834

**Tabela 2.3 – Proporção de reabilitação do edificado relativamente às construções novas de edifícios concluídos para habitação familiar, 2001-2008.** Fonte: INE. 2009

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
<b>Total</b>	18,7	16,9	18,6	20,3	19,8	21,7	22,2	21,9

A Figura 2.17 representa por concelho o número de obras de reabilitação de edifícios concluídas durante o ano de 2008, enquanto a Figura 2.18 apresenta a evolução do número de construções novas e de obras de reabilitação.

Analisando as Tabelas 2.1 a 2.3 e as Figuras 2.17 e 2.18 é possível verificar que o peso da reabilitação em relação à construção nova tem aumentado ligeiramente, o que se deve sobretudo ao decréscimo desta última.

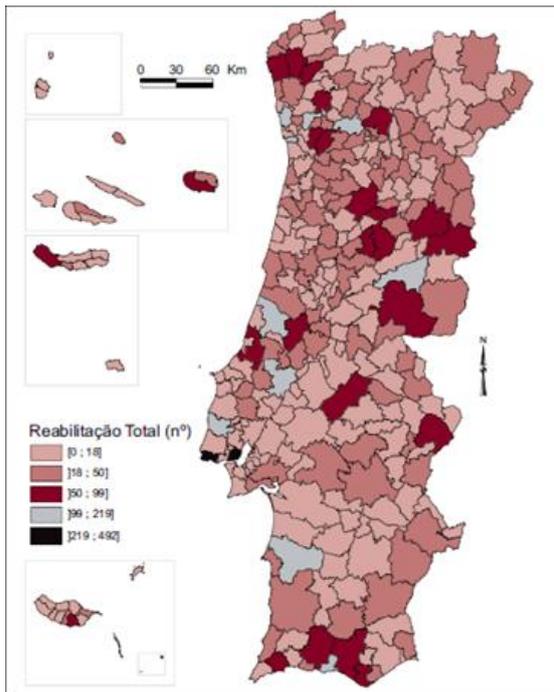


Figura 2.17 - Número de obras de reabilitação do edificado, por concelho, 2008. Fonte: INE. 2008

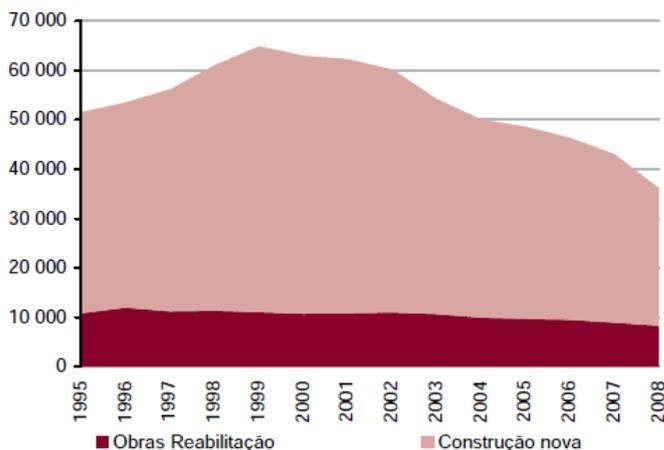


Figura 2.18 - Reabilitações do edificado e construções novas, Portugal, 1995-2008. Fonte: INE. 2009

A partir da análise detalhada realizada ao mercado de reabilitação de edifícios em Portugal, salienta-se o seguinte: este é um setor que apresenta um peso reduzido no mercado da construção.

No entanto, as tendências mostram um crescimento sustentado do mesmo, com previsões de um crescimento mais acentuado devido à atual crise económica e dificuldades na compra de nova habitação. Assim, o mercado de reabilitação Portuguesa tem vindo a evoluir de forma pouco dinâmica, não acompanhando a evolução sentida na maioria dos países da União Europeia, mesmo sabendo que o parque edificado não apresenta adequados níveis de

conforto térmico e de qualidade do ar interior. Para além disso, os edifícios existentes contribuem largamente para o valor total das emissões de Gases de Efeito de Estufa.

### **2.5.2 Perspetivas de Evolução do Setor da Reabilitação**

O setor dos edifícios tem vindo a sofrer um excessivo aumento do consumo de energia, principalmente para o aquecimento e também para arrefecimento, apesar de em níveis muito diferentes. Tal é devido ao aumento das exigências de conforto térmico por parte da população em geral (Silva, 2012).

Diferentes ações foram implementadas neste setor para melhorar a eficiência energética de edifícios, como por exemplo a adoção de regulamentos de energia mais restritivos (Aggerholm, 2011), aplicação de materiais de construção com menos energia incorporada, a implementação de soluções construtivas mais eficazes, aproveitamento das energias renováveis e educação e sensibilização de todos os intervenientes (Ayea, 2012; Denga, 2011; Stephensa, 2009).

Ao constatar estes desafios, a União Europeia deu um dos mais importantes passos no sentido de promover o desenvolvimento sustentável e reduzir o consumo excessivo de energia dos edifícios, ou seja, a introdução da Diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro de 2002, relativa ao desempenho energético dos edifícios - EPBD, 2002.

A EPBD tem como principais objetivos a harmonização de todos os regulamentos térmicos na UE e a otimização do desempenho energético dos edifícios, obrigando todos os países membros a transpor esta diretiva para a legislação nacional, impondo a obrigatoriedade de existência de certificados energéticos nas seguintes situações:

- Pedido de licença de utilização, em edifícios novos;
- Execução de grande reabilitação de edifícios existentes (custo superior a 25% do valor do edifício sem terreno);
- Periodicamente para todos os grandes edifícios de serviços (com mais de 1.000 m<sup>2</sup>);
- Locação ou venda de edifícios de habitação e de serviços existentes.

A transposição da diretiva EPBD em Portugal foi concretizada com a revisão da regulamentação térmica existente – Decreto-Lei nº 40/90 de 6 de Fevereiro – RCCTE, 1990 - Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios; Decreto-Lei nº 118/98 de 7 de Maio – RSECE, 1998 - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização de Edifícios; assim como pela entrada em vigor do Sistema de Certificação Energética.



Para tal foram aprovados os seguintes decretos:

- Decreto-Lei nº 78/2006 – SCE - Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios – o qual tem como principal objetivo permitir aos futuros utentes obter informação sobre os consumos de energia potenciais dos edifícios e que impõe a obrigatoriedade das auditorias energéticas e da Qualidade do Ar Interior nos edifícios;
- Decreto-Lei nº 79/2006 - vem substituir o RSECE – o qual tem a vertente de edifícios de serviços e edifícios residenciais com sistemas de climatização (Potência instalada superior a 25 kW).
- Decreto-Lei nº 80/2006 - vem substituir o RCCTE – o qual tem a vertente dos edifícios residenciais e edifícios de serviços sem sistemas de climatização (Potência instalada inferior a 25 kW).

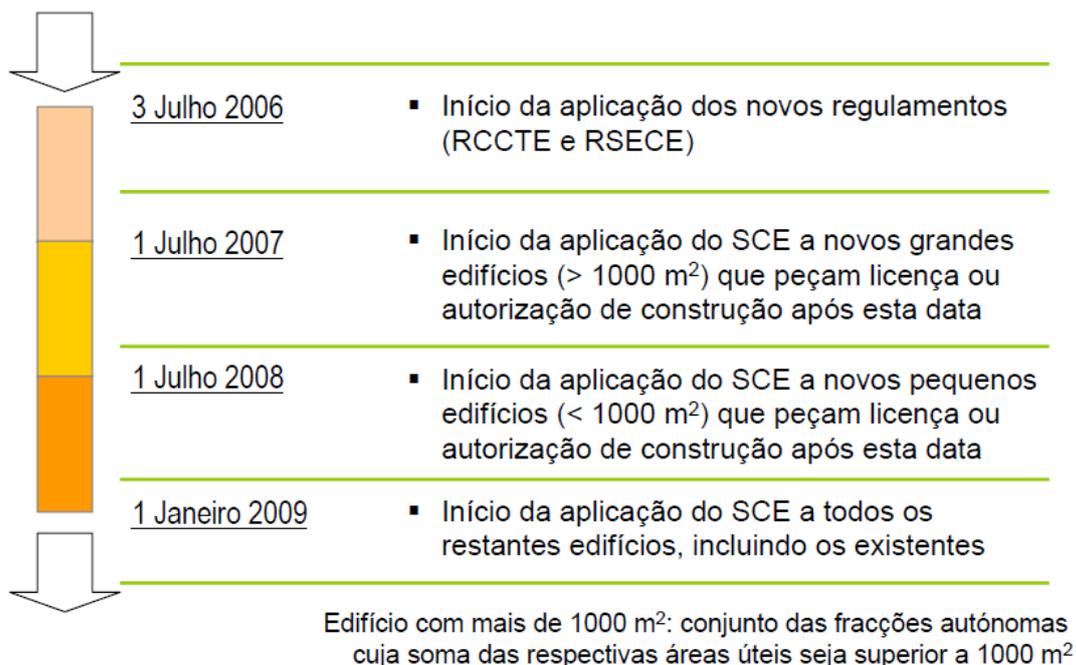


Figura 2.19 – Aplicação do Sistema de Certificação Energética. Fonte: ADENE, 2011.

A nova regulamentação energética em Portugal foi implementada em abril de 2006, no entanto o processo de certificação energética apenas foi obrigatória posteriormente, tendo sido posta em prática em 3 etapas (Figura 2.19):

- A partir de julho de 2007 foi obrigatório para todos os novos edifícios acima de 1000m<sup>2</sup>,
- Desde julho de 2008 é obrigatório para todos os edifícios novos;

- Desde 01 de janeiro de 2009 é obrigatório para todos os edifícios (edifícios existentes são forçados a ser certificados, se forem vendidos ou alugados).

Apesar da referida legislação, a eficiência do parque habitacional Europeu ainda não atingiu os padrões considerados como necessários. Assim, a Comunidade Europeia viu-se obrigada a agir redigindo novas diretivas, tais como a EPBD, EPBD recast—Energy Performance of Buildings Directive e a Diretiva 2009/28/CE (EPBD, 2002; EBPB, 2010):

- As diretivas EPBD tiveram como objetivo harmonizar a regulamentação Europeia em termos da eficiência energética dos edifícios e elaborar planos nacionais para garantir que os novos edifícios são de energia quase zero até 2020, sendo também necessário incluir a definição de energia quase zero que reflita as conjunturas nacionais, regionais ou locais;
- A Diretiva 2009/28/CE está relacionada com a introdução de fontes de energia renováveis para a produção de energia, tendo introduzido a estratégia de 20-20-20: todos os Estados membros têm de reduzir em 20% as emissões de CO<sub>2</sub> e o consumo de energia e garantir que 20% da energia é produzida através de fontes de energia renováveis em 2020.

Embora ainda não estejam definidos limites tangíveis para o conceito de edifícios de energia quase zero, ou seja, as suas fronteiras ainda não estão totalmente esclarecidas, as perspetivas apontam para que estes limites obedeçam a uma abordagem hierárquica da eficiência energética (Torcellini *et al*, 2006; European Commission, 2010; Jensen *et al*, 2009).

Em Portugal, a transposição das novas Diretivas mencionadas encontra-se em marcha, através da revisão da regulamentação energética – SCE, RSECE, RCCTE – sendo apontado o ano de 2013 como a data de entrada em vigor dos mesmos.

No entanto, as Diretivas mencionadas, e toda a discussão pública em torno deles, concentram-se principalmente em edifícios novos, ignorando, na maioria das vezes, os existentes, que vão enfrentar desafios semelhantes no futuro próximo. As normas existentes não respondem eficazmente às numerosas limitações deste tipo de edifícios e, muitas vezes, os requisitos resultam em medidas dispendiosas e procedimentos complexos, mal aceites pelos utilizadores, proprietários ou promotores.

Embora exista uma consciência global do consumo excessivo de energia do parque edificado, o mercado Português de reabilitação é, ainda, baseado em técnicas ultrapassadas e focado apenas na reparação de edifícios. Esta situação pode ser explicada pela falta de informação



generalizada da relação custo-benefício das soluções otimizadas disponíveis para os ocupantes, proprietários, promotores e políticos, mas também pelas políticas nacionais para o mercado de arrendamento, as políticas fiscais, os custos de renovação, aos grandes períodos de espera necessários para o licenciamento de obras de reabilitação, etc..

No entanto, prevê-se que os edifícios existentes terão que enfrentar desafios semelhantes no futuro próximo, conforme os exemplos apresentados nas Figuras 2.20 e 2.21, mas com um maior grau de dificuldade na implementação relativamente aos edifícios novos (BOMA, 2007; Garris, 2007), assim como maiores dificuldades para alcançar os níveis ótimos de renovação (Ding, 2005; Poel *et al*, 2007).



**Figura 2.20 – Reabilitação para patamares de edifícios de energia quase zero - edifício multifamiliar em Graz – Dieselweg, Áustria.** Fonte: Miloni *et al*, 2011.



**Figura 2.21 – Reabilitação para patamares de edifícios de energia quase zero – edifício multifamiliar em Zurique, Suíça.** Fonte: Miloni *et al*, 2011.

### **2.5.3 Motivação para o desenvolvimento de soluções de reabilitação para fachadas**

Em Portugal, as soluções construtivas de fachada têm evoluído ao longo das décadas, desde a alvenaria de pedra de grande espessura até às soluções mais leves e delgadas utilizadas atualmente (Baio Dias, 2009). No entanto, um dos problemas encontrados nos edifícios existentes é a falta de isolamento das fachadas, o que provoca grandes trocas energéticas e obriga a um gasto excessivo de energia para manter as condições de conforto dos ocupantes no interior do edifício.

Por outro lado, mesmo considerando edifícios que possuam isolamento térmico nas fachadas, este é, na sua grande maioria, insuficiente ou aplicado de forma incorreta, resultando assim na ocorrência de outras patologias graves, tais como as pontes térmicas, as quais podem promover o aparecimento de humidade e condensações.

Como tal, considerando a reduzida eficiência energética dos edifícios em Portugal, a reabilitação de edifícios em geral tem como um dos seus pontos fortes a reabilitação energética de edifícios, a qual tem como objetivo reduzir o consumo energético para aquecimento, arrefecimento, ventilação, iluminação e águas quentes sanitárias, não descuidando o conforto dos utilizadores do edifício. Em alguns casos, a reabilitação permite mitigar patologias relacionadas com a presença de humidade, assim como melhorar a estética dos edifícios, aspecto que por vezes se encontra bastante degradado.

Por outro lado, o parque edificado Português assume um estado de degradação com proporções que podem ser consideradas alarmantes (Figura 2.22). Tal, provoca uma redução na qualidade de vida das populações e deterioração do património edificado.

A necessidade de gestão de vários condóminos em edifícios de habitação multifamiliar, a complexidade e morosidade dos licenciamentos e autorizações e os elevados custos associados, têm sido apontados como as principais razões para crescimento comedido do mercado de reabilitação. Estudos realizados revelam que o custo da intervenção nas fachadas representa um investimento significativo dos seus ocupantes.

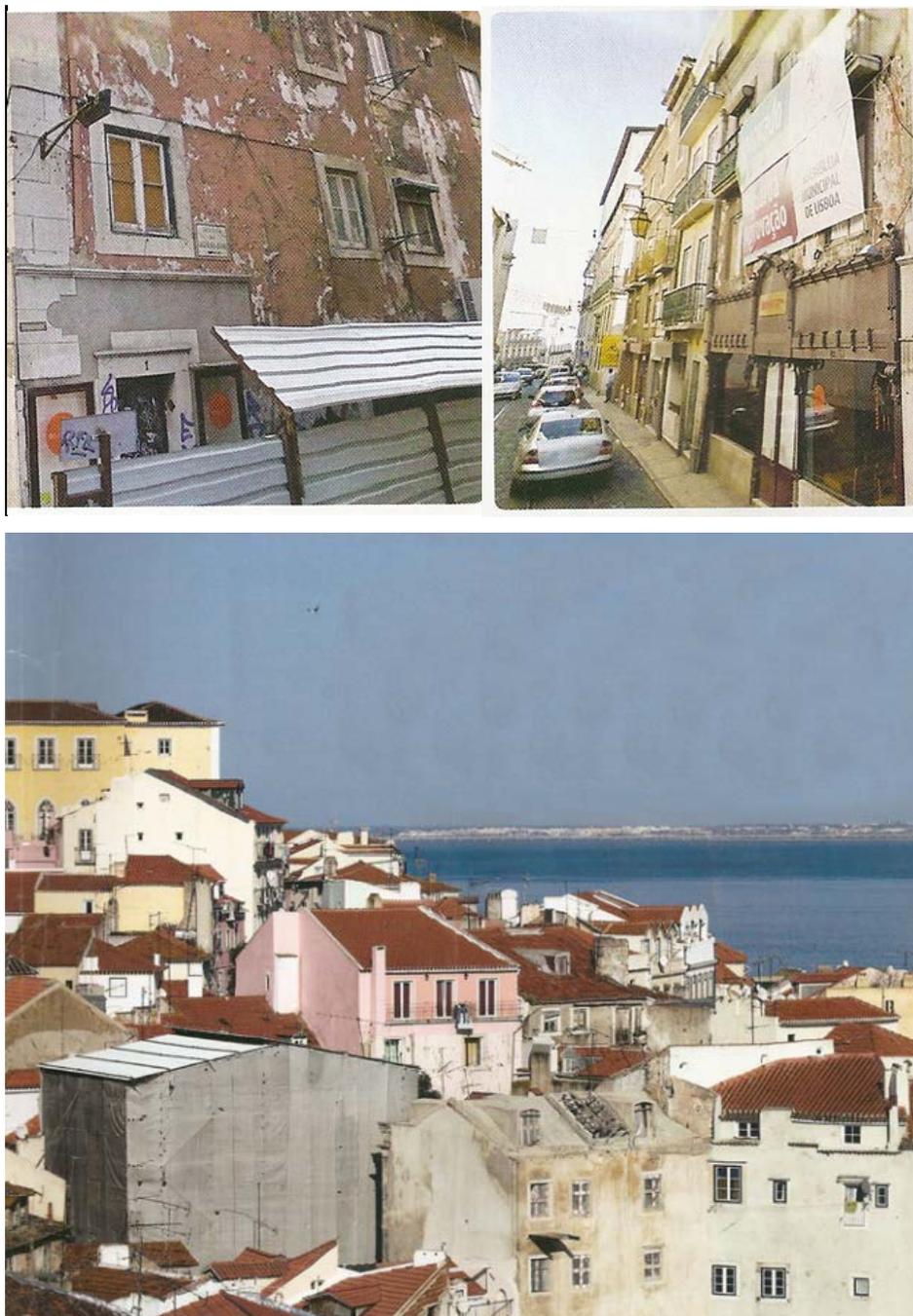
Em Portugal, o mercado de reabilitação Português assume atualmente uma enorme potencialidade, tendo sido identificado, num estudo recente do AICCOPN (Paes Afonso *et al*, 2009), que este poderá subir para 74.617,00 milhões de euros, portanto, um mercado emergente com grandes potencialidades e uma forte necessidade de ser regulamentado.

Assim, é possível verificar que, em geral, Portugal ainda não é sensível à necessidade e importância da reabilitação de edifícios, sendo sempre mais valorizada a construção de novos edifícios. No entanto, devido à recente crise mundial e às repercussões verificadas em Portugal, culminando com a intervenção da Troika, as linhas de crédito para construção de novos edifícios estão muito dificultadas, e as leis do arrendamento estão em revisão.

No entanto, como resposta às diretivas Europeias, o governo português anunciou no ano 2008, o Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética — Portugal Eficiência 2015 (PNAC, 2008), documento que engloba um conjunto alargado de programas e medidas consideradas



fundamentais para que Portugal possa alcançar e suplantar os objetivos fixados no âmbito da Diretiva Europeia n.º 2006/32/CE (EU, 2006c).



**Figura 2.22 – Exemplos do parque habitacional Português.** Fonte: Santo, 2009.

Estas medidas vão certamente dinamizar o mercado da reabilitação energética de edifícios. De salientar as medidas Renove Casa & Escritório - Sistema de Eficiência Energética (PNAEE, 2008), que agrupa as medidas que resultam do processo de certificação energética nos edifícios, num programa que inclui diversas medidas de eficiência energética nos edifícios, nomeadamente isolamentos térmicos, melhoria de vãos envidraçados e sistemas energéticos.

As medidas referidas são acompanhadas de incentivos / benefícios fiscais, além de apoio ao financiamento.

Por outro lado, com a entrada em vigor dos novos Decretos-Lei que regulamentam o comportamento térmico dos edifícios residenciais (RCCTE, 2006) e de serviços (RSECE, 2006) foi imposta a Certificação Energética (SCE, 2006), maiores limitações aos consumos energéticos dos edifícios, que conduzirão certamente a um maior número de ações de reabilitação. No caso de edifícios de serviços, em determinadas circunstâncias é obrigatória a execução de obras de reabilitação específicas enquanto nos edifícios residenciais essas obras de reabilitação são apenas sugeridas nos certificados energéticos ficando ao critério do proprietário implementá-las e com isso melhorar o seu desempenho energético, as condições de conforto, o aumento da classe energética e, conseqüentemente, o aumento do valor patrimonial do edifício.

Neste contexto, aliado ainda à atual crise económica do país, prevê-se que o setor da reabilitação tenha um impulso significativo a curto prazo, sendo assim necessário o desenvolvimento de novas soluções específicas para a renovação, testadas e validadas, fazendo face a estas novas necessidades, exigências e requisitos, e que atendem para as reais patologias (Figura 2.23) do parque edificado, assim como garantam o aumento da sua eficiência energética para patamares próximos dos edifícios novos de uma forma expedita.



**Figura 2.23 – Exemplos de patologias no parque habitacional. Esquerda – humidade ascensional; Direita – incrustações salina.** Fonte: Rabun, Kelso, 2009.

Mas apenas com informação adaptada a todos os principais intervenientes no mercado de reabilitação de edifícios, através de linguagem acessível e ferramentas simples, é possível que se entendam os benefícios, mas também os problemas e riscos associados à renovação de edifícios e do papel que devem adotar neste processo (ocupantes, decisores e técnicos).



Assim, é crucial a participação de todos os intervenientes nesta escolha, ajudando-os a estar cientes das soluções mais adequadas para suas necessidades, e incluí-los neste compromisso global.

Informações precisas e compreensíveis bem como ferramentas de auxílio devem estar disponíveis para que os intervenientes possam tomar as melhores decisões e escolher as melhores opções que se apliquem às suas necessidades específicas, ao clima e ao contexto regional.

Esta postura foi atualmente adotada pelo Departamento de Energia dos EUA, tendo disponibilizado guias e outros documentos acessíveis para todos os intervenientes, com regras de projeto para edifícios não residenciais de pequenas dimensões (ASHRAE, 2004).

Estes guias ou ferramentas podem ser de grande relevância para os Governos ajudando-os a definir as políticas, medidas e incentivos mais adequados, para pôr em prática uma estratégia de reabilitação efetiva (Wilde, Voorden, 2004; Meacham *et al*, 2005; Tzikopoulos *et al*, 2005; Strachan, Vandaele, 2008).

Recentemente, a Agência Internacional de Energia lançou um novo projeto – IEA ECBCS Annex 56 - Cost Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation – que foca a reabilitação energética de edifícios enquadrados no conceito de edifícios de energia e emissões quase zero, projeto este liderado por Portugal e pela Universidade do Minho – Manuela Almeida (Almeida, 2011).

O Projeto Annex 56 tem como principal objetivo o desenvolvimento de uma nova metodologia para a reabilitação eficiente, em termos da otimização da relação custo-benefício, de edifícios existentes, procurando um equilíbrio entre as medidas de conservação de energia e de eficiência energética e as medidas e tecnologias que promovam o uso de energias renováveis. A metodologia permitirá:

- Estabelecer metas de custo otimizado para as necessidades energéticas e para as emissões de carbono na renovação do edifício;
- Esclarecer a relação entre as metas de emissões e as metas de energia e sua eventual hierarquia;
- Determinar as combinações mais eficazes, em termos de custo/benefício, de medidas de eficiência energética e de medidas que promovam o uso de energia proveniente de fontes renováveis.

### 2.5.4 Metodologia de Reabilitação

Mesmo considerando as previsões do crescimento do mercado da reabilitação em Portugal, este é ainda considerado como demasiado caro ou ineficaz. Tal deve-se essencialmente ao facto de a prática corrente das intervenções nos edifícios existentes serem, maioritariamente:

- Ações de manutenção da envolvente do edifício, as quais não aumentam o desempenho energético do edifício;
- Ações isoladas de melhoria da envolvente ou sistemas, as quais podem aumentar o desempenho energético do edifício;
- Demolições e reconstruções, as quais resultam em edifícios novos com, potencialmente, desempenhos energéticos elevados. Mas tal apenas pode ser realizado em edifícios devolutos, ou quando todos os inquilinos aceitem um realojamento temporário.

Relativamente às ações isoladas de melhoria da envolvente, estas podem contemplar o isolamento e impermeabilização de coberturas e fachadas, substituição de envidraçados ou substituição / aplicação de equipamentos para aquecimento / arrefecimento ambiente. Estas intervenções podem levar ao aumento do desempenho energético do edifício, no entanto, ou têm tempos excessivos de aplicação ou o seu ligeiro aumento do desempenho energético traduz-se em tempos de amortização do investimento muito elevados.

Como tal, este tipo de intervenções ainda não é aceite como uma mais-valia para os edifícios, sendo ainda as intervenções mais correntes na envolvente dos edifícios aquelas que apenas são baseadas na conservação e manutenção das mesmas.

Com vista a corrigir os atuais princípios de atuação do setor da reabilitação de edifícios, atualmente surgiu o conceito de Reabilitação Integrada.

A reabilitação integrada, ao contrário das típicas intervenções de reabilitação de edifícios executadas em Portugal, consiste na melhoria de vários aspetos do edifício durante a mesma intervenção, como por exemplo, isolamento da fachada, pavimento e cobertura, introdução de melhores envidraçados, colocação de painéis solares, etc.. Tal permite atingir níveis de qualidade térmica superiores e reduzir o tempo de intervenção, reduzindo os custos inerentes à mão-de-obra e a incomodidade causada aos utilizadores do edifício.

Assim, é aconselhável que no estudo realizado para a execução de uma intervenção de reabilitação, sejam verificadas as possibilidades de aplicação de medidas de melhoria ligadas à



envolvente do edifício e aos seus sistemas e equipamentos mecânicos, e também o estudo de viabilidade da aplicação de sistemas baseados em energias renováveis.

Tal permite reduzir o tempo de intervenção, quando comparado com a duração total de aplicação das mesmas medidas mas de forma separada, reduzindo assim os custos inerentes à mão-de-obra e a incomodidade causada aos utilizadores do edifício.

Para tal, é necessário verificar quais são os aspetos mais relevantes do edifício em questão que condicionam o seu desempenho energético, como o isolamento das fachadas, coberturas e pavimentos, infiltrações de ar, qualidade dos envidraçados e sistemas. Depois de identificados todos os pontos críticos, projeta-se uma intervenção de reabilitação integrada onde todos estes parâmetros vão ser melhorados em conjunto, resultando assim em edifícios com desempenho elevado, semelhantes ou ainda melhores aos dos edifícios novos.

O objetivo final é assim dotar os edifícios existentes de uma eficiência energética e conforto próximos dos edifícios novos de baixo consumo; aumentar a qualidade da construção; otimizar os custos; diminuir o tempo de intervenção, com o mínimo de distúrbios para os moradores.

### **2.5.5 Soluções Existentes para a Reabilitação de Fachadas**

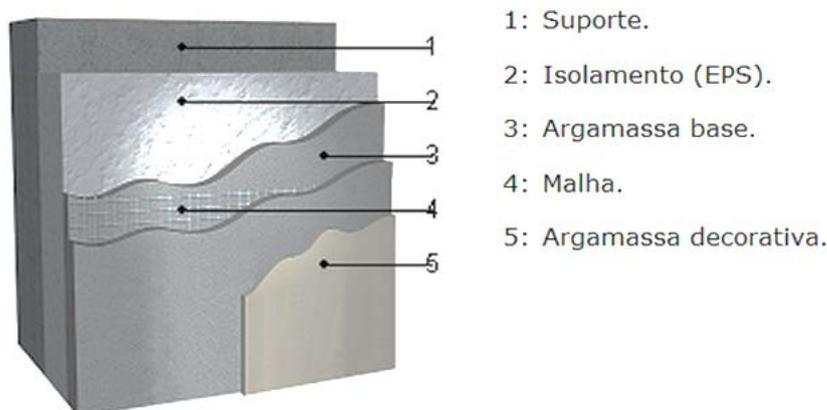
Para o desenvolvimento de soluções inovadoras para a reabilitação de edifícios, o passo inicial foi a pesquisa do mercado relativamente às soluções e materiais existentes.

Quanto a isolantes térmicos, existem hoje grandes avanços no que se refere a materiais que já se podem incluir no grupo dos super isolantes que aliam uma maior resistência térmica com uma menor espessura como é o caso dos isolamentos de vácuo ou os à base de aerogel. Também o custo destes materiais parece ser hoje mais acessível (Baetens(a), 2010). Existe igualmente uma série de novos materiais disponíveis e com propriedades muito interessantes para aplicação em novos sistemas como novos tipos de pinturas, revestimentos, materiais de mudança de fase entre outros (Cabeza, 2011; Baetens(b), 2010).

No decurso desta pesquisa foram verificados os sistemas de revestimento de fachadas prefabricados disponíveis comercialmente e a incidência destes sistemas no mercado português de construção de edifícios. Foi realizado igualmente um levantamento das soluções construtivas para isolamento térmico pelo exterior de fachadas noutros países da União Europeia.

Em Portugal começa agora a observar-se uma maior generalização da utilização dos sistemas de isolamento pelo exterior. Os sistemas do tipo ETICS (Figura 2.24) são um dos sistemas mais utilizados em edifícios novos e em reabilitação. Eles mantêm um aspeto visual de revestimento

aderente típico dos revestimentos tradicionais de argamassa. A sua aplicação ainda carece de mão-de-obra treinada e especializada.



**Figura 2.24 - Isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS.** Fonte: ©Cype Ingenieros, S.A.

Os sistemas de fachada ventilada têm hoje cada vez maior aplicação (Figura 2.25). A fachada ventilada proporciona uma série de vantagens para climas temperados. Os tipos de materiais dos painéis e os tipos de estruturas de suporte disponíveis são inúmeros. O funcionamento dos sistemas é básico e simples, assente essencialmente num regime de trocas térmicas por convecção na lâmina de ar ventilada. Os painéis são aplicados sobre uma estrutura intermédia, criando uma caixa-de-ar ou câmara-de-ar em movimento, entre o isolamento térmico posto na parede e os mesmos. A caixa-de-ar é um espaço onde se cria um efeito de chaminé, resultante do aquecimento do paramento exterior que provoca a variação da densidade do ar na caixa provocando um movimento de ascensão.

A fachada ventilada possuiu efetivamente muitas vantagens, e ainda mais vantajosa se torna em climas temperados e em clima mediterrânico, o que é comprovado por vários estudos (Giancola, 2012; Zhou, 2010; Hashemi, 2010).

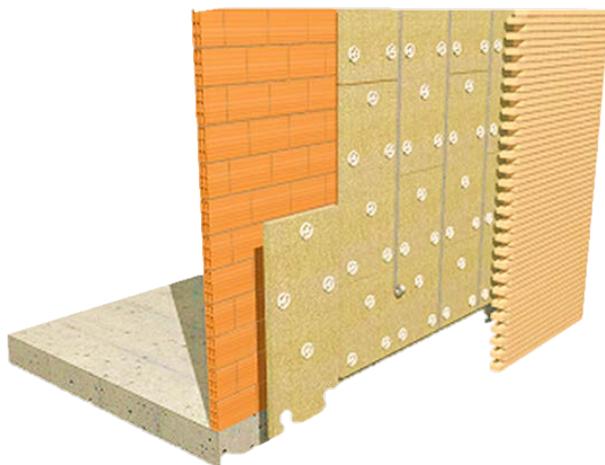
Ciampi (2003) e Fallahi (2010) revelam que as poupanças em energia de aquecimento podem chegar a 40-50%. Para além de se comportar muito bem no Inverno, possui um comportamento muito satisfatório no Verão, o que é hoje em dia, e face à questão do arrefecimento em edifícios, muito relevante.

Algumas das vantagens mais importantes dos sistemas do tipo fachada ventilada são:

- O seu comportamento no período de arrefecimento já que evita o sobreaquecimento das superfícies provocado pela radiação solar,
- Permite a utilização de menores espessuras de isolante térmico,



- Permite maior proteção das paredes interiores e otimiza a capacidade de armazenamento térmico contribuindo para um aumento da inércia térmica.



**Figura 2.25 – Pormenor de fachada ventilada.** Fonte: ©Cype Ingenieros, S.A.

A grande desvantagem deste sistema reside no seu custo inicial elevado sendo uma das razões porque a maior parte dos promotores dos empreendimentos não a utiliza.

Também se constatou, da análise e pesquisa efetuadas, que as soluções de fachada ventilada disponíveis no mercado proporcionam um desempenho térmico muito análogo e que a diferenciação assenta muito na questão estética. Não existem soluções que se diferenciem em termos de comportamento térmico e em termos de componentes e estrutura. Para além disso, os principais sistemas disponíveis no mercado nacional apresentam uma insuficiente definição e caracterização do seu desempenho energético.

Outro tipo de sistemas de revestimento e isolamento térmico disponíveis são os sistemas descontínuos prefabricados constituídos por isolante térmico associado a um revestimento que assegura a proteção do mesmo seguido de um acabamento estético da fachada, constituindo todos estes elementos um único elemento prefabricado. A sua colocação é realizada por assentamento direto sobre o elemento de suporte (parede, elementos estruturais etc.) sem deixar caixa-de-ar. A fixação é mecânica e normalmente invisível. O mercado português possui uma oferta quase nula deste tipo de sistemas, excetuando painéis sanduíche metálicos.

Noutros países europeus existe uma oferta mais diversificada, com revestimentos de vários materiais.

O que se pôde também constatar é que o mercado oferece apenas os componentes dos sistemas em separado (painel, estrutura de suporte, isolante térmico).

Em face desta primeira abordagem, parece necessário pensar em novos sistemas que tragam um desempenho térmico diferenciado daquilo que é oferecido atualmente pelo mercado, potenciando os benefícios da prefabricação, tais como a facilidade de montagem, redução do tempo de execução e o controlo de qualidade.

## 2.6 NOVAS SOLUÇÕES PREFABRICADAS PARA REABILITAÇÃO DE FACHADAS

### 2.6.1 Motivação da Aplicação da Prefabricação

Conforme referido anteriormente, a reabilitação de edifícios é um sector de relevância crescente no contexto nacional, levando a uma progressiva expansão do mercado e procura de soluções novas e mais eficientes.

As soluções de reabilitação da envolvente dos edifícios, nomeadamente de fachadas, procuram ter um processo de instalação cada vez mais rápido sem descurar o controlo da qualidade, necessário para um bom desempenho final da envolvente. Adicionalmente tem sido observada a escassez de mão-de-obra devidamente qualificada e com a formação adequada para as intervenções de reabilitação, o que resulta na necessidade do desenvolvimento de soluções com métodos de aplicação mais simples e rápidos (Hsieh, 1997).

Estas características apontam para o desenvolvimento de soluções prefabricadas, onde se poderá obter maior rapidez de instalação, assim como maior controlo de qualidade.

A prefabricação é um processo de fabrico e de montagem, o qual geralmente ocorre em instalações especializadas, onde vários materiais são utilizados e combinados com vista a conceber um componente final (Winch, 2003).

Um estudo relativo a possíveis inovações no setor de construção civil, realizado em 15 países (incluindo o Japão, os EUA e o Reino Unido) mostra que em geral os conceitos relativos às tecnologias de informação e processos de manufatura avançados vão ser aplicados mais rapidamente no sector da construção do que novas abordagens para a construção *in-situ* (Manseau & Seaden, 2001).

A industrialização da construção é ainda incipiente em Portugal, no entanto é já uma opção válida e consolidada em diversos países, tais como os EUA, China, Alemanha, Áustria, etc.. Nos últimos anos as tecnologias de prefabricação têm sido alvo de um forte investimento, de forma a aumentar a qualidade final dos edifícios, reduzir custos e aplicar soluções complexas de forma simples (Richard, 2005; Herkommer, Bley, 1996).



Assim, a prefabricação já demonstrou uma elevada capacidade de reduzir os custos, melhorar a qualidade e obter produtos complexos, disponíveis para a grande maioria das pessoas. Tal pode ser encontrado num vasto número de produtos oferecidos no mercado, incluindo materiais de construção e componentes (treliças do telhado, lajes de betão pré-esforçado, janelas, etc.). Mas, até ao momento, a prefabricação não é aplicada ao edifício como um todo. No entanto, se um carro, um computador, ou até um telemóvel fosse produzido seguindo os processos de construção de um edifício, muito poucas pessoas seriam capazes de possuir um (Richard, 2005).

Atualmente a prefabricação tem vindo a ser aplicada, maioritariamente, em novos edifícios, com a utilização de fachadas prefabricadas em betão, escadas, janelas, painéis de compartimentação, portas, paredes de tijolo, etc. (Rihani, Bernold, 1996). Esta tecnologia tem como grandes vantagens a independência das condições climáticas, o controlo da qualidade e a rápida aplicação dos produtos, ou seja, a prefabricação deve ser vista como uma abordagem de construção não apenas para a redução do custo de construção, mas sim para o aumento da qualidade e eficiência, assim como diminuir os resíduos de construção (Chiang *et al*, 2006).

### **2.6.2 Soluções de Reabilitação Prefabricadas – I&D**

Considerando as elevadas potencialidades da aplicação das tecnologias da prefabricação no mercado da reabilitação surge o Projeto FCT - FCOMP-01-0124-FEDER-007189 – Reabilitação Energética de Edifícios, o qual está enquadrado no projeto IEA ECBCS Annex 50 - Prefabricated Systems for Low Energy Renovation of Residential Buildings (<http://www.ecbcs.org/annexes/annex50.htm>), promovido pela Agência Internacional de Energia (IEA). Os projetos apresentados têm por objetivo (IEA Annex 50, 2011a):

- Promover a reabilitação energética eficiente dos edifícios, visando ações integrais e integradas privilegiando a utilização da pré-fabricação
- O desenvolvimento de soluções prefabricadas de reabilitação de edifícios, com especial incidência na reabilitação de fachadas.

Estas soluções devem ser testadas, validadas e otimizadas para os mercados locais, tanto em termos de eficiência energética como económicos (IEA Annex 50, 2011b).

Assim, a reabilitação eficiente de edifícios será realizada a partir do desenvolvimento de Soluções Prefabricadas para fachadas que podem integrar, no seu interior, tubagens de ventilação, dos sistemas AVAC, das águas quentes sanitárias e dos sistemas solares. As soluções devem ser de elevada qualidade e de fácil montagem e transporte.

As ações de reabilitação incidirão sobre a otimização do desempenho energético, conforto térmico, acústico e lumínico e aproveitamento da energia solar etc., em especial de edifícios de habitação multifamiliar, não excluindo, no entanto, habitações unifamiliares (IEA Annex 50, 2011c).

Para demonstrar as potencialidades da utilização de sistemas de reabilitação prefabricados para fachadas de edifícios, são seguidamente apresentados em detalhe três exemplos de soluções desenvolvidas ao abrigo do projeto IEA ECBCS Annex 50, para aplicação na Suíça, Áustria e França e otimizadas tendo em conta as especificidades dos próprios países:

- **Suíça: MRESP** – Módulo de Reabilitação Estandarizado semi-prefabricado – é um sistema desenvolvido na Suíça constituído por módulos de pequenas dimensões com base de madeira desenvolvido primariamente para aplicação nas zonas circundantes dos envidraçados;
- **Áustria: MFPGD** – Módulo de Fachada Prefabricado de Grande Dimensão – é um sistema desenvolvido na Áustria, constituído por módulos de grandes dimensões com base de madeira para aplicação piso-a-piso;
- **França: RECOLCI** - Módulo de Reabilitação Prefabricado de Grande Dimensão - é um sistema desenvolvido em França, constituído por módulos de grandes dimensões com base metálica, integrando a aplicação dos envidraçados em fábrica;

Para o desenvolvimento dos sistemas de reabilitação prefabricados foram tidos em conta os seguintes aspetos:

- Os módulos devem ser construídos em série;
- Os módulos devem ser flexíveis na arquitetura, forma e revestimento;
- Os módulos podem ser combinados uns com os outros e com soluções de reabilitação convencionais (sem prefabricação).

### 2.6.3 Módulos de Reabilitação Estandarizados Semi prefabricados - Suíça

O módulo de reabilitação descrito nesta secção foi desenvolvido por uma equipa de investigação Suíça e como tal, foi adaptado às características do clima local.

Os seus autores são René Kobler, Armin Binz e Gregor Steinke -University of Applied Sciences Northwestern Switzerland, School of Architecture, Civil Engineering and Geomatics (IEA Annex 50, 2011c).



**\_Conceitos subjacentes:** a prefabricação encontra-se habitualmente associada à prefabricação total, ou seja, à instalação de unidades de grande porte sobre toda a superfície dos edifícios existentes. Esta técnica tem sido implementada em determinados países como a Áustria e Suíça, com algum sucesso. As dimensões dos módulos prendem-se com as dimensões da fachada e também com as limitações logísticas no que toca ao transporte das soluções. Devem ainda ser tidos em conta os seguintes aspetos:

**\_Produção:** o desenvolvimento do sistema foi baseado na integração de produtos e materiais comercializados pelos parceiros industriais. Tal garante a disponibilidade no mercado dos mesmos, assim como a qualidade exigida. As empresas que deram o seu contributo para a produção do painel de reabilitação encontram-se na Suíça, por ter sido este o mercado alvo para o desenvolvimento do painel em questão, tais como a empresa 4B Gruppe (Envidraçados), Flumroc AG (Isolamentos), Eternit (Revestimentos de fachadas), entre outras.

**\_Dimensionamento:** essencialmente, o módulo é constituído por (Figura 2.26):

- 1) Uma camada de regularização colocada na parede exterior existente, composta por uma placa de gesso cartonado e uma manta de isolamento de lã de vidro;
- 2) Uma estrutura composta por vigas metálicas, servindo de suporte para a colocação do isolamento em lã de rocha, com vazios dimensionados para a passagem de tubagens e cablagens;
- 3) Uma segunda camada de material isolante composta por painéis de isolamento em vácuo (VIP), possibilitando a redução das pontes térmicas provocadas pelos negativos criados para a passagem das tubagens;
- 4) Uma camada de revestimento que pode ser pré-fabricada e entregue com o módulo, ou montada no local, incluindo opções como revestimentos delgados, ou até painéis de madeira ou metálicos do tipo fachada ventilada.

Em média, a espessura do painel é de 320mm, variando consoante o nível de isolamento térmico pretendido e consoante o diâmetro das tubagens de ventilação utilizadas, conforme apresentado na Figura 2.27.

Entre cada módulo de reabilitação existe uma tolerância de 2 cm. A altura do módulo será igual à altura do piso menos essa tolerância, ou seja, no caso de o piso ter 2,7 m de altura o módulo terá 2,68 m (Figura 2.28).

Neste módulo base é possível implementar alguns ajustes dependentes: do valor do coeficiente de transmissão térmica (U) pretendido; da transferência de calor entre as tubagens

de ventilação e o ambiente exterior; dos requisitos estruturais; das diferentes dimensões dos envidraçados; do ajuste do número de condutas de ventilação; da utilização das condutas de ventilação para colocação de outras instalações de serviços no edifício; adaptações funcionais; ajustes nos acabamentos; integração de sistemas de energia solar, etc..

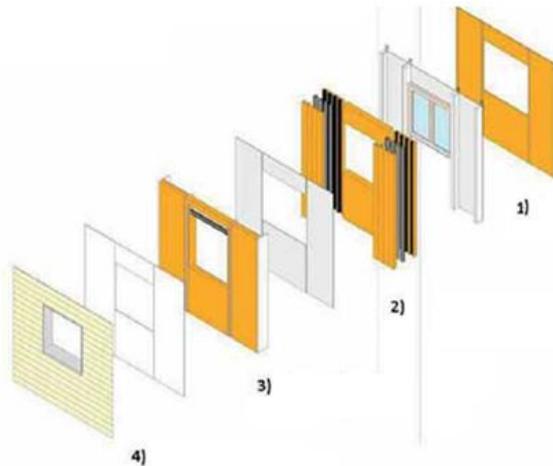


Figura 2.26 – Composição do módulo base de reabilitação. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

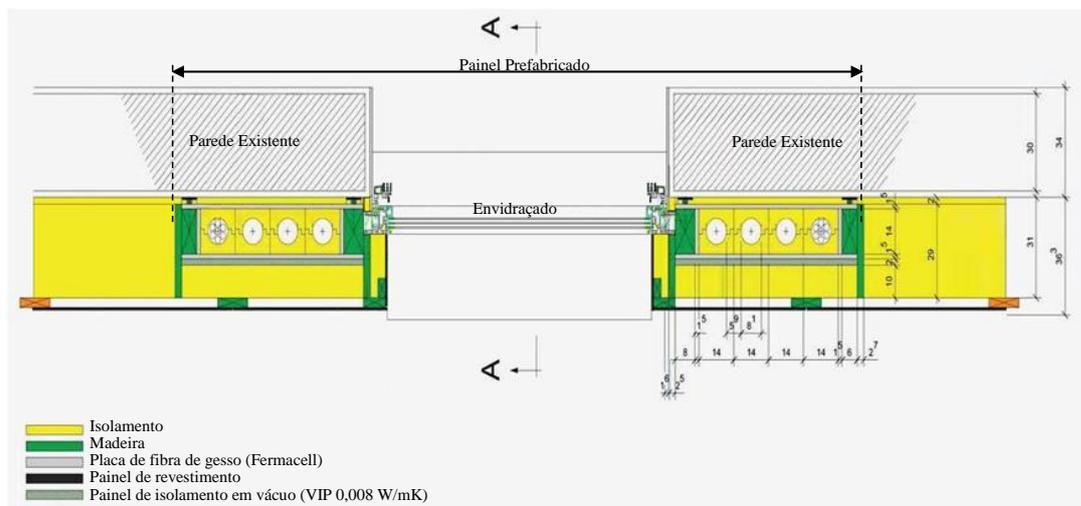
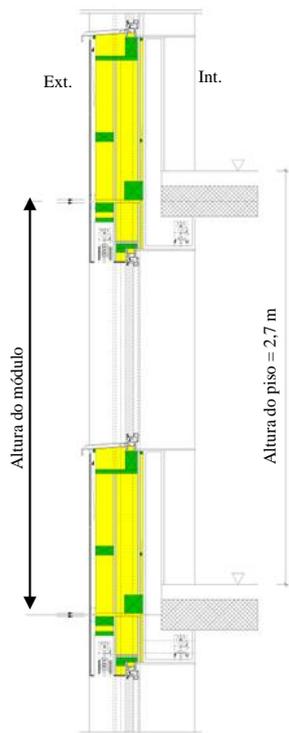


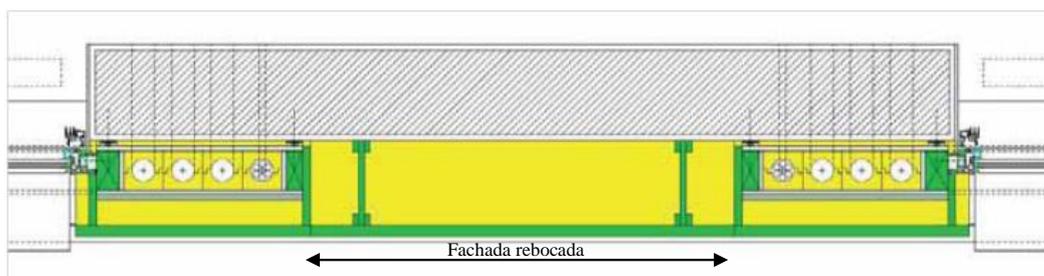
Figura 2.27 – Vista em planta do painel aplicado à parede do edifício a reabilitar. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

Para além do módulo base com vista a reabilitar a zona dos envidraçados, existem outras soluções desenvolvidas para serem utilizadas entre os módulos dos envidraçados e assim reabilitar a restante superfície opaca da fachada. Dependendo do que é pretendido pelo projeto pode optar-se pela colocação de um módulo do tipo fachada rebocada (Figura 2.29) ou fachada ventilada (Figura 2.30) ou ainda uma fachada com isolamento injetado no interior (Figura 2.31).



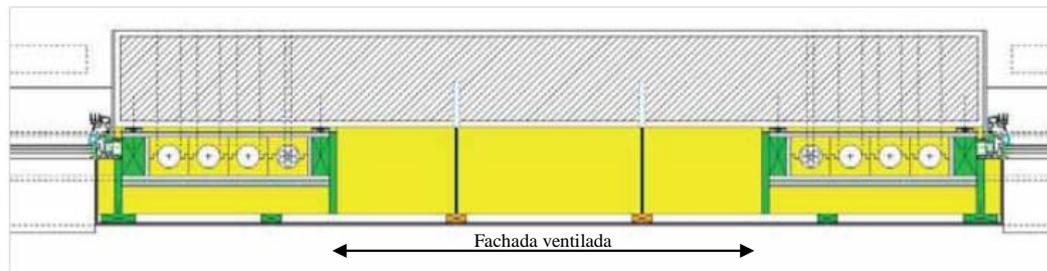
**Figura 2.28 – Secção de corte do painel aplicado à parede do edifício a reabilitar.** Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

O primeiro tipo de módulo acima mencionado reproduz o aspeto de uma fachada com reboco exterior e permite à nova fachada manter a sua identidade estética. O seu interior pode ser composto por isolamento térmico ou painéis de fibra de madeira fixados na estrutura de suporte, dependendo do sistema pretendido. Deve ser dada especial atenção às juntas de dilatação existentes entre os módulos.



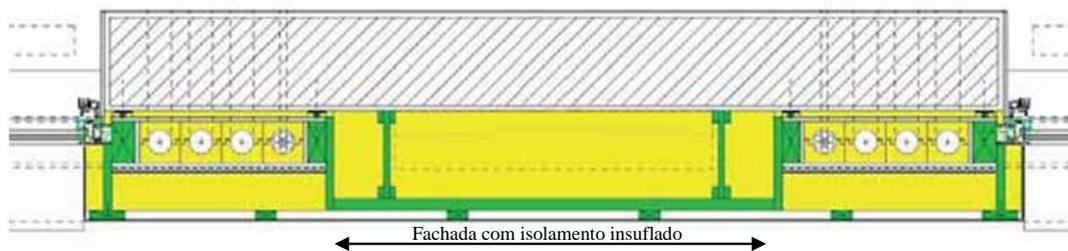
**Figura 2.29 – Vista em planta do painel aplicado à parede do edifício a reabilitar - Fachada rebocada.** Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

O módulo de fachada ventilada foi criado de acordo com o conceito tradicional de fachada ventilada, sendo válidos os métodos de aplicação e as propriedades físicas dos sistemas correntes. O isolamento pode ter uma espessura até cerca de 300mm e é fixado por um sistema de buchas.



**Figura 2.30 – Vista em planta do painel aplicado à parede do edifício a reabilitar - Fachada ventilada.** Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

O módulo de fachada com isolamento injetado permite o preenchimento com isolamento através dos vazios que subsistem no interior do módulo base. Esta solução permite obter um módulo sem vazios, independentemente das variações dimensionais da alvenaria existente. Podem ser utilizadas diversas soluções de revestimento exterior, mas devem ser permeáveis ao vapor. Foram efetuados vários testes que demonstram não existir risco de assentamento do isolamento durante o transporte dos painéis prefabricados.



**Figura 2.31 – Fachada com isolamento insuflado.** Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

**\_Interfaces com os edifícios.** Para a montagem do módulo no edifício a reabilitar é necessário:

- (1) Proceder a trabalhos de preparação da envolvente, nomeadamente a remoção dos peitoris das janelas existentes (no caso de ampliação da abertura), persianas, coberturas, beirais do telhado, e a medição e colocação dos fixadores na parede existente;
- (2) Colocar o módulo em posição na parede, através de uma grua, e ligação das tubagens de ventilação e de quaisquer outras instalações, sendo colocada uma manta de fibra de vidro na área de encaixe entre os módulos;
- (3) Colocar, definitivamente, o módulo superior no lugar correspondente. Os módulos não se apoiam uns nos outros mas são fixados individualmente ao edifício existente;
- (4) Rematar o isolamento entre os módulos;



- (5) Colocar o revestimento e respetivos ajustes no interior do edifício, como por exemplo a remoção das janelas antigas, a montagem da barreira para-vapor ou o acabamento das superfícies interiores (Figura 2.32).

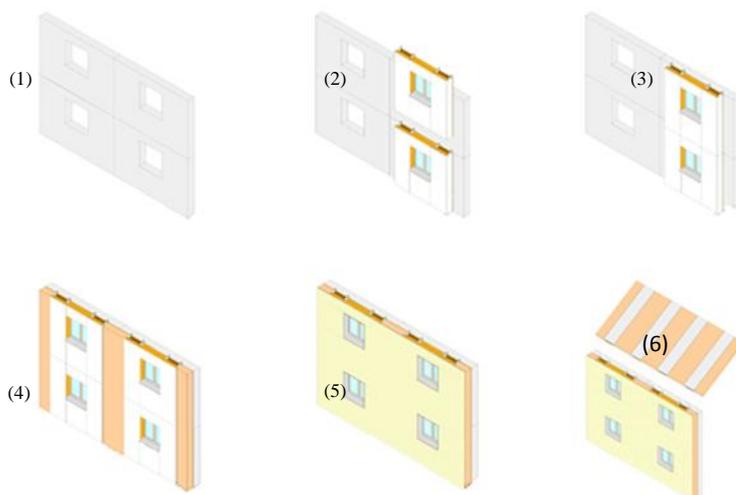


Figura 2.32 – Processo de montagem do módulo. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

**\_Verificação Regulamentar:** as fachadas dos edifícios Suíços construídos até 1975 têm valores do coeficiente de transmissão térmico ( $U$ ) que variam entre  $2,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e  $0,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Enquanto para os edifícios concluídos a partir de 1976, estes valores variam desde  $0,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  a valores inferiores a  $0,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

Apesar do valor de  $U$  depender também do tipo de alvenaria do edifício existente, pretende-se que com a aplicação do painel de reabilitação o coeficiente de transmissão térmico das fachadas esteja compreendido entre  $0,10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  e  $0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .

Foram calculados os diversos valores de  $U$  ao longo do painel, considerando que os materiais que constituem a solução de reabilitação têm os valores da condutibilidade térmica [ $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ] ou de transferência de calor [ $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ] referidos na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Propriedades térmicas dos materiais com potencial de utilização no módulo de reabilitação

Material	Resistência Térmica [ $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ]
Lã de rocha	0,036
Placa de gesso	0,250
Revestimento de gesso	0,350
Vidro com $U= 0,8$	0,030
Lã de vidro	0,034
Argamassa de cal	0,870
Tijolo leve	0,450
Madeira	0,130
Contraplacado	0,170
Aço	60,00
Isolamento de Vácuo	0,008

Na Figura 2.33 encontram-se representados os valores obtidos para o coeficiente de transmissão térmica.

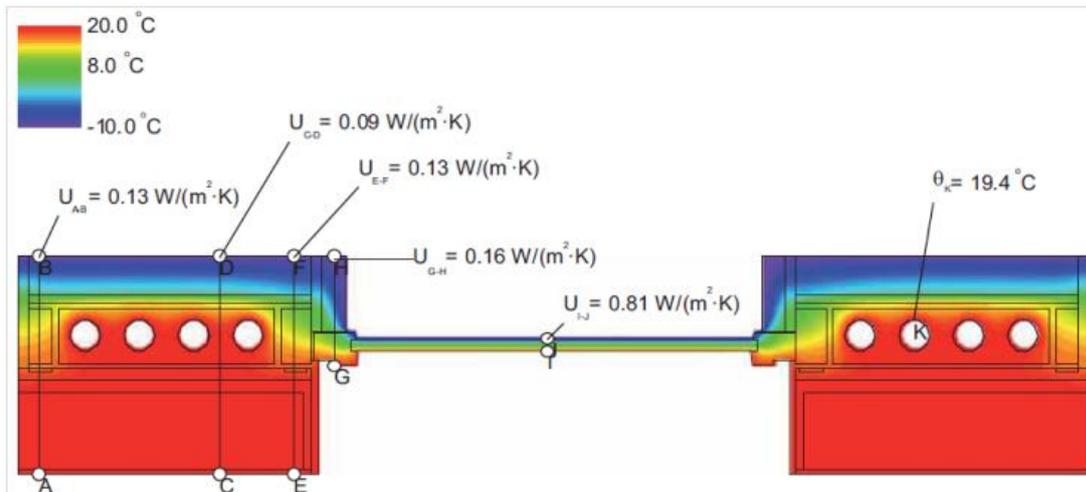


Figura 2.33 – Valores de U ao longo do módulo de reabilitação. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

A proteção contra incêndios é um outro fator a ter em conta, principalmente nas tubagens de ventilação, pois estes elementos construtivos vindos dos diferentes apartamentos encontram-se relativamente próximos uns dos outros, havendo um maior risco de propagação em caso de incêndio.

Com vista a cumprir as normas de proteção contra incêndio é necessária a colocação de painéis de gesso cartonado (Figura 2.34) junto à parede existente e na superfície exterior do isolamento térmico.

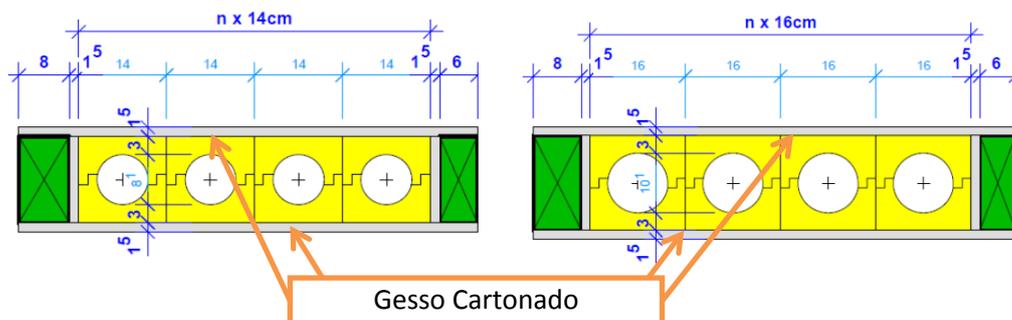


Figura 2.34 – Obtenção de resistência ao fogo para módulo base. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

#### 2.6.4 Módulos de fachada prefabricados de grande dimensão - Áustria

Os Módulos de Fachada Prefabricados de Grande Dimensão são da autoria de Karl Höfler e Sonja Geier, do instituto AEE - Institute for Sustainable Technologies (AEE INTEC), situado em Gleisdorf, Áustria.



Os módulos multifuncionais desenvolvidos integram componentes ativos como por exemplo coletores e instalações elétricas ou infraestruturas de distribuição. Este sistema deve possibilitar uma reabilitação de elevado desempenho, viável e acessível (IEA Annex 50, 2011c).

**\_Conceitos subjacentes:** o desenvolvimento de conceitos de reabilitação a fim de melhorar a eficiência energética dos edifícios e a utilização crescente de fontes de energia renovável, adquirem uma importância cada vez maior. É vantajoso usar tecnologias já testadas no âmbito das casas passivas e edifícios de baixo consumo de energia e adaptar essas tecnologias aos processos de reabilitação.

O principal objetivo é encontrar conceitos de reabilitação inovadores e viáveis para a reabilitação de edifícios multifamiliares, tendo em conta não só a eficiência energética do edifício mas também o conforto dos seus utilizadores antes e durante os trabalhos de reabilitação.

**\_Aspetos ecológicos:** o módulo é essencialmente composto por madeira, o que garante uma elevada qualidade ecológica. No entanto, é necessário ter em atenção todas as restrições impostas por uma construção à base de madeira. Dependendo das diferentes normas e códigos de construção, a aplicação de madeira nas fachadas é limitada a edifícios até quatro pisos.

**\_Aceitação por parte dos utilizadores:** a montagem do módulo é feita pelo exterior e devido ao processo de prefabricação esta implica menos trabalhos “in-situ” que o habitual, sendo por isso reduzidos significativamente os efeitos de perturbação dos moradores durante o período de reabilitação do edifício. O único trabalho cuja execução é feita pelo interior do edifício é a remoção e substituição dos envidraçados e parapeito das janelas.

**\_Qualidade de execução:** a prefabricação oferece entre outras vantagens um elevado padrão de qualidade. Através de um rigoroso processo de planeamento e preparação, os procedimentos relativos à produção do módulo são altamente previsíveis e facilmente controlados. Para além disso, todo o processo é independente das condições climáticas.

**\_Dimensionamento:** os módulos de fachada prefabricados têm 12m de comprimento e 3m de altura. O transporte para o local é feito por camião e os módulos são montados recorrendo a um camião com grua e a gruas móveis adicionais.

Na Figura 2.35 está representada a composição da solução base, a qual inclui as ripas de nivelamento, com isolamento entre elas; O módulo base sobre as ripas (a estrutura base é feita em madeira e o seu interior contém uma primeira camada de isolamento); A estrutura de favos solares do lado de fora do módulo, sobre uma placa de MDF, seguido por um espaço de

ar ventilado e coberto por um vidro simples de segurança: Por trás da estrutura base de madeira, encontra-se uma placa OSB (Oriented Strand Board – composto de lascas de madeira orientadas), o que completa o elemento prefabricado.

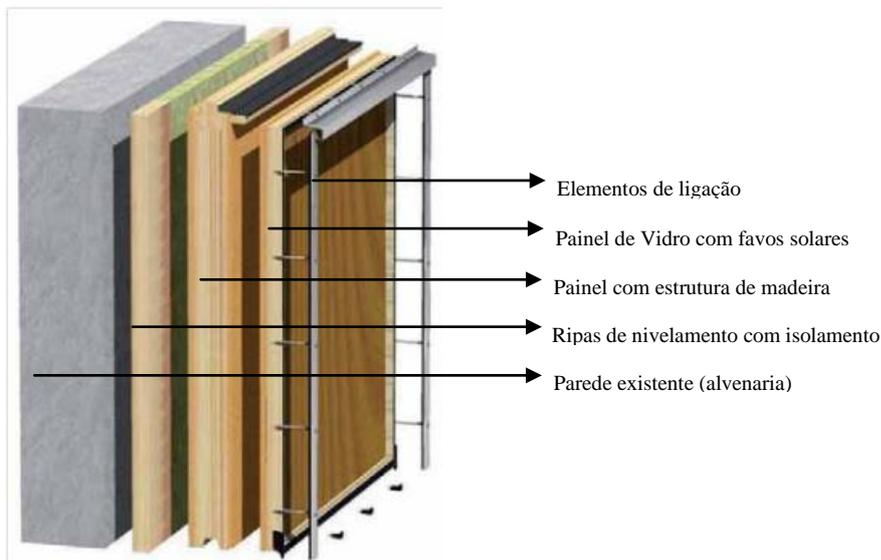


Figura 2.35 – Composição do módulo. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

A Figura 2.36 mostra em detalhe a constituição da solução prefabricada de reabilitação de fachadas.

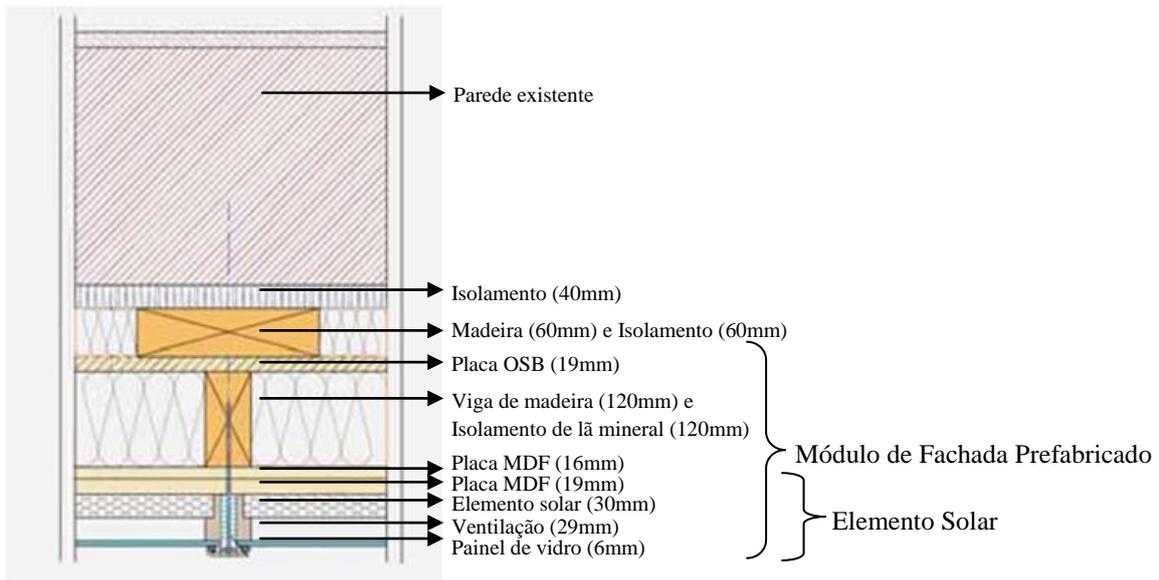


Figura 2.36 – Detalhe do módulo prefabricado aplicado a uma parede existente. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

O aspeto do módulo e design foram definidos pelo arquiteto. O favo solar foi integrado no design do módulo como parte visual. O módulo base integra um dispositivo de ventilação descentralizado com recuperador de calor. Esse dispositivo está coberto por um painel de



isolamento de vidro opaco. O módulo prefabricado tem uma espessura total de cerca de 24 cm.

O processo de montagem do módulo (Figura 2.37) consiste inicialmente na instalação de um perfil de apoio em aço na base do edifício existente, que irá suportar as cargas verticais dos módulos. O primeiro módulo assenta sobre esse perfil e os seguintes apoiam-se nos módulos inferiores.



**Figura 2.37 – Transporte do módulo até ao local e montagem.** Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

Seguidamente é colocada a subestrutura de ripas de madeira que funciona como nivelamento e contém o sistema de dissipação de calor e as redes de distribuição. O restante espaço é preenchido com painéis de isolamento.

A montagem dos módulos de fachada de grandes dimensões é feita com recurso a gruas. Os operadores de montagem, que se encontram nas gruas móveis, posicionam os módulos lateralmente para ajudar no ajuste e fixação dos mesmos.

Por fim, são retiradas as janelas antigas pelo interior do edifício, são aplicadas as barreiras para-vapor e o revestimento do parapeito da janela, e todas as adaptações que foram introduzidas (ângulos e juntas).

A ligação entre os módulos é feita através de um sistema macho e fêmea (Figura 2.38). Este sistema permite a colocação correta do módulo e o acoplamento vertical entre módulos. Para além disso, foi também colocada uma vedação contra chuvas torrenciais. As juntas verticais são calafetadas com perfis próprios para o efeito (cobre-juntas), fixados com parafusos.

Todas as juntas dos parapeitos e cantos são devidamente concluídos após a montagem dos módulos prefabricados.

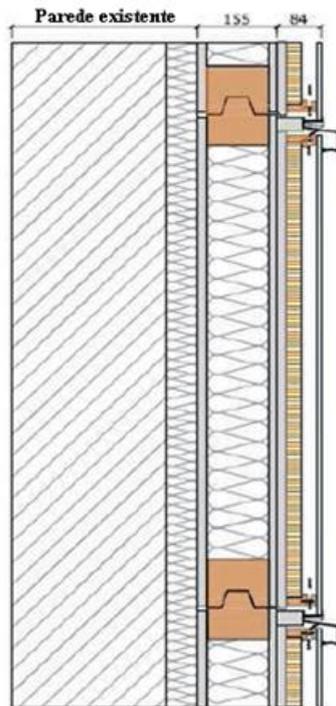


Figura 2.38 – Secção de corte com pormenor das juntas horizontais dos módulos. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

**\_Verificação Regulamentar:** o desempenho térmico do módulo é conseguido com um conceito inovador desenvolvido pela empresa gap-solution. Um dos pontos mais importantes foi o desenvolvimento do favo solar de celulose (Figura 2.39), localizado no lado do módulo que está orientado para o sol e está coberto por um painel de vidro. O espaço de ar ventilado no fundo do painel protege o favo solar das ações climáticas e de danos mecânicos. Para criar uma aparência atrativa, a superfície pode ser pintada de várias cores. A luz proveniente do sol mais baixo durante o Inverno atravessa o painel de vidro e aquece o favo solar. Assim a temperatura no exterior do módulo aumenta. A diferença de temperatura entre o interior e o exterior, no Inverno, diminui o que resulta em menores perdas de calor. Durante o Verão a estrutura do favo solar faz sombra a ela própria devido à mais elevada altura do sol.

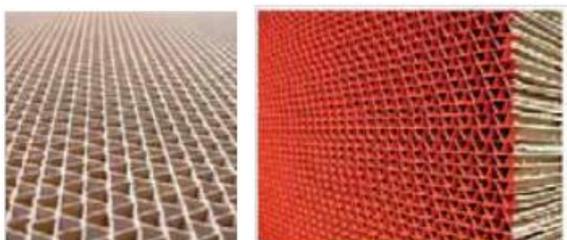


Figura 2.39 – Pormenor de favo solar. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

Os principais componentes estudados para garantir um bom desempenho térmico da fachada foram:



- Os módulos de fachada de grandes dimensões com favos solares;
- As janelas utilizadas nas casas passivas com persianas integradas;
- Os sistemas de ventilação mecânica com recuperação de calor;
- As varandas existentes na nova envolvente térmica.

Para as fachadas orientadas a Sul, em vez dos favos solares, foram integrados coletores solares fotovoltaicos nos módulos de reabilitação, para assim possibilitar a produção de energia a partir de fontes renováveis.

### 2.6.5 Módulos de reabilitação prefabricados de grandes dimensões - França

O Módulo de Reabilitação Prefabricado de Grandes Dimensões é da autoria de Stéphane Cousin da empresa Saint-Gobain Isover, de Paris (IEA Annex 50, 2011c).

O projecto francês intitulado de RECOLCI "*Réhabilitation Énergétique des immeubles de logements Collectifs par Composants Intégrés*", foi patrocinado e financiado pela ADEME (Agência de Energia Francesa), e contou com o apoio da empresa Arcelor Mittal para a produção e dimensionamento da estrutura metálica do módulo.

**\_Conceitos subjacentes:** a solução para reabilitação de edifícios multifamiliares pretende limitar as necessidades energéticas a 50-60 kWh/m<sup>2</sup>.ano, manter um bom desempenho acústico, ser uma solução pouco intrusiva para os ocupantes, usar uma combinação de componentes de construção para criar uma solução prefabricada de custos reduzidos, tanto em termos de produção como de instalação, ter em conta a estética e possibilitar a integração de uma grande diversidade de revestimentos e acabamentos exteriores.

**\_Reabilitação energética dos edifícios:** Em França os edifícios residenciais multifamiliares representam 44% do parque edificado. Estes apresentam um consumo energético de 40% do total do consumo energético dos edifícios residenciais.

Os edifícios antigos (construídos antes da implementação da primeira regulamentação térmica - 1974) correspondem a 65% da construção total, sendo 70% dos edifícios multifamiliares a residência principal. Estes edifícios têm um consumo energético muito elevado e as soluções de reabilitação existentes são muitas vezes de aplicação demorada, complexas e caras.

A solução desenvolvida tem como objetivo a reabilitação energética global e eficiente dos edifícios multifamiliares, tendo sido concebida para edifícios com menos de 7 pisos ou 28m de altura máxima (B. Ruot, 2010).

**\_Flexibilidade:** a solução necessita de se adaptar a uma grande variedade de dimensões de fachadas, mas com uma implementação padronizada de componentes prefabricados e permitir a utilização de todo o tipo de materiais de revestimento.

**\_Espaço e ambiente:** a solução permite a adição de um piso extra no topo do edifício. Deve limitar tanto quanto possível a perda de luz natural e garantir, pelo menos, o mesmo isolamento acústico ao ruído proveniente do exterior. Os módulos devem suportar o peso dos novos envidraçados que venham a ser colocados.

A prefabricação permite reduzir o tempo de instalação e os custos da implementação no local a reabilitar.

**\_Desempenho térmico:** após a implementação da solução, as necessidades energéticas das frações autónomas do edifício devem situar-se entre os 50 e os 60 kWh/m<sup>2</sup>.ano. Para tal, a solução de fachada necessita de garantir um coeficiente de transmissão térmico (U) com valor igual ou inferior a 0,2 W/m<sup>2</sup>.K, para além da implementação de um conjunto de soluções ao nível das coberturas e pavimentos.

Em relação à estanquidade ao ar, o objetivo é vedar as aberturas para conseguir uma permeabilidade global igual ou inferior a 0,6 renovações de ar por hora. A solução permite ainda a instalação de sistemas ventilação mecânica de duplo fluxo com recuperação de calor na saída de ar e unidade termodinâmica.

**\_Dimensionamento:** o módulo de fachada é composto por uma estrutura metálica que integra um pré-aro isolado para a colocação dos envidraçados, isolamento e pinos metálicos servindo de suporte para o revestimento. A este sistema prefabricado podem ser aplicados todos os tipos de sistemas de revestimento exterior, sendo estes colocados no local.

Os módulos prefabricados de fachada têm uma largura máxima de 2,7m e um peso de cerca de 400kg, para facilitar o seu transporte.

Para assegurar a estabilidade de todos os módulos que constituem a fachada, estes são colocados no topo dos outros, reduzindo as cargas do topo para a base. Os módulos têm uma altura equivalente a dois pisos. No local de trabalho os módulos são carregados e movidos através de equipamentos de elevação adequados. A Figura 2.40 apresenta a produção de um protótipo, de menores dimensões, do sistema em análise.

Os módulos são fixados na fachada mas o peso dos elementos e da adição de um piso na cobertura são transferidos através dos pilares da estrutura do módulo de fachada.



Para assegurar a sua resistência estrutural os módulos são reforçados com pilares intermédios. Antes da aplicação dos módulos, é colocada uma camada de isolamento com cerca de 10cm na fachada existente. Os módulos de fachada prefabricados são então fixados à fachada. Horizontalmente o espaço entre dois módulos não é superior a 60cm. Em caso de necessidade, são produzidos módulos totalmente opacos. Entre os módulos são colocadas barras de reforço e tirantes para garantir a transferência de carga. No local, o espaço entre os módulos é preenchido com isolamento.

A periferia da janela é isolada com 7 cm de isolamento e uma pré-estrutura é previamente montada para permitir uma fácil colocação do novo envidraçado no local. A janela é fixada na pré-estrutura e a estanquidade deve ser assegurada.

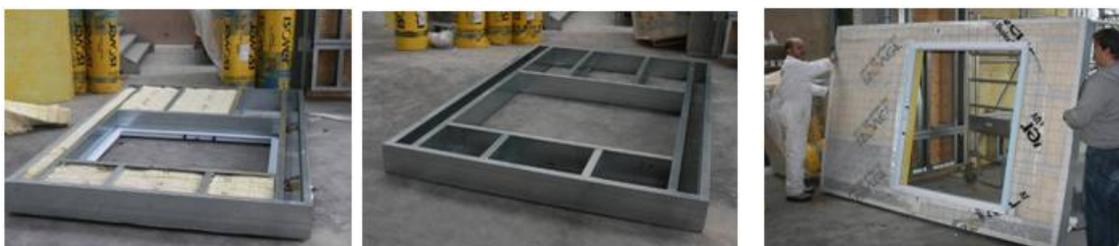


Figura 2.40 – Produção do protótipo do módulo de reabilitação prefabricado. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

**\_Interfaces com os edifícios:** a prefabricação do módulo de reabilitação inclui a construção da estrutura metálica do módulo, a colocação da membrana do tipo barreira para-vapor, para proteger o isolamento durante o transporte até ao local, a colocação do isolamento, a colocação da membrana exterior HPV (Compósito de Polietileno de Alta Densidade) para proteção contra chuva e vento, a instalação da pré-estrutura isolada para envidraçados e a colocação de fixadores verticais para suportar o sistema de revestimento exterior.

A posição da pré-estrutura e a espessura de isolamento do perímetro da janela dependem da configuração da janela.

Através do seu design, os módulos RECOLCI podem ser ajustados em tamanho, para se adequarem a cada tipo de fachada e às dimensões das suas janelas. Podem ser definidos para a mesma fachada módulos de diferentes tamanhos, a fim de se adaptarem à geometria da fachada. Independentemente das suas dimensões, os painéis serão fabricados da mesma forma, sem modificar o design.

A aplicação do sistema ao edifício é feita recorrendo a andaimes, guias e guindastes colocados no telhado. O processo de instalação contempla os seguintes passos:

- Aplicação dos elementos de fixação na parede;
- Colocação da primeira camada de isolamento;
- Instalação das janelas no módulo assegurando a estanquidade ao ar;
- Instalação dos módulos, tendo em atenção o correto alinhamento vertical, para uma boa transferência das cargas;
- Colocação do isolamento entre os dois módulos adjacentes;
- Colocação do revestimento.

As figuras que se seguem (2.41 a 2.45) apresentam as diferentes fases do processo de instalação do módulo de reabilitação.

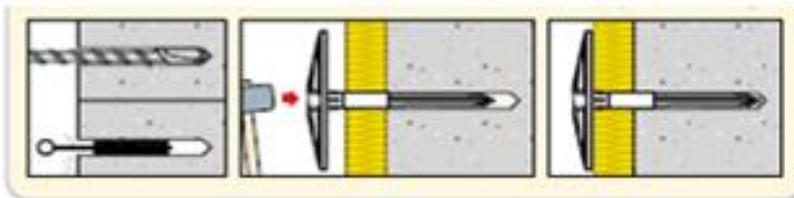


Figura 2.41 – Colocação dos elementos de fixação. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c



Figura 2.42 – Primeira camada de isolamento. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c



Figura 2.43 – Instalação das janelas no módulo. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c



Figura 2.44 – Isolamento entre os módulos. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c



Figura 2.45 – Colocação do revestimento. Fonte: IEA ECBCS Annex 50, 2011c

**\_Propriedades mecânicas:** os cálculos feitos pela Arcelor-Mittal indicam que a solução de módulo de fachada RECOLCI pode transferir cargas de até 3,3t através dos principais pilares do módulo.

**\_Dilatações:** os elementos de fachada metálicos foram submetidos a variações de temperatura que provocam dilatações. Os elementos de fixação foram projetados com furos ovais para contrabalançar essas variações de comprimento.

**\_Desempenho térmico:** o desempenho térmico do módulo de fachada foi calculado com o software de modelação numérico Triso (Trisco,2010), sendo verificado:

- Com 10 cm de isolamento de lã de vidro contra a parede ( $\lambda = 32 \text{ W/m.K}$ )
- Com 20 cm de isolamento de lã de vidro entre as vigas ( $\lambda = 35 \text{ W/m.K}$ )
- Com 50 mm de isolamento de lã de vidro no perímetro da janela ( $\lambda = 32 \text{ W/m.K}$ )

O valor do coeficiente de transmissão térmico do módulo de fachada obtido (considerando as pontes térmicas) é de:

- 0,22 W/m<sup>2</sup>.K, usando fixadores de corte térmico compostos ( $\lambda = 2$  W/m.K)
- 0,25 W/m<sup>2</sup>.K, utilizando fixadores de aço modular ( $\lambda = 50$  W/m.K)

Constata-se que estes valores de U permanecem relativamente elevados considerando a espessura total do sistema, que inclui 30cm de isolamento no total.

Tal pode ser explicado pelas pontes térmicas associadas à estrutura metálica base do módulo, visto serem necessários 20 cm de secção transversal para ter uma resistência à carga suficiente.

### 2.6.6 Módulos de Reabilitação Prefabricados - Portugal

Ao abrigo do projeto IEA ECBCS Annex 50 e enquadrado pelo Projeto FCT - FCOMP-01-0124-FEDER-007189, foi também desenvolvido uma solução de reabilitação prefabricada tendo em contas as especificidades do setor de edifícios Português.

Esta solução designada como **MRP** – Módulo de Reabilitação Prefabricado – foi o principal objeto de estudo desta Tese Doutorado.

## 2.7 CONCLUSÕES

As alterações climáticas são um dos grandes desafios com que a sociedade atualmente se confronta. De uma forma geral é consensual que os grandes promotores desta problemática são o excessivo consumo energético e a utilização intensiva de matérias-primas.

O parque habitacional existente mundial contribui fortemente para o excessivo consumo energético, devido ao baixo desempenho térmico da envolvente dos edifícios e sistemas pouco eficientes, associado ao aumento dos padrões de conforto da sociedade moderna.

Com vista a travar este consumo excessivo de energia nos edifícios, foram introduzidas diversas diretivas e normas cujos objetivos são a imposição de novas metas e padrões para a eficiência energética associada aos edifícios, quer edifícios novos assim como existentes.

Adicionalmente, em Portugal, assim como em diversos outros países (EUA, Espanha, França, Itália, Grécia, etc.) a construção de novos edifícios sofreu um forte abrandamento, principalmente devido às condições económicas atuais e dificuldade na obtenção de financiamento para novos empreendimentos ou moradias, estando o setor da construção a focar-se com maior veemência na reabilitação dos edifícios.



Tal significa que a reabilitação energética de edifícios é atualmente um setor em forte expansão, tanto em termos nacionais, como internacionais. No entanto, para que o setor da reabilitação de edifícios possa acompanhar as evoluções tecnológicas e novas formas de construção dos edifícios novos, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias especificamente desenvolvidas para este setor.

A aplicação de tecnologias de prefabricação para o desenvolvimento de novas soluções de reabilitação tem um enorme potencial visto que apresentam diversas vantagens para as soluções existentes, tanto em termos económicos – soluções fabricadas em linhas de montagem industriais são potencialmente mais acessíveis devido à repetibilidade do processo e aquisição de maiores quantidades de matérias-primas com menores valores – como em rapidez de montagem – a prefabricação simplifica o processo de montagem no local reduzindo substancialmente o tempo de aplicação – assim como na possibilidade de um maior controlo de qualidade – utilização das normas ISO 9000 e ISO 14000 para certificação da qualidade da empresa e produtos produzidos na mesma (ISO 9000, Fidalgo, 1999).

Neste momento as soluções utilizando as tecnologias da prefabricação para o setor da reabilitação de edifícios ainda não estão disseminadas no mercado, o que levou ao desenvolvimento de novos projetos de I&D, e assim à proposta de novas soluções para a reabilitação energética de edifícios baseadas em prefabricação, em diferentes países Europeus, as quais foram já testadas com sucesso em diferentes casos de estudo.

No entanto, a realidade do setor e tecnologias base necessárias para a fabricação destas soluções, não se encontram disponíveis em Portugal, ou não são economicamente viáveis, razão pela qual se avançou para o desenvolvimento de uma solução de reabilitação energética de fachadas com recurso à prefabricação, desenvolvida e otimizada especificamente para o parque habitacional Português. Este foi o principal objetivo deste trabalho.



### CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

*"Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco; à medida que vamos adquirindo conhecimentos, instala-se a dúvida." - Johann von Goethe, Escritor / Cientista. Alemanha, 1749 // 1832*



### 3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a metodologia seguida na realização deste trabalho e as ferramentas utilizadas no decorrer das atividades de investigação e desenvolvimento, com o objetivo de desenvolver uma solução inovadora de reabilitação energética de fachadas, caracterizar o desempenho energético do parque edificado e estudar a aplicação da solução a casos de estudo selecionados.

### 3.2 APRESENTAÇÃO DA METODOLOGIA

#### 3.2.1 Estudo dos Conceitos Base

Com vista ao desenvolvimento de Soluções de Reabilitação Inovadoras é imperioso verificar e justificar a sua real necessidade, mas também estudar se as tendências do mercado são propícias à introdução de novas soluções.

Assim, os trabalhos de investigação iniciaram-se com uma extensa pesquisa bibliográfica por forma a obter informações sobre o estado da arte, incluindo:

- Alterações Climáticas e seus indicadores; (Capítulo 2.2 – Página 12)
- Desenvolvimento sustentável e seus indicadores; (Capítulo 2.2.2 – Página 17)
- Energia – consumo e metas, dependência energética, distribuição dos consumos por setor; (Capítulo 2.3 – Página 18)
- O perfil energético dos edifícios, tanto em termos nacionais como internacionais; (Capítulo 2.3 – Página 23)

#### **A Necessidade do Desenvolvimento de Novas Soluções**

- O parque edificado Português; (Capítulo 2.4 – Página 24)
- O atual mercado da reabilitação de edifícios em Portugal e as mais recentes previsões da sua evolução; (Capítulo 2.5 – Página 27)
- Soluções de reabilitação energética, atualmente, mais utilizadas em Portugal. Estudo das suas vantagens e inconvenientes. (Capítulo 2.5.5 – Página 40)

#### **Previsível Evolução do Setor da Reabilitação de Edifícios**

- Metodologias inovadoras de projeto para a aplicação de estratégias de reabilitação – Reabilitação Integrada; (Capítulo 2.5.4 – Página 39)
- Soluções de reabilitação inovadoras recentemente desenvolvidas. (Capítulo 2.6 – Página 43)

#### **Estratégias recentes e inovadoras para a reabilitação energética dos edifícios**

### **3.2.2 Caracterização do desempenho energético do parque edificado**

Em linha com os objetivos do projeto IEA ECBCS Annex 50 e o projeto enquadrador nacional, Projeto FCT – Reabilitação Energética de Edifícios, foi necessário a realização de um estudo aprofundado para a caracterização do desempenho energético do parque edificado, tendo em vista o desenvolvimento de soluções de reabilitação adequadas à realidade nacional.

Para tal, foi fundamental o estudo das bases de dados criadas com a implementação do Sistema de Certificação Energética (SCE) em 2007, as quais incluem diversos parâmetros presentes nos certificados energéticos. Estas bases de dados foram uma ferramenta essencial para a verificação do desempenho energético dos edifícios Portugueses, dado a existência de um elevado número de certificados entregues - 126 686 de edifícios certificados em Janeiro de 2012 - constituindo assim uma amostra representativa do parque habitacional Português.

Assim, foram selecionados os parâmetros considerados mais significativos para a verificação do desempenho energético dos edifícios, nomeadamente:

- Coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca e dos envidraçados;
- Necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento;
- Taxa de renovação do ar;
- Potência instalada dos sistemas de aquecimento e arrefecimento;
- Classe energética.

Os dados disponíveis foram organizados em termos de período de construção e utilizada a ferramenta Excel® para a organização de dados, incluindo o cálculo de valores médios, realização de gráficos e linhas de tendência, com vista à verificação do tipo de envolvente com maiores necessidades de intervenção.



No entanto, mesmo já possuindo informação detalhada do desempenho energético do parque habitacional existente, foi considerado importante a realização de uma campanha de medições *in-situ* a diferentes edifícios com diferentes tipologias, soluções construtivas e regiões climáticas, de forma a validar as conclusões obtidas pela análise da base de dados do sistema de certificação nacional (SCE), assim como verificar outras características do desempenho do parque habitacional que não é possível inferir através das bases de dados do SCE, tal como o desempenho lumínico.

As grandezas selecionadas para a monitorização e os métodos aplicados para a medição das mesmas foram:

- **Coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca ( $U$ )** – utilização de um sensor para a medição do fluxo de calor que atravessa as paredes de fachada, e utilização de termopares para a medição da temperatura superficial das mesmas, possibilitando assim o cálculo do valor de  $U$ ;
- **Taxa de Renovação do ar** – utilização do equipamento porta-ventiladora, o qual, através da criação de um gradiente de pressão nos espaços, permite a medição da taxa de renovação horária de cada espaço;
- **Iluminação Natural** – utilização de sensores de iluminação – luxímetros - para a medição da intensidade luminosa dos diferentes espaços, em simultâneo com a iluminação exterior, permitindo o cálculo do índice de avaliação de desempenho lumínico, mais reconhecido internacionalmente, FLD e comparação com os valores recomendados;
- **Pontes térmicas** – utilização de câmara termográfica para identificar os pontos críticos da envolvente dos edifícios relativamente a trocas térmicas, permitindo identificar zonas com trocas térmicas muito superiores aquelas da zona corrente e assim verificar a existência de pontes térmicas e das patologias associadas, como as condensações.

### 3.2.3 Propostas Iniciais de Soluções de Reabilitação Energética

A partir do conceito base definido pelos projetos Annex 50 e FCT – Reabilitação Energética de Edifícios, foi iniciado o desenvolvimento da solução de reabilitação através da proposta de três soluções distintas, baseadas em diferentes tecnologias e materiais.

Para tal, é fundamental a utilização de ferramentas computacionais para a sua otimização e garantia de adequação. Assim foram utilizadas:

- Ferramentas gráficas 3D – AutoCAD e Google SketchUP - para o estudo do design das soluções;
- Ferramentas de simulação dinâmicas – VisualDOE, eQuest, EnergyPlus e DesignBuilder – para o estudo do desempenho térmico da solução desenvolvida aplicada a casos de estudo selecionados.

### 3.2.4 Desenvolvimento da Solução Base do Módulo de Reabilitação Prefabricado

Após decisão sobre qual seria a proposta de solução de reabilitação a desenvolver, conforme explicado no Capítulo 5 - Módulo de Reabilitação Prefabricado – MRP, este foi caracterizado e pormenorizado convenientemente, assim como especificado o sistema de encaixe para a sua aplicação nas fachadas, além de estimadas as suas características térmicas.

Após o desenvolvimento de qualquer solução inovadora de reabilitação de fachadas, é essencial a otimização do seu desempenho térmico. Tal foi realizado com a utilização de ferramentas de simulação, nomeadamente a ferramenta THERM para o estudo de pontes térmicas, e a ferramenta Wufi para a previsão da ocorrência de condensações no interior da solução, assim como a identificação da espessura ótima de isolamento através do cálculo do nível de isolamento a aplicar que leva a um melhor rácio em termos da relação custo - benefício.

### 3.2.5 Monitorização do desempenho do Módulo de Reabilitação Prefabricado

Para a avaliação e monitorização do desempenho da solução de reabilitação, foram realizados diversos protótipos da mesma, possibilitando a aplicação da solução a um edifício de teste – com condições interiores controladas – e verificado *in-situ* o seu desempenho energético, com a medição do coeficiente de transmissão térmica do módulo, através da colocação de diversos sensores para medição da temperatura e fluxo de calor ao longo do mesmo.

Adicionalmente foi utilizada uma câmara termográfica para verificação da existência de pontes térmicas.

A verificação da resistência mecânica do módulo foi executada através da realização de testes padronizados para o seu tipo de aplicação => material de revestimento de paredes de fachada.

Assim, o módulo foi submetido a diversos choques com objetos de dimensões e pesos padronizados e os danos obtidos no módulo foram medidos para determinação da adequação das suas propriedades mecânicas à sua utilização prevista.



### **3.2.6 Solução Final do Módulo de Reabilitação Prefabricado**

Considerando os dados obtidos através da otimização da solução base do MRP, mas também tendo em conta as evidências obtidas com a campanha de monitorização dos protótipos, foi possível identificar os pontos onde este não apresentava um desempenho otimizado e introduzir medidas corretivas. Assim, foi desenvolvida a solução final otimizada do módulo MRP e efetuada a sua caracterização e pormenorização.

### **3.2.7 Aplicação da Solução Desenvolvida a Casos de Estudo**

Em adição ao desenvolvimento de soluções inovadoras de reabilitação, foi também um objetivo do trabalho verificar os resultados obtidos com a aplicação da solução a casos de estudo de diferentes tipologias. Para tal, foi simulada a aplicação do módulo MRP a um edifício unifamiliar e a um multifamiliar e avaliado o desempenho energético do mesmo antes e depois da sua aplicação.

No entanto, aquando de intervenções de reabilitação, é aconselhável que estas, ao invés de reabilitar elementos específicos dos edifícios de uma forma independente, utilizem estratégias que incluam a reabilitação de toda a envolvente do edifício e seus sistemas, ou seja, se faça uma Reabilitação Integrada de todo o edifício. Com estas estratégias é possível um aumento substancial da eficiência energética dos edifícios (muitas vezes para padrões semelhantes aos dos edifícios novos) e diminuir os prazos de amortização dos investimentos.

Assim, para o estudo da eficácia da aplicação da solução desenvolvida, além da verificação dos resultados obtidos com a sua aplicação de forma isolada, foi estudada a sua contribuição quando incluída numa estratégia de reabilitação global do edifício, tal como a reabilitação integrada.

## **3.3 FERRAMENTAS COM POTENCIAL PARA APOIO AO DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO DE REABILITAÇÃO**

Para o estudo e desenvolvimento da solução de reabilitação inovadora, estão atualmente disponíveis no mercado diversas ferramentas de apoio, com diferentes âmbitos, distribuindo-se as mesmas por duas áreas de intervenção principais:

- Ferramentas de simulação energética;
- Ferramentas de análise económica;

### 3.3.1 Ferramentas de Simulação Energética

A simulação energética de edifícios tem como objetivo a avaliação do desempenho energético dos edifícios e respetivas soluções construtivas e sistemas energéticos.

Para tal é necessário modelar o edifício, o que pode ser definido como a introdução das características de um edifício num modelo, com um certo nível de abstração. Tendo em conta que um edifício é composto por milhares de variáveis, é necessário apenas implementar aquelas que são de maior representatividade para o comportamento do edifício (Adelard et al, 2000).

As ferramentas de simulação são, atualmente, utilizadas de uma forma generalizada no sector dos edifícios. Em termos de simulação energética, foi a partir dos anos 70 que as primeiras ferramentas começaram a ser introduzidas no mercado, tendo já um grande potencial mas sendo de utilização muito complexa dado os reduzidos meios informáticos existentes na altura. No entanto, com o atual avanço na capacidade de processamento dos computadores e a implementação de interfaces gráficas muito detalhadas, as ferramentas de simulação energética estão, cada vez mais, com maior número de utilizadores e com maior potencial (Silva, 2006). Por outro lado, nos últimos anos, devido à exponencial evolução do mundo “www” (World-Wide-Web) começaram a aparecer novas vertentes, tal como a ligação das ferramentas de simulação com bases de dados atualizados em tempo real, ou a aplicação de ferramentas em páginas da Internet (online).

Seguidamente serão apresentadas algumas das ferramentas estudadas, com vista a determinar o seu potencial de aplicação para apoio ao desenvolvimento da solução de reabilitação.

#### SOLTERM®

(Solterm, 2012)



**\_Âmbito:** Esta ferramenta é adequada para calcular a energia fornecida através da aplicação de coletores solares para águas quentes sanitárias ou painéis fotovoltaicos.

**\_Facilidade de uso:** Adequado para utilização sem conhecimento técnico específico, adequado para a maioria dos grupos-alvo e com diferentes níveis de complexidade.

**\_Dados de entrada:** Localização, obstrução solar, tipo de painel e respetiva área e configuração.



**\_ Resultados apresentados:** Tabela com energia fornecida pelo sistema solar e um relatório padrão.

**\_ Interface gráfica:** Esta é essencialmente uma ferramenta gráfica, com opções pré-definidas e várias alternativas (Figura 3.1).

**\_ Limitações:** Apenas pode fornecer estimativas da energia produzida por painéis solares ou painéis fotovoltaicos. Os dados climáticos incluídos na ferramenta são apenas para Portugal, e são encriptados (sem possibilidade de edição), não sendo possível adicionar dados climáticos de outras localizações ou países.

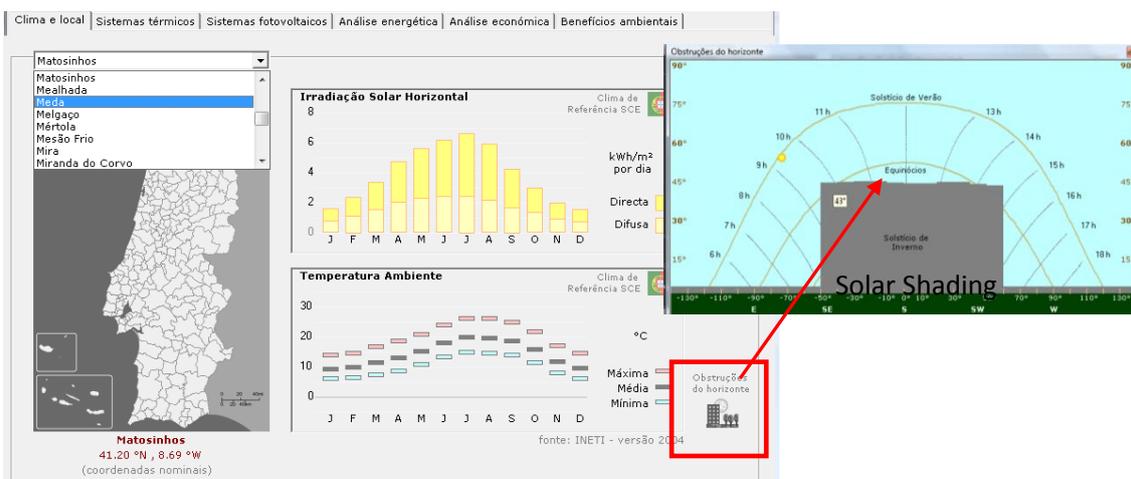


Figura 3.1 – Escolha dos dados climáticos e sombreamentos na ferramenta SOLTERM.

#### RCCTE-STE<sup>®</sup>

(RCCTE-STE, 2007)



**\_ Âmbito:** Esta ferramenta foi desenvolvida para avaliar o cumprimento dos requisitos impostos pela regulamentação energética dos edifícios (RCCTE; RSECE) e calcula a classe energética do edifício. Se combinado com o SOLTERM, é possível estudar o desempenho energético do edifício incluindo a implementação de sistemas que utilizem fontes de energia renováveis (painéis solares térmicos, painéis solares fotovoltaicos, etc.).

**\_ Facilidade de uso:** Requer conhecimento técnico específico, no entanto, para profissionais do setor da eficiência energética de edifícios, esta é uma ferramenta de uso simples, para todos os níveis de utilização possíveis.

**\_ Dados de entrada:** Localização; características genéricas do edifício; sistemas de aquecimento, arrefecimento, ventilação e AQS; Coeficiente de transmissão térmica da

envolvente opaca e envidraçados, e peso específico dos elementos opacos; pontes térmicas; fatores de sombreamento.

**\_Resultados apresentados:** Relatório energético padrão, incluindo ganhos e perdas de calor pela envolvente do edifício, e necessidades energéticas do edifício (em termos de energia útil, final ou primária).

**\_Interface gráfica:** É essencialmente uma ferramenta gráfica, com opções pré-definidas e diversas alternativas em termos das características de construção genéricas, e também vários menus projetados pelo toque do ponteiro (pop-up) – Figura 3.2 – para introduzir as propriedades da envolvente dos edifícios.

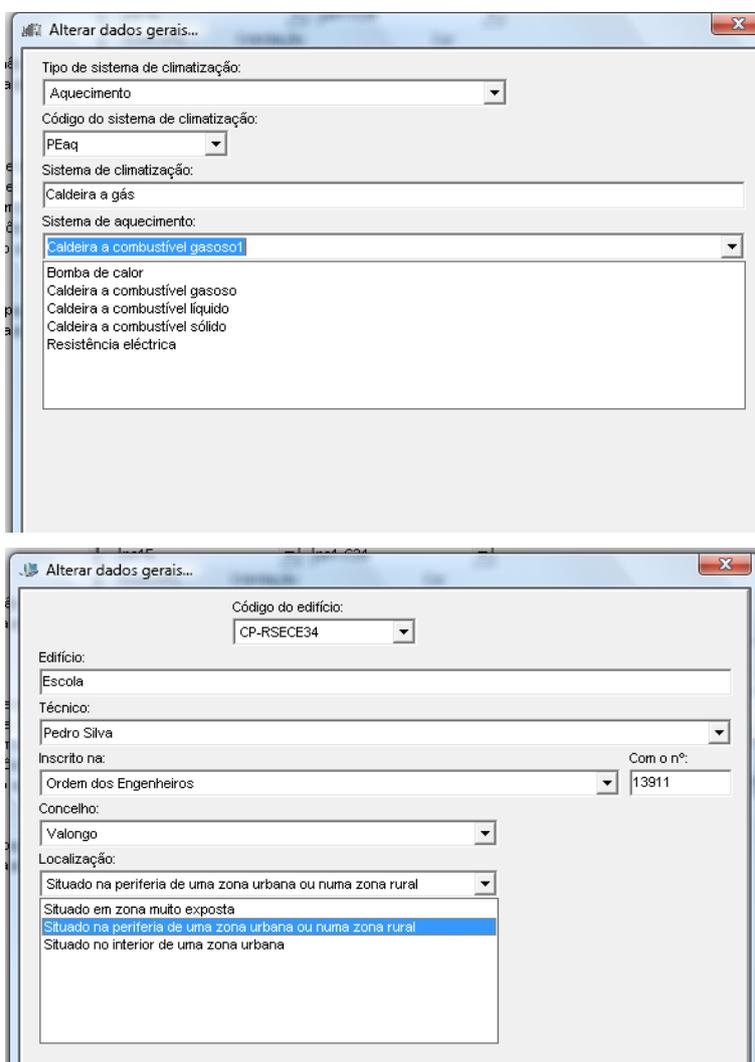


Figura 3.2 – Menus pop-up da ferramenta RCCTE-STE com as características genéricas do edifício.

**\_Limitações:** Apenas adequadas para especialista em construção e projetistas. A fim de testar diferentes estratégias de reabilitação é obrigatório conhecer as propriedades específicas (U, peso específico, etc.). Os dados climáticos incluídos são apenas para Portugal, e são



encriptados (sem possibilidade de edição), não sendo possível adicionar dados climáticos de outras localizações ou países.

### **Retrofit Advisor®**

(Zimmermann, 2006b)



**\_Âmbito:** Esta é uma ferramenta desenvolvida no decorrer do Projeto IEA ECBCS Annex 50, e que permite uma avaliação simples, mas detalhada das opções de reabilitação para edifícios de habitação multifamiliares. É uma ferramenta que apoia a seleção de uma estratégia de reabilitação apropriada. Esta ferramenta foi adaptada para cinco países - Áustria, França, Portugal, Suécia e Suíça.

**\_Facilidade de uso:** Esta é uma ferramenta de fácil uso por parte de utilizadores não-profissionais, bem como para uma análise detalhada, mais complexa por parte de utilizadores profissionais.

**\_Dados de entrada:** Estão ligados ao tipo de utilizador. Para os não-profissionais é necessário apenas fornecer dados genéricos do edifício (área, nº de pisos, nº de apartamentos, tipologia – Figura 3.3, etc.), características da vizinhança (acesso a transportes públicos, comércio, áreas verdes, etc.), as presentes necessidades de reabilitação e dados financeiros (investimento disponível, rendas atuais, etc.). Para utilizadores profissionais é necessário dados detalhados das características do edifício (características da envolvente, incluindo o coeficiente de transmissão térmica de paredes, coberturas, pavimentos e envidraçados, etc.) e necessidades energéticas (energia útil, final e primária), dados financeiros (taxas de inflação, dados do crédito bancário, valor atualizado líquido do investimento, etc.), medidas de renovação (tipo de intervenção na fachada, pavimento, cobertura, sistemas energéticos, etc.).

**\_Resultados apresentados:** Fotos que simulam a aparência do edifício antes e depois da renovação. Vários gráficos que mostram o desempenho do edifício, comparando o estado atual com o final.

**\_Interface gráfica:** Essencialmente uma ferramenta gráfica, com diferentes tipologias de edifícios pré-definidos e estratégias de renovação. São possíveis ajustes simplificados a fim de adaptar o tipo de edifício selecionado e o cenário de renovação à situação real. Através de uma entrada de dados detalhada permite também uma correção final e detalhada dos dados do edifício e características da intervenção de reabilitação.

**\_Limitações:** As tipologias de edifícios são insuficientes para representar o parque existente, mesmo considerando as adaptações simples ou detalhadas e correções permitidas pela ferramenta. Os edifícios unifamiliares não estão representados nesta ferramenta. O modelo de cálculo aplicado pela ferramenta é simplificado, não acrescentando mais informação do que aquela disponível pelas metodologias de cálculo regulamentares. A ferramenta não produz um relatório padrão com os valores reais - energia, financeiro, etc - do edifício reabilitado.



Figura 3.3 – Tipologias de edifícios incluídos no Retrofit Advisor.

### HEED – Home Energy Efficient Design®

(HEED, 2012)



**\_Âmbito:** Esta ferramenta foi desenvolvida pela Universidade de Los Angeles, Califórnia – UCLA - com o objetivo de projetar edifícios de baixas emissões de carbono. Adequado para todos os tipos de edifícios, e regiões climáticas. Contém um motor de simulação certificado e permitir comparar até nove alternativas para o design do edifício (diferentes tipos de envolvente, sistemas, etc.) de uma só vez.

**\_Facilidade de uso:** Apresenta dois modos de funcionamento, o modo básico, onde não é necessário qualquer conhecimento técnico e o modo avançado onde são exigidos conhecimentos específicos em edifícios, materiais, sistemas de iluminação natural, etc..

**\_Dados de entrada:** Estão ligados ao modo de funcionamento. Na configuração básica, são apenas necessários dados genéricos do edifício (tipo de construção, área, pisos, localização). No modo Avançado são exigidas propriedades do edifício mais extensas, tais como características da envolvente, sistemas de climatização, massa térmica, etc..

**\_Resultados apresentados:** Vários gráficos comparando as diferentes alternativas, em termos de necessidades energéticas, uso da eletricidade, os custos de combustível, etc.. Tabela



resumo com os resultados de todas as alternativas analisadas. Adicionalmente, a ferramenta sugere várias estratégias de projeto para melhorar o edifício.

**\_Interface gráfica:** Essencialmente uma ferramenta gráfica, com esquemas de edifícios pré-definidos. Baseado numa interface gráfica simples. Possibilidade de rápida e facilmente posicionar os envidraçados na envolvente do edifício, arrastando-os para a sua posição correta no modelo 3D do edifício gerado pela ferramenta (Figura 3.4).

**\_Limitações:** Mesmo considerando o modo avançado, as características do edifício e as propriedades dos sistemas de climatização são limitadas. Os gráficos não podem ser exportados para outros programas de edição (por exemplo, Microsoft Excel®). Não há possibilidades de ver, em termos numéricos, os resultados horários simulados.

WINDOW, DOOR, and SUNSHADES DESIGN										Project : Retroft Example - Pedro Silva	
Scheme 3 : Copy 2: My Home as Built										Building Type: SINGLE FAMILY RESIDENCE	
										City Location: PORTO, -PRT, IWEC Data,08	
WINDOW	Quantity	Width	Height	OVERHANG	LEFT FIN	RIGHT FIN					
Key Location				Depth	Offset	Depth	Offset	Depth	Offset		
A Front Window	5	6.00	4.67	2.21	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
B Front Door	1	3.00	6.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
C Left Side Window	2	2.50	3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
D Rear Window	12	3.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
E Rear Door	1	3.00	6.67	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
F Right Side Window	2	2.50	3.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Add Type											

Figura 3.4 – Editor de colocação de envidraçados do HEED.

eQuest®



(Hirsh, 2003)

**\_Âmbito:** Esta ferramenta tem como objetivo permitir uma análise detalhada da aplicação dos sistemas e tecnologias mais avançados no setor da construção usando as mais sofisticadas técnicas de simulação energética, sem a necessidade de uma vasta experiência em simulação energética.

**\_Facilidade de uso:** Fornece um assistente para criar, de uma forma simplificada, um modelo do edifício. Assim, não são necessários conhecimentos técnicos específicos para aplicar esta ferramenta. Para a edição de dados detalhados, apenas com conhecimentos técnicos específicos, é possível simular o edifício e explorar todo o potencial da ferramenta.

**\_Dados de entrada:** A partir do modo de assistente, são necessárias informações do edifício em geral, incluindo tipo de construção, dimensões, e tipos de sistemas de climatização, geometria geral do edifício, propriedades e dimensões das janelas, e propriedades das portas.



A partir do modo detalhado, as entradas podem incluir o coeficiente de transmissão térmica dos diversos elementos da envolvente, pesos específicos, curvas de desempenho dos sistemas de climatização, perfis de utilização, equipamentos e iluminação.

**\_Resultados apresentados:** Gráficos e tabelas com as necessidades energéticas simuladas do edifício, além de um relatório padrão com os resultados horários da simulação.

**\_Interface gráfica:** Essencialmente uma ferramenta gráfica. Aplicando o assistente, todas as entradas necessárias são preenchidas com valores padrão, como tal, é apenas necessário ajustar estes valores para simular o edifício.

**\_Limitações:** Mesmo no modo de assistente, a ferramenta apresenta conceitos muito técnicos que só especialistas em construção ou projetistas podem compreender. A ferramenta utiliza unidades de IP – Inch-Pound (Libra – Polegada). O processo de simular alternativas é possível, no entanto, pode ser algo complexo.

**VisualDOE®**



(VisualDOE, 2010)

**\_Âmbito:** Esta ferramenta tem como objetivo a simulação energética dinâmica de várias alternativas de envolventes e sistemas dos edifícios.

**\_Facilidade de uso:** A ferramenta assenta numa interface gráfica do modelo de cálculo DOE, permitindo de forma rápida a implementação da geometria e características da envolvente e sistemas dos edifícios.

**\_Dados de entrada:** São necessárias informações do edifício em geral, dimensões, e tipos de sistemas de climatização, geometria geral do edifício, propriedades e dimensões das janelas, e propriedades das portas. São também necessárias as características específicas da envolvente, tal como o coeficiente de transmissão térmica, pesos específicos, assim como dos sistemas de climatização, tal como as curvas de desempenho. Por fim é necessário caracterizar os perfis de utilização, equipamentos e iluminação.

**\_Resultados apresentados:** Gráficos e tabelas com as necessidades energéticas simuladas do edifício, além de um relatório padrão com os resultados horários da simulação.

**\_Interface gráfica:** Essencialmente uma ferramenta gráfica, com possibilidade de visualização do modelo a 3 dimensões.



**\_Limitações:** A ferramenta apresenta conceitos muito técnicos que só especialistas em construção ou projetistas podem compreender.

**EnergyPlus®**



(EnergyPlus, 2008)

**\_Âmbito:** Esta ferramenta tem como objetivo a simulação energética dinâmica de edifícios.

**\_Facilidade de uso:** A ferramenta assenta numa interface numérica do modelo de cálculo DOE e BLAST, permitindo a implementação da geometria e características da envolvente e sistemas dos edifícios.

**\_Dados de entrada:** São necessárias informações do edifício em geral, dimensões, e tipos de sistemas de climatização, geometria geral do edifício, propriedades e dimensões das janelas, e propriedades das portas. São também necessárias as características específicas da envolvente, tal como o coeficiente de transmissão térmica, pesos específicos, assim como dos sistemas de climatização, tal como as curvas de desempenho. Por fim é necessário caracterizar os perfis de utilização, equipamentos e iluminação.

**\_Resultados apresentados:** Tabelas com os resultados horários da simulação para diversos parâmetros, como as necessidades energéticas, temperatura interior, horas de conforto, etc..

**\_Interface gráfica:** Não possui interface gráfica.

**\_Limitações:** O processo de construção do modelo de simulação dos edifícios é complexo e demorado. Apresenta conceitos muito técnicos que só especialistas em simulação energética de edifícios podem compreender.

No decorrer dos trabalhos de investigação e desenvolvimento apresentados nesta Tese de Doutoramento, as ferramentas de simulação energética utilizadas foram aquelas que apresentavam os melhores motores de cálculo e mais adequadas ao objetivo final, ou seja:

- **Energyplus** – esta ferramenta foi utilizada para edifícios com maiores áreas e envolventes mais recortadas, pois tem o motor de cálculo mais desenvolvido e assim consegue apresentar resultados mais eficazes para edifícios mais complexos;
- **eQuest** – esta ferramenta foi utilizada para edifícios mais simples, onde os resultados obtidos com diferentes ferramentas não variam significativamente. Sendo mais simples e rápida a sua utilização, sem se comprometer o rigor dos resultados;

- **VisualDOE** – esta ferramenta foi utilizada quando os edifícios possuíam estufas ou outras estratégias solares passivas, pois existem rotinas específicas para esta ferramenta, simulando estas estratégias;

### 3.3.2 Ferramentas de Análise Económica

Em qualquer projeto de reabilitação é essencial realizar uma análise económica, com vista a verificar o período necessário para reaver o investimento realizado – amortizar o investimento – assim como para verificar a rentabilidade da intervenção, e assim analisar de uma forma sustentada os benefícios económicos que a intervenção vai proporcionar.

As ferramentas mais utilizadas para a execução de análises económicas são:

- Período de retorno simples (PRS);
- Valor atualizado líquido (VAL).
- Taxa interna de retorno modificada (mTIR);

**Período de retorno simples:** o PRS é o quociente entre o custo adicional de investimento (Ca) e a Poupança anual resultante da aplicação da alternativa mais eficiente (P1).

Segundo o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), o custo adicional de investimento é calculado pela diferença entre o custo inicial da solução base, isto é, sem alternativa de maior eficiência energética, e o da solução mais eficiente, estimada aquando da construção do sistema, com base na melhor informação técnica e orçamental ao dispor do projetista.

A poupança anual resultante da aplicação da alternativa mais eficiente é estimada com base em simulações anuais, detalhadas ou simplificadas do funcionamento do edifício e dos seus sistemas energéticos, conforme aplicável em função da tipologia e área útil do edifício, nos termos do RSECE, da situação base e da situação com a solução mais eficiente.

O PRS pode ser obtido através das equações 3.1 a 3.3.

$$\text{Redução da fatura energética: } \text{Custo exploração}_{\text{inicial}} - \text{Custo exploração}_{\text{Reab}} \quad (3.1)$$

$$\text{Custo Exploração} = \frac{N_{ic}}{\eta_i} \times A_p \times \text{custo}_i + \frac{N_{vc}}{\eta_v} \times A_p \times \text{custo}_v + N_{ac} \times A_p \times \text{custo}_{aqs} \quad (3.2)$$

$$\text{PRS} = \frac{\Delta \text{Custo de Investimento}}{\Delta \text{Custo de Exploração}} \quad (3.3)$$



Com:

$N_{ic}$ ,  $N_{vc}$ ,  $N_{ac}$  – Necessidades energéticas para aquecimento, arrefecimento e águas quentes sanitárias, respetivamente (kWh/m<sup>2</sup>.ano);

$Custo_i$ ,  $Custo_v$ ,  $Custo_{aqs}$  – tarifa energética afeta ao sistema de aquecimento, arrefecimento e águas quentes sanitárias, respetivamente (€/kWh);

$A_p$  – Área útil (m<sup>2</sup>);

$\eta_i$ ,  $\eta_v$  – rendimento do sistema de aquecimento e arrefecimento, respetivamente.

**\_VAL:** o valor atualizado líquido ou valor presente líquido (VPL) de uma série temporal de fluxos de caixa (entradas e saídas de capital) é definido como a soma dos valores presentes dos fluxos de caixa individuais da mesma entidade.

No caso em que todos os fluxos de caixa futuros são de entrada e a saída de dinheiro é apenas o preço de compra, o VAL é simplesmente o valor presente dos fluxos de caixa futuros menos o preço de compra. O VAL é um método padrão para avaliar o valor do dinheiro com o decorrer do tempo para avaliar projetos a longo prazo. Amplamente utilizado em economia, finanças e contabilidade, mede o excesso ou escassez de fluxos de caixa, em termos de valor presente, uma vez que os encargos financeiros sejam cumpridos.

O VAL pode ser descrito como o "Valor" de diferença entre as somas entradas e saídas de dinheiro em caixa. Comparando o valor presente do dinheiro hoje com o valor presente do dinheiro no futuro, tendo a inflação e taxas de retorno em conta.

Para o cálculo do VAL deve-se usar a expressão 3.4 (Lin e Nagalingam, 2000)

$$VAL = \sum_{t=0}^N \frac{R_t}{(1+i)^t} \quad (3.4)$$

Com:

$i$  – taxa de inflação;

$R_t$  – fluxo de caixa num determinado período (t);

$t$  – período de análise do fluxo de caixa;

$N$  – número total de períodos em análise.

**\_mTIR:** A taxa interna de retorno modificada de um investimento ou projeto é a "taxa de retorno anualizada agravada" ou "taxa de retorno" que torna o valor atualizado líquido (VAL) de todos os cash flows (tanto positivos como negativos) de um determinado investimento igual a zero.

Em termos mais específicos, a mTIR de um investimento é a taxa de atualização que o VAL dos custos (cash flows negativos) do investimento é igual ao VAL dos benefícios (cash flows positivos) do investimento.

A utilização mais comum da mTIR é para avaliar a adequação de um investimento ou projeto. Quanto mais elevada é a mTIR de um projeto, mais apelativo é o projeto. Assumindo que todos os projetos requerem a mesma quantidade de investimentos inicial, o projeto com o maior mTIR seria considerado o primeiro e com maior rentabilidade. Para o cálculo da mTIR deve-se usar a expressão 3.5 (Feibel, 2003).

$$mTIR = \sqrt[n]{\frac{Cash\_flow\_positivo}{Cash\_flow\_negativo}} - 1 \quad (3.5)$$

### 3.4 CONCLUSÕES

Seguindo a metodologia apresentada foi possível o desenvolvimento de uma solução de reabilitação de fachadas prefabricada otimizada, tendo em consideração as reais necessidades e patologias do parque edificado.

Para tal, o setor da reabilitação Português foi caracterizado através de bases de dados existentes (certificação energética dos edifícios – SCE – ADENE), mas também através de campanhas de medições realizadas em diversos edifícios.

Com o apoio de diversas ferramentas numéricas, gráficas e de simulação, a solução de reabilitação energética foi desenvolvida e validada.

Adicionalmente foi possível verificar o desempenho, térmico e mecânico, da solução desenvolvida, com a construção e aplicação de protótipos da mesma e a realização de campanhas de medição.

Com o objetivo de apoiar as ações de reabilitação, conforme estipulado pelos Projetos Annex 50 e FCT – Reabilitação Energética de Edifícios, foi estudada a aplicação da solução desenvolvida – módulo MRP – a dois casos de estudo, de uma forma isolada assim como incluídas numa intervenção global de reabilitação dos edifícios – Reabilitação Integrada – e os seus resultados foram avaliados com a aplicação de ferramentas de simulação energéticas dinâmicas.





#### **CAPÍTULO 4 – Identificação das Necessidades Energéticas do Parque Edificado**

"Nem tudo o que pode ser contado conta, e nem tudo o que conta pode ser contado."  
- Albert Einstein, Cientista. Alemanha, 1879 // 1955



## 4.1 INTRODUÇÃO

O presente Capítulo apresenta os estudos efetuados para a verificação do desempenho energético do parque edificado Português, conduzindo à identificação das áreas de intervenção prioritárias por parte de soluções de reabilitação a desenvolver.

Este estudo incluiu:

- A utilização da base de dados da ADENE para a verificação dos parâmetros incluídos nos certificados energéticos dos edifícios – desempenho e patologias energéticas;
- A realização de uma campanha de medições a diversos edifícios residenciais para monitorização de parâmetros relativos ao seu desempenho energético;

## 4.2 MOTIVAÇÃO

Com vista ao desenvolvimento de soluções de reabilitação otimizadas para o parque habitacional Português considerou-se necessário a realização de uma abrangente recolha de informação relativa às patologias energéticas dos mesmos, contemplando também a análise do seu comportamento energético. Através da pesquisa bibliográfica realizada foram encontrados diversos dados sobre as características da envolvente dos edifícios existentes, assim como o peso relativo do consumo do parque habitacional no consumo energético nacional (INE, Euroconstruct; IEA, etc), conforme já apresentado nos Capítulos precedentes. No entanto, estes dados não eram suficientes para identificar de uma forma concreta as necessidades energéticas do parque edificado.

Contudo, a ADENE – Agência para a Energia – criou bases de dados através da recolha de dados constantes dos certificados energéticos das habitações, a partir das quais foi possível, após adequado tratamento dos dados, verificar o desempenho energético de uma amostra significativa do parque habitacional Português, considerando a existência de um elevado número de certificados entregues até Janeiro de 2012.

Estas bases de dados (SCE - ADENE) incluem parâmetros muito importantes para a adequação da solução de reabilitação desenvolvida às reais necessidades e patologias do parque edificado Português, nomeadamente analisando os valores do coeficiente de transmissão térmica (U), a taxa de renovação do ar, necessidades energéticas, potência instalada do sistema de climatização, etc., do parque edificado. No entanto, estas bases de dados apenas permitem obter uma visão geral do parque edificado, visto não ser possível estudar de uma forma



individual o desempenho de cada fração autónoma, sendo apenas possível obter os valores médios, máximos e mínimos dos diversos parâmetros agrupados por tipologias, período de construção ou outras características.

Assim, foi considerado importante a realização de uma campanha de medições, cobrindo diversas tipologias do parque edificado português assim como diferentes zonas climáticas, de forma a *validar* os resultados obtidos nas bases de dados do SCE, para além de identificar outros parâmetros não incluídos nas mesmas. Esta campanha de medições teve como principal objetivo:

- **A Medição das características energéticas da envolvente dos edifícios residenciais** – de forma a verificar, para o grupo alvo principal da solução de reabilitação desenvolvida, as características energéticas da envolvente exterior dos edifícios;

### 4.3 AVALIAÇÃO DA BASE DE DADOS DO SISTEMA DE CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA PORTUGUÊS

#### 4.3.1 Introdução

Desde a entrada em vigor do Sistema de Certificação Energética (SCE) até Dezembro de 2011 foram certificadas 442.192 frações autónomas de edifícios residenciais e 47.822 frações autónomas de edifícios de serviços.

Assim, as bases de dados do Sistema de Certificação Energética apresentam indicadores energéticos de uma amostra significativa do parque edificado, sendo, potencialmente, uma fonte de informação muito relevante para a avaliação do desempenho energético do parque edificado Português.

Em sequência da cooperação entre a Agência para a Energia (ADENE) e a Universidade do Minho (UM) no decorrer da participação do projeto internacional IEA ECBCS Annex 56 – Cost Effective Energy & Greenhouse Gas Optimization in Building Renovation (Almeida, 2011), a ADENE providenciou acesso, por parte da UM, às bases de dados do SCE, as quais contêm os valores apresentados nos certificados energéticos das frações relativamente à caracterização dos elementos da envolvente e desempenho energético. Através desta informação foi possível verificar de uma forma sustentada o desempenho e patologias do parque habitacional Português.



### 4.3.2 Representatividade da Amostra

Para a verificação da representatividade da amostra de edifícios contidos nas bases de dados SCE, estas foram organizadas por períodos de construção (mantendo-se a organização apresentada no Censos 2001) e comparado o número de frações presentes na base de dados, com o número de frações contabilizadas através do Censos 2001 (Figura 4.1).

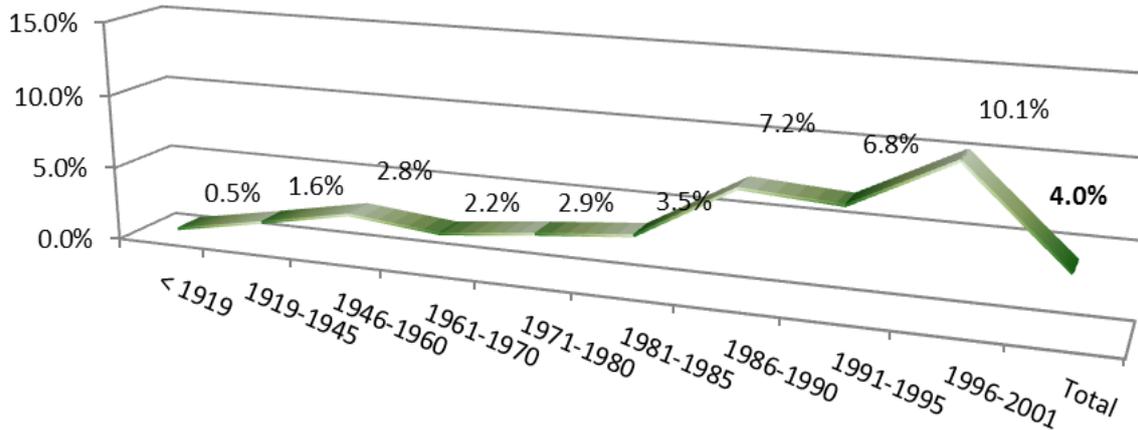


Figura 4.1 – Percentagem de frações certificadas por período de construção

Conforme seria de esperar, o número de edifícios certificados (Figura 4.2), assim como a percentagem de edifícios certificados, aumenta a partir de 1990, atingindo um máximo de 10.1% de edifícios certificados construídos no período de 1996 a 2001. Em termos globais, é possível verificar que 4% do parque edificado até 2001 já se encontra certificado, tendo estes edifícios servido como base para o estudo do desempenho e patologias energéticas do parque edificado Português.

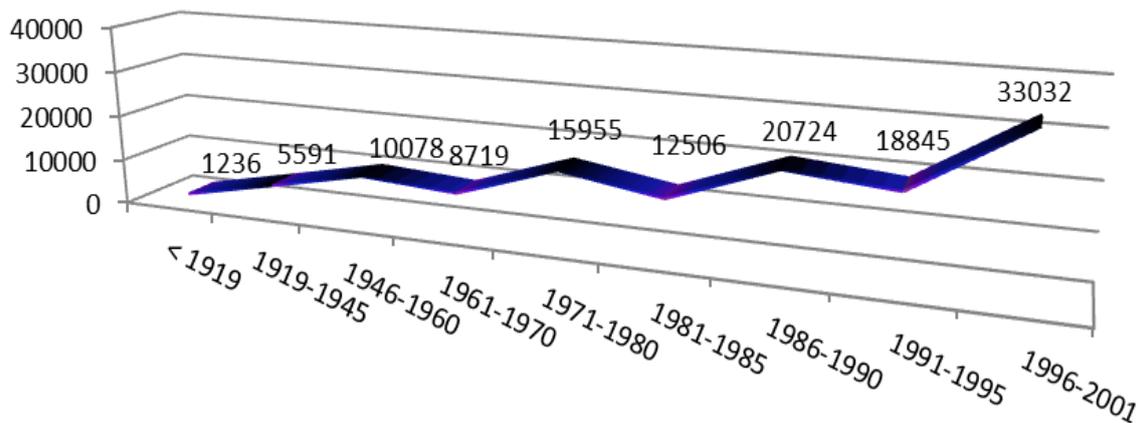


Figura 4.2 – Número de Edifícios Certificados por Ano Construção

### 4.3.2 Indicadores do Desempenho Energético dos Edifícios

Com o estudo das bases de dados do SCE foi possível identificar os parâmetros mais influentes na caracterização do desempenho e patologias energéticas do parque de edifícios Português. Como tal, os parâmetros selecionados para estudo mais detalhado foram:

- Coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca;
- Coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados;
- Necessidades energéticas para aquecimento, arrefecimento e água quente sanitária;
- Necessidades de energia primária;
- Potência instalada dos equipamentos de climatização;
- Taxa de renovação do ar;
- Classe Energética dos Edifícios.

Todos estes parâmetros foram organizados por período de construção dos edifícios, exceto para o caso da classe energética, onde foi considerado que a organização mais conveniente seria por tipologia dos edifícios, visto o cálculo da classe energética estar sujeito à tipologia do próprio edifício.

#### 4.3.2.1 Coeficiente de Transmissão Térmica da Envolvente Opaca (U)

Através da consulta das bases de dados SCE, relativamente ao coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca (U), conforme apresentado na Figura 4.3, foi possível observar que, em termos médios, a envolvente opaca dos edifícios existentes apresenta valores muito elevados de U, os quais variam entre **2.1 W/m<sup>2</sup>.K**, para edifícios construídos entre 1919 e 1945, e **1.1 W/m<sup>2</sup>.K**, para edifícios construídos entre 2002 e 2011.

U (W/m<sup>2</sup>.K)

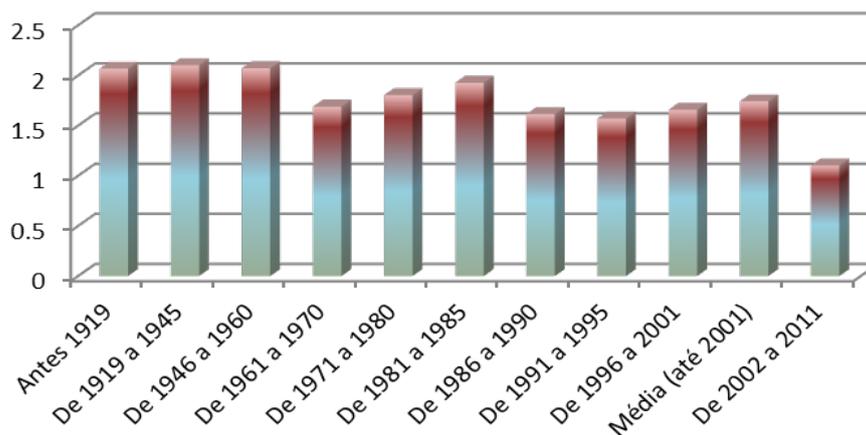


Figura 4.3 – Coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca dos edifícios por ano de construção

A evolução deste indicador não é homogénea, denotando-se uma tendência para a redução do valor de U até 1970, seguida por um aumento do valor de U entre 1970 e 1990. Tal facto pode



ser explicado pelas políticas de massificação da construção e consequente abaixamento da qualidade da construção, mas também pela utilização de materiais de construção mais leves.

A partir de 1990 verifica-se uma redução do valor de  $U$ , principalmente devido à entrada em vigor do 1º Regulamento energético Português (RCCTE, 1990).

Quando observado o valor médio de todo o parque edificado até 2001, verifica-se que o valor médio é de  $U = 1.65 \text{ W/m}^2.\text{K}$ , o qual é um valor muito elevado considerando os padrões atuais de eficiência energética exigido aos edifícios.

#### 4.3.2.2 Coeficiente de Transmissão Térmica da Envolvente Transparente ( $U$ )

Quanto ao coeficiente de transmissão térmica da envolvente transparente ( $U$ ), conforme apresentado na Figura 4.4, foi possível observar que, em termos médios, os envidraçados dos edifícios existentes apresentam valores muito elevados de  $U$ , os quais variam entre  $4.1 \text{ W/m}^2.\text{K}$ , para edifícios construídos entre 1981 e 1990, e  $3.2 \text{ W/m}^2.\text{K}$ , para edifícios construídos entre 2002 e 2011.

A evolução deste indicador é relativamente homogénea, principalmente até 1995, denotando-se uma tendência para a redução do valor de  $U$  a partir de 1996, o qual deve-se ao início da aplicação de vidros duplos nos edifícios.

Quando observado o valor médio de todo o parque edificado até 2001, verifica-se que o valor médio é de  $U = 4.0 \text{ W/m}^2.\text{K}$ , o qual é um valor muito elevado considerando os padrões atuais de eficiência energética exigido aos edifícios.

$U$  ( $\text{W/m}^2.\text{K}$ )

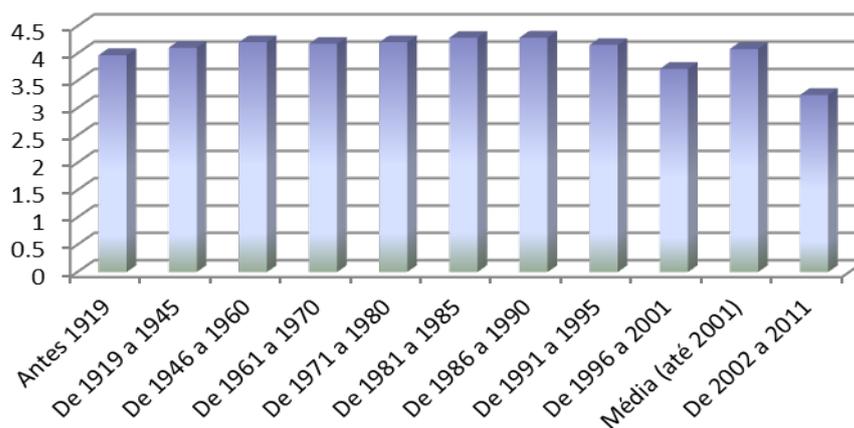


Figura 4.4 – Coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados dos edifícios por ano de construção

#### 4.3.2.3 Taxa de Renovação do Ar

Considerando a taxa de renovação de ar horária dos edifícios (Figura 4.5), foi possível observar que, em termos médios, os edifícios existentes apresentam valores elevados para esta taxa -

os quais variam entre  $0.75 \text{ h}^{-1}$ , para edifícios construídos antes de 1919, e  $1.02 \text{ h}^{-1}$ , para edifícios construídos entre 1991 e 2001.

A evolução deste indicador é relativamente homogénea, denotando-se uma tendência para a subida da taxa de renovação de ar, exceto entre 2002 e 2011, onde ocorre uma ligeira redução.

Quando observado o valor médio de todo o parque edificado até 2001, verifica-se que o valor médio para a taxa de renovação do ar é de  $0.95 \text{ h}^{-1}$ , o qual é um valor relativamente elevado considerando os padrões atuais de eficiência energética exigido aos edifícios.

RPH ( $\text{h}^{-1}$ )

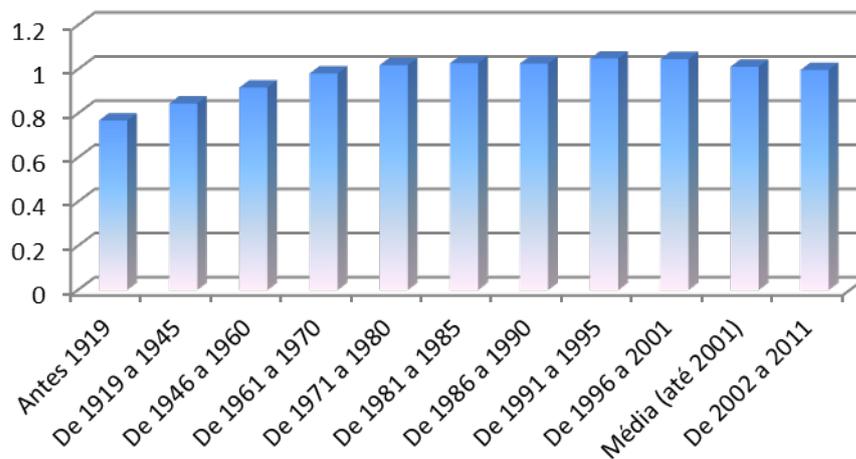


Figura 4.5 – Taxa de renovação do ar dos edifícios por ano de construção

#### 4.3.2.4 Necessidades Energéticas dos Edifícios

As necessidades energéticas dos edifícios foram avaliadas em três vertentes (Figura 4.6):

- 1) Necessidades de Aquecimento – este indicador apresenta uma tendência contínua de redução – desde os  $280 \text{ kWh/m}^2.\text{ano}$  para edifícios antes de 1919, até os  $90 \text{ kWh/m}^2.\text{ano}$  para edifícios entre 2001 e 2011. No entanto, o seu valor médio até 2001 –  $141 \text{ kWh/m}^2.\text{ano}$  – ainda é excessivo;
- 2) Necessidades de Arrefecimento – este indicador apresenta uma tendência contínua de redução – desde os  $20 \text{ kWh/m}^2.\text{ano}$  para edifícios antes de 1919, até os  $9.7 \text{ kWh/m}^2.\text{ano}$  para edifícios entre 2001 e 2011. No entanto, a grande maioria das habitações não possuem sistemas de arrefecimento e como tal, muitas vezes, estas necessidades não correspondem efetivamente a consumos energéticos, ao contrário do que acontece relativamente às necessidades de aquecimento;



- 3) Necessidades de Água Quente Sanitária (AQS) – este indicador não apresenta uma evolução homogênea (a qual pode ser explicada essencialmente pela variação da eficiência dos equipamentos utilizados para a produção de AQS), com valores desde os **105 kWh/m<sup>2</sup>.ano** para edifícios entre 1946 e 1960, até aos **38.4 kWh/m<sup>2</sup>.ano** para edifícios entre 2001 e 2011. No entanto, o seu valor médio até 2001 – **79.3 kWh/m<sup>2</sup>.ano** – é ainda excessivo;

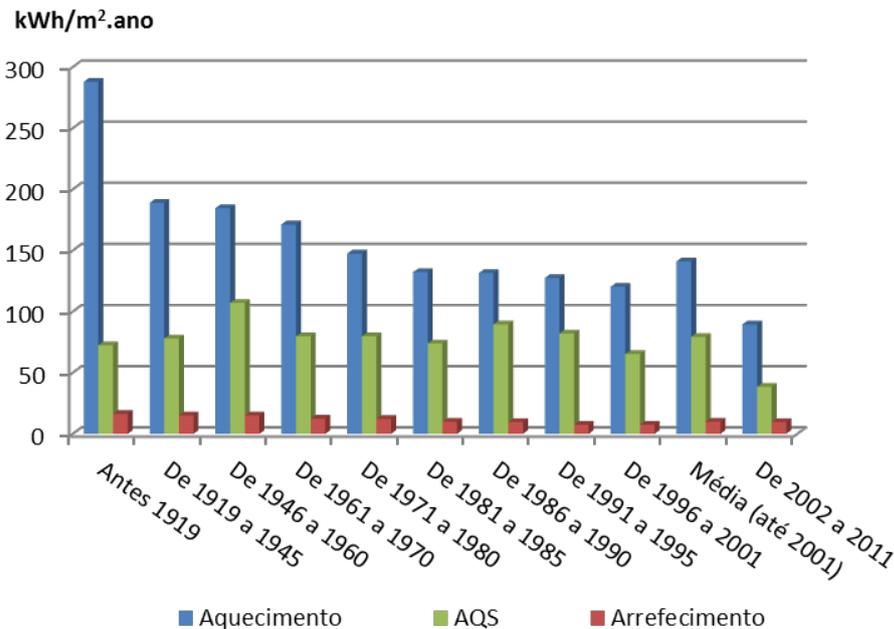


Figura 4.6 – Necessidades energéticas dos edifícios por ano Construção

#### 4.3.2.5 Necessidades de Energia Primária dos Edifícios

As necessidades de energia primária dos edifícios (Figura 4.7) variam entre os **22 kgep/m<sup>2</sup>.ano** para edifícios entre 1946 e 1960 e os **5 kgep/m<sup>2</sup>.ano** para edifícios entre 2002 e 2011.

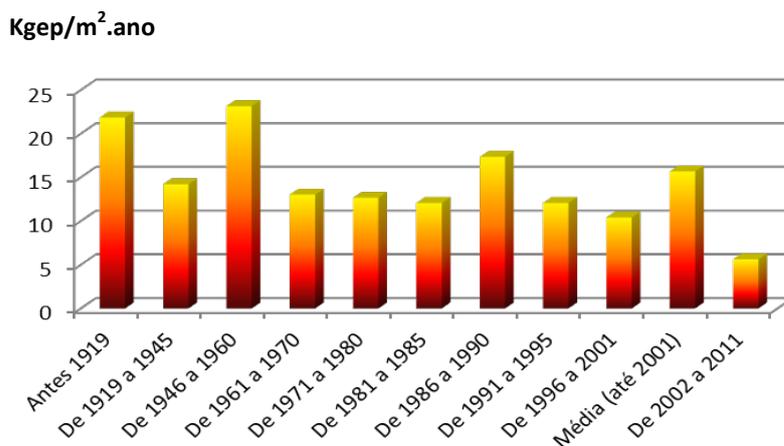


Figura 4.7 – Necessidades de energia primária dos edifícios por ano Construção

A sua evolução não é homogénea, principalmente devido à influência das necessidades para produção de AQS. No entanto, é possível verificar uma tendência para a redução do valor deste indicador.

Quando observado o valor médio de todo o parque edificado até 2001, verifica-se que o valor médio das necessidades de energia primária é de **15 kgep/m<sup>2</sup>.ano**, o qual é um valor muito elevado considerando os padrões atuais de eficiência energética exigido aos edifícios.

#### 4.3.2.6 Potência Instalada de Equipamentos para Aquecimento e Arrefecimento

A potência instalada de equipamentos para aquecimento e arrefecimento (Figura 4.8) varia entre os 2 kW para edifícios antes de 1919 e os 16 kW para edifícios entre 2002 a 2011.

A sua evolução indica uma tendência linear para o aumento da potência instalada, principalmente devido ao aumento dos padrões de conforto exigido pelos moradores.

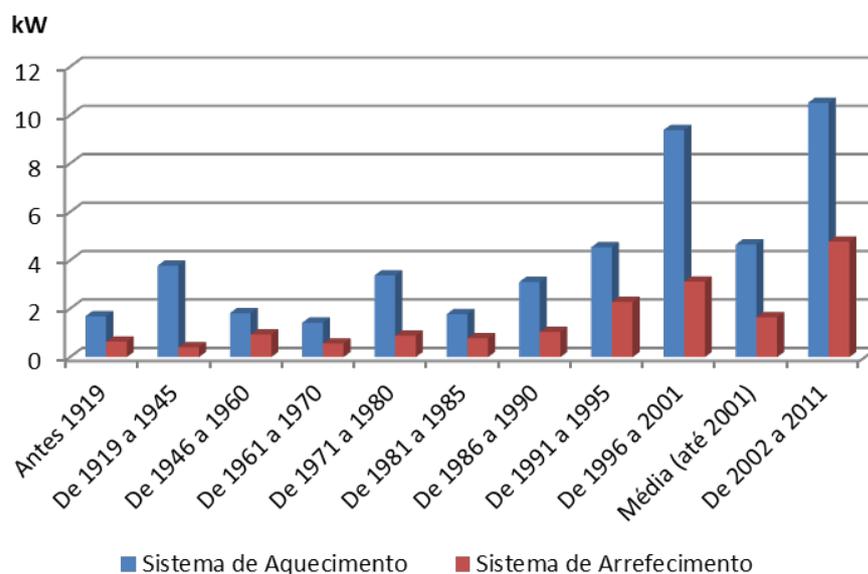


Figura 4.8 – Potência instalada dos sistemas de climatização dos edifícios por ano Construção

#### 4.3.2.7 Classe Energética

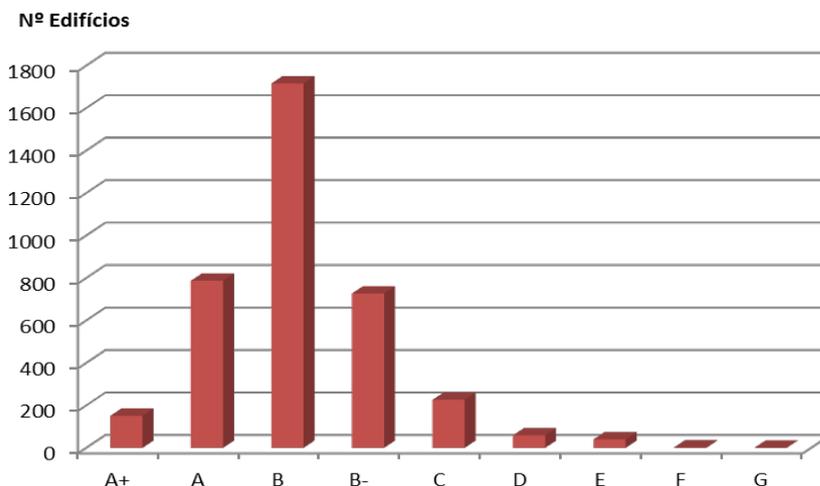
A classe energética do parque edificado foi avaliada através de cinco tipologias, variando a classe entre “A+” e “G”. A classe “B-” é aquela que cumpre os requisitos mínimos de eficiência energética para os edifícios novos.

As tipologias analisadas foram as seguintes:

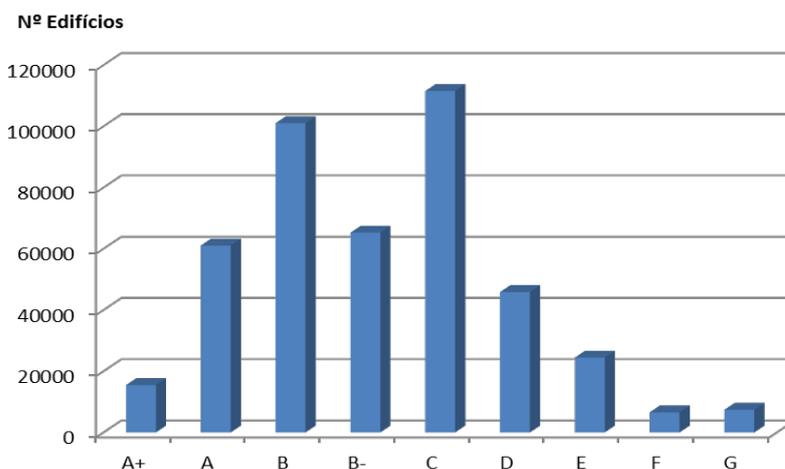
- 1) Edifícios de Habitação com Sistemas de Climatização (Figura 4.9) – para esta tipologia de edifícios verifica-se que, em média, apresentam uma eficiência energética adequada, visto a sua maioria pertencer à classe “B”;



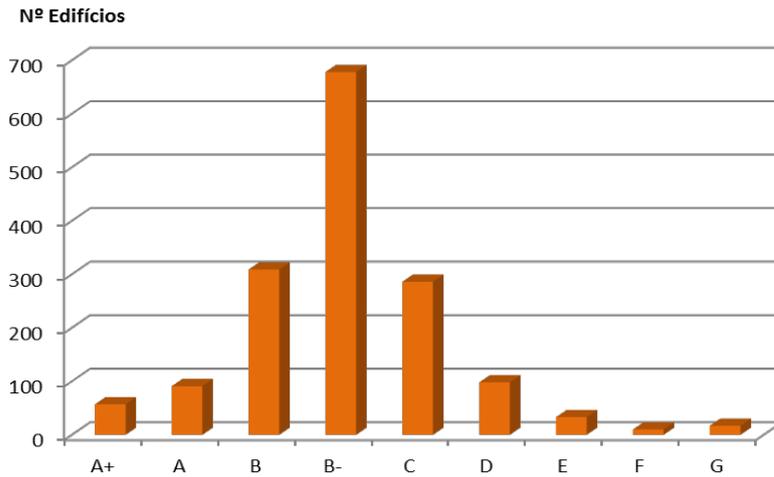
- 2) Edifícios de Habitação sem Sistemas de Climatização (Figura 4.10) – para esta tipologia de edifícios verifica-se que, em média, apresentam uma eficiência energética inadequada, visto a sua maioria pertencer à classe “C”;
- 3) Edifícios de Serviços com Sistemas de Climatização (Figura 4.11) – para esta tipologia de edifícios verifica-se que, em média, apresentam uma eficiência energética adequada, visto a sua maioria pertencer à classe “B-”;
- 4) Edifícios de Serviços sem Sistemas de Climatização (Figura 4.12) – para esta tipologia de edifícios verifica-se que, em média, apresentam uma eficiência energética inadequada, visto a sua maioria pertencer à classe “G”;
- 5) Grandes Edifícios de Serviços (Figura 4.13) – para esta tipologia de edifícios verifica-se que, em média, apresentam uma eficiência energética adequada, visto a sua maioria pertencer à classe “B-”;



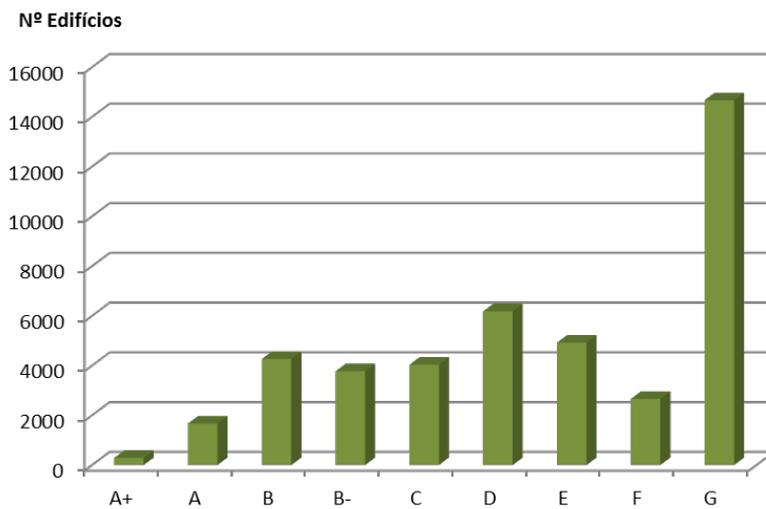
**Figura 4.9 – Distribuição da classe energética de edifícios de habitação com sistemas de climatização (Potencia instalada superior a 25 kW)**



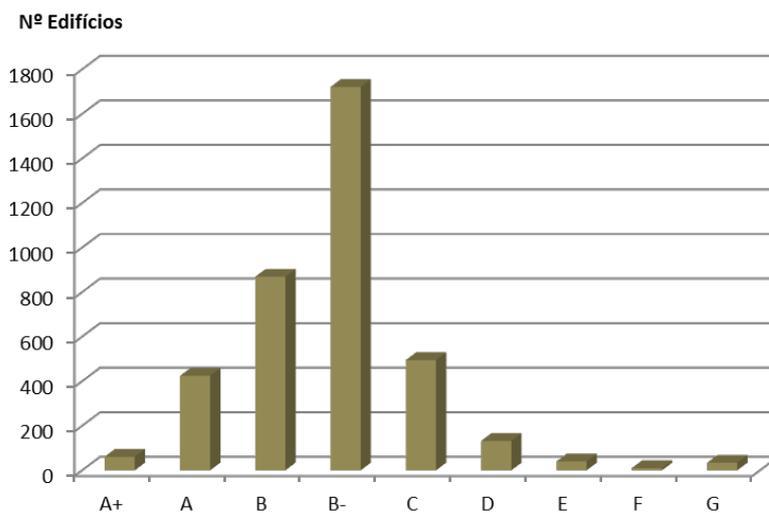
**Figura 4.10 – Distribuição da classe energética de edifícios de habitação sem sistemas de climatização (Potencia instalada inferior a 25 kW)**



**Figura 4.11 – Distribuição da classe energética de pequenos edifícios de serviços com sistemas de climatização (Potencia instalada superior a 25 kW)**



**Figura 4.12 – Distribuição da classe energética de pequenos edifícios de serviços sem sistemas de climatização (Potencia instalada inferior a 25 kW)**



**Figura 4.13 – Distribuição da classe energética de grandes edifícios de serviços**



### 4.3.2 Avaliação do Desempenho Energético do Parque Edificado

Tendo em consideração que a organização dos dados presentes nas bases de dados se encontra efetuado por década de construção, no decorrer da análise dos dados considerou-se que os edifícios construídos entre 2002-2011 são designados como edifícios novos, enquanto todos os restantes são designados como edifícios existentes.

Após análise dos dados pertencentes à base de dados SCE, foi possível verificar que o maior problema nos edifícios existentes é o valor elevado do coeficiente de transmissão térmico da envolvente opaca, que em termos médios apresenta um valor de  $1.74 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  enquanto os edifícios novos apresentam valores de  $1.1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Constata-se que o valor médio de  $U$  da envolvente opaca dos edifícios existentes é cerca de 58% superior ao dos edifícios novos.

Em termos de taxa de renovação do ar, esta não apresenta grande variação por período de construção, mantendo-se num valor de cerca de 1.0 renovação de ar por hora, o que pode ser considerado um valor elevado.

O coeficiente de transmissão térmica dos envidraçados apresenta um valor médio para os edifícios existentes de  $4.10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , enquanto os edifícios novos apresentam valores de  $3.2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , ou seja, o valor médio de  $U$  dos envidraçados dos edifícios existentes é cerca de 28% superior ao dos edifícios novos.

As necessidades energéticas dos edifícios existentes para aquecimento, água quente sanitária e arrefecimento apresentam um valor médio de 141.0, 79.3 e  $10.0 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$ , respetivamente, enquanto os edifícios novos apresentam valores de 89.5, 38.4 e  $9.7 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$ , ou seja, os valores médios das necessidades dos edifícios existentes é cerca de 58%, 107% e 3%, respetivamente, superiores ao dos edifícios novos.

As necessidades de energia primária dos edifícios existentes apresentam um valor médio de  $15.0 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$ , enquanto os edifícios novos apresentam valores de  $4.9 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$ , ou seja, o valor médio das necessidades de energia primária dos edifícios existentes é cerca de 206% superior ao dos edifícios novos.

Em termos de potência instalada de climatização, verifica-se sempre uma maior potência para aquecimento do que para arrefecimento, como seria espectável face ao clima Português – Clima seco e temperado com verão quente (Peel et al, 2007). No entanto verifica-se que, mesmo considerando que os edifícios existentes apresentem maiores necessidades energéticas, estes possuem menores potências instaladas. Tal significa que a grande maioria do parque edificado não tem a capacidade de assegurar o conforto térmico interior.

Quanto à classificação energética, é possível verificar que esta segue uma distribuição normal com valor médio na classe B- para os edifícios residenciais e pequenos edifícios de serviços com sistemas de climatização e grandes edifícios de serviços. Para os edifícios residenciais sem sistemas de climatização, a distribuição é mais variada mas com maior número de ocorrências para a classe B e C. Relativamente aos edifícios de serviços sem sistemas de climatização, estes estão maioritariamente classificados como G, visto não existirem grandes preocupações com o desempenho energético, apenas interessando o seu licenciamento.

#### 4.4 CAMPANHA DE MEDIÇÕES A EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

De modo a validar a análise efetuada às bases de dados da ADENE, mas também para complementar a mesma com a análise de outros parâmetros considerados pertinentes – por exemplo o desempenho lumínico – foi realizada uma campanha de medições a diferentes edifícios reais.

##### 4.4.1 Identificação das grandezas a caracterizar

A campanha de medições foi realizada em várias localidades desde Braga, Fafe, Guarda, Guimarães, Porto, Maia, Viseu e Lisboa, abrangendo diferentes zonas climáticas e diferentes tipologias de edifícios.

Esta campanha foi considerada como importante para o desenvolvimento do sistema de reabilitação, pois permitiria identificar as reais necessidades de reabilitação do parque habitacional, em termos da qualidade térmica da envolvente.

Assim, com vista a realizar uma campanha de caracterização das patologias energéticas do parque edificado, foi identificada a necessidade de medição dos seguintes parâmetros:

- **Coefficiente de transmissão térmica da envolvente opaca das habitações (U)** - o qual permite quantificar as trocas de calor entre as habitações e o exterior através da sua envolvente opaca;
- **Infiltrações** – número de renovações de ar por hora da habitação, considerando que a habitação apenas possui ventilação natural, por ser a situação mais comum;
- **Pontes térmicas** – identificação de zonas da envolvente das habitações cujas trocas de calor com o exterior são superiores às da zona corrente das habitações;
- **Iluminação** – quantificação das condições de iluminação natural particulares de cada habitação.



De forma resumida, apresenta-se na Tabela 4.1 todos os casos de estudo e respetivos tipos de ensaios realizados no decorrer da campanha de medições.

**Tabela 4.1 – Identificação dos Casos de Estudo**

Caso de Estudo	Localização	Tipo de Edifício	Ensaio Realizados
CS1	Braga	Morada Unifamiliar	A; B; C; D
CS2	Braga	Morada Unifamiliar	B; C
CS3	Fafe	Morada Unifamiliar	A; B; C; D
CS4	Guarda	Morada Unifamiliar	A; B; C; D
CS5	Guimarães	Morada Unifamiliar	A; C
CS6	Guimarães	Morada Unifamiliar	A; C
CS7	Porto	Apartamento	A; B; C
CS8	Porto	Apartamento	A; B; D
CS9	Maia	Apartamento	C
CS10	Viseu	Apartamento	A; B; C; D
CS11	Porto	Morada Unifamiliar	A; B
CS12	Lisboa	Morada Unifamiliar	C

**Legenda:**

- A - Coeficiente de transmissão térmica da envolvente;
- B – Infiltrações;
- C - Identificação de pontes térmicas;
- D – Desempenho Lumínico

#### 4.4.2 Processos de Monitorização

Para a definição dos procedimentos necessários para a medição dos parâmetros referidos anteriormente, foi fundamental o estudo do equipamento disponível no mercado, as metodologias de utilização, assim como as respetivas normas de medição existentes.

Por outro lado, foi considerado pertinente comparar os valores medidos dos diversos parâmetros selecionados com os indicados na Regulamentação Térmica em vigor, permitindo, deste modo, avaliar as condições reais de funcionamento dos edifícios existentes.

##### 4.4.2.1 Coeficiente de Transmissão Térmica da Envolvente (U)

Este é um dos mais importantes indicadores do desempenho energético de uma habitação pois está diretamente relacionado com as trocas de calor entre o espaço climatizado e o exterior.

Para a determinação deste parâmetro foi aplicada a Norma ASTM C1155 – 95 e ASTM C1046 (ASTM, 1995a; ASTM, 1995b), tendo sido necessário medir o fluxo de calor ( $q$ ) através das paredes, assim como a sua temperatura superficial interior ( $T_{is}$ ) e exterior ( $T_{es}$ ) (Figura 4.14).

Com a medição dos dados referidos é possível calcular a resistência térmica global ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ) da envolvente, considerando que o coeficiente de transmissão térmica ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) é o inverso da resistência térmica global. Assim, foram aplicadas as equações 4.1 e 4.2 para o cálculo da resistência térmica global:

$$R_e = \frac{\sum_{k=1}^M \Delta T_i}{\sum_{k=1}^M q_i} \quad (4.1)$$

$$\Delta T_S = T_{is} - T_{es} \quad (4.2)$$

Com:

$M$  – Intervalo de tempo da medição

Este parâmetro pode também ser obtido através da consulta da Nota de Informação Técnica do LNEC ITE 50 (Santos, 2006), e consulta dos valores da condutibilidade térmica ( $W/m \cdot ^\circ C$ ) ou resistência térmica dos diversos materiais, e cálculo da resistência térmica global da envolvente. No entanto, muitas habitações existentes não possuem informação sobre a constituição das paredes ou esta está incorreta.

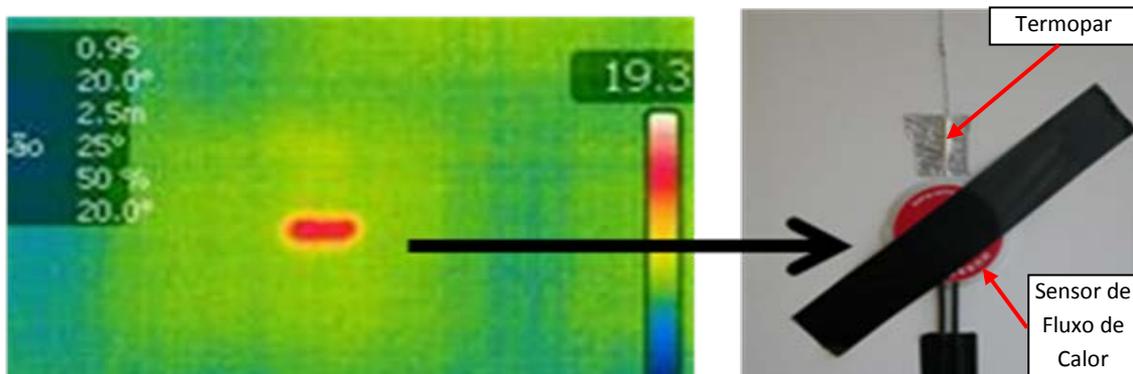


Figura 4.14 – Colocação e identificação dos sensores de fluxo de calor e termopares

#### 4.4.2.2 Infiltrações

Este é, também, um indicador muito importante para a determinação do desempenho energético das habitações, pois permite conhecer as renovações de ar de uma habitação, ou seja, o caudal de ar exterior que penetra na habitação, por hora. Para a sua determinação foi utilizado o equipamento Porta-Ventiladora (Figura 4.15a), o qual pressuriza / despressuriza a habitação, medindo o caudal de ar que entra / sai da habitação enquanto a pressão estabiliza possibilitando, assim, a obtenção das infiltrações de ar na habitação (Minneapolis Blower Door, 2010).



O teste realizado com este equipamento segue a metodologia apresentada na norma ASTM E1827-96 – Standard Test Methods for Determining Airtightness of Building Using a Orifice Blower Door (ASTM, 1996). No entanto, esta apenas consegue apresentar o valor do caudal de renovação da habitação para uma pressão de 50 Pa. Como tal foi aplicada uma expressão desenvolvida por Antretter, *et al* (2007), possibilitando a conversão para a taxa de renovação horária (Q), conforme apresentado na equação 4.3:

$$Q = C(\Delta P)^n \quad (4.3)$$

Com:

Q – renovação do ar por hora (h-1);

C – Coeficiente de fluxo de ar (h-1.Pa-1);

$\Delta P$  – Variação da pressão no exterior durante o ensaio (Pa);

n – Expoente da pressão.

Em termos regulamentares este parâmetro pode ser obtido através da consulta de quadros apresentados no Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios - RCCTE (DL 80/2006), dependendo da rugosidade do terreno, altura ao solo, tipo de caixilharia, entre outros. No entanto, com a utilização deste equipamento conseguem-se obter resultados mais precisos.

#### **4.4.2.3 Identificação de Pontes Térmicas**

As pontes térmicas em edifícios, representam também um fator importante no balanço energético, sendo que a sua identificação é bastante complexa devido à não linearidade do fluxo de calor, como se pode observar na Figura 4.15b. No entanto, no RCCTE pode-se encontrar, para várias situações tipo, uma caracterização das situações mais correntes. Mas, visto que uma parte significativa dos edifícios existentes não possui plantas e cortes necessários para a identificação de pontes térmicas, estas apenas podem ser identificadas através de instrumentos de medição, tal como a câmara termográfica (Figura 4.16).

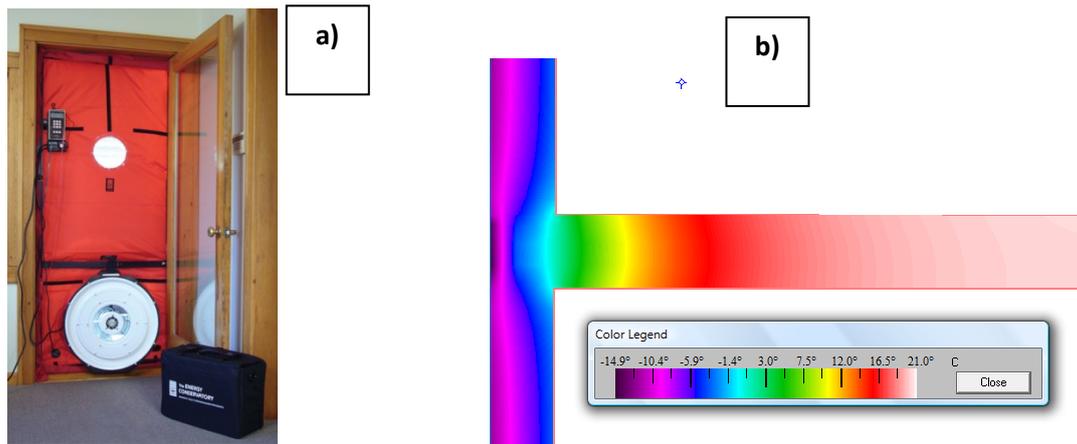


Figura 4.15 – a) Porta-Ventiladora; b) Fluxo de calor na interceção entre parede e laje (cálculos realizados com a ferramenta de simulação – THERM)

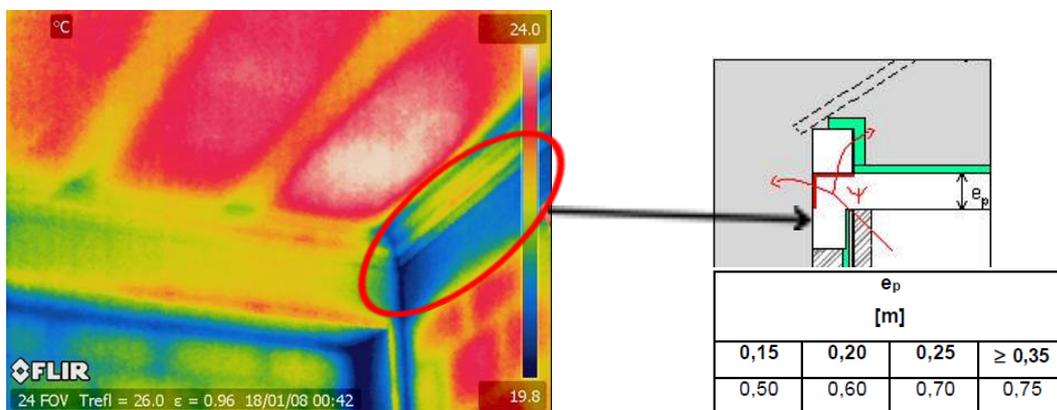


Figura 4.16 – Ponte térmica identificada através de câmara termográfica e respetiva correspondência com o RCCTE.

#### 4.4.2.4 Desempenho Lumínico

A iluminação tem um peso considerável no balanço energético de um edifício apesar de ser um parâmetro normalmente negligenciado (Dubois, 2010; Hanselaer, 2007). No entanto, ultimamente tem-se verificado uma inversão desta tendência da qual as campanhas de substituição de lâmpadas incandescentes pelas fluorescentes são um bom exemplo, conseguindo-se muitas vezes reduzir a fatura elétrica em 50%, bem como as emissões de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (Enkvist, 2007; Bülow-Hübe, 2008; Santamouris, 1998). É por isso relevante fazer um bom aproveitamento da iluminação natural de forma a minimizar a utilização da iluminação artificial e com isso proporcionar um melhor desempenho energético do edifício.

Como tal, durante a campanha de medições experimental, um dos parâmetros utilizado para a verificação do aproveitamento da luz natural foi o Fator de Luz do Dia (FLD) (European Commission, 1999) que pode ser definido como a razão entre a iluminância de um certo ponto do espaço interior, num plano de trabalho horizontal, e a iluminância proveniente do exterior,



para um céu encoberto padrão (EN1264, 2002; Rae, 2000). Alguns valores recomendados para este parâmetro são apresentados na tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Valor de FLD recomendado para tipo de espaço**

Espaço	FLD (%)	
	Médio	Mínimo
Igreja	5	1
Escritório	5	2.2
Sala de aula	5	2
Sala de estar	1.5	0.5
Quarto de dormir	1	0.3
Cozinha	2	0.6

Fonte: A Green Vitruvius (European Commission, 1999).

#### 4.4.3 Casos de Estudo Monitorizados

A campanha de medições a edifícios residenciais abarcou um elevado número de medições realizadas ao longo de dois anos, monitorizando detalhadamente os parâmetros selecionados, com vista a caracterizar a envolvente dos edifícios e testar o desempenho energético dos mesmos.

Seguidamente vão ser apresentados todos os casos de estudo, remetendo-se para o Anexo II.1 a apresentação dos gráficos contendo os dados obtidos no decorrer da campanha de medições em cada caso de estudo.

##### 4.4.3.1 CS1 – Edifício Unifamiliar em Braga

O primeiro caso de estudo foi uma moradia unifamiliar isolada com dois pisos, em Braga, construída em 1982, com as seguintes características da envolvente (Figura 4.17):

- \_Paredes de Fachada: parede dupla de alvenaria de tijolo (11 + 15 cm) com isolamento de 2 cm (XPS – Poliestireno expandido extrudido) na caixa-de-ar;
- \_Cobertura: inclinada;
- \_Envidraçados: Caixilharia de madeira simples, com vidro simples;
- \_Sistema de climatização: radiadores elétricos;
- \_Ventilação: natural;
- \_Orientação da fachada principal: Nordeste.

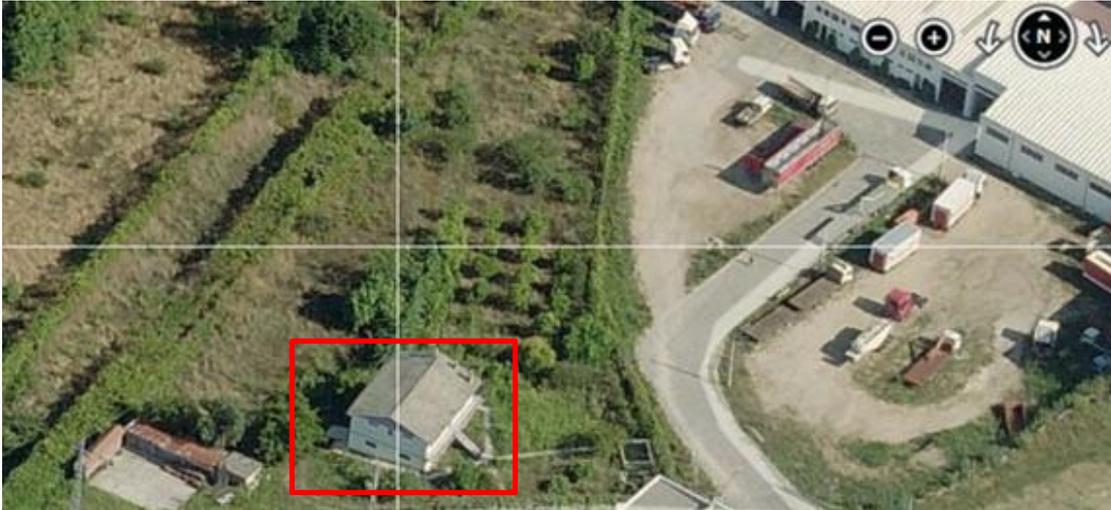


Figura 4.17 – Vista aérea do edifício CS1. Fonte: Bing Maps

#### 4.4.3.2 CS2 – Edifício Unifamiliar em Braga (Aldeia de Leste)

O segundo caso de estudo foi uma moradia unifamiliar isolada com um piso, em Braga, construída em 1971, com as seguintes características da envolvente (Figura 4.18):

- \_Paredes de Fachada: parede simples de alvenaria bloco de betão (25 cm);
- \_Cobertura: inclinada;
- \_Envidraçados: Caixilharia de alumínio, com vidro simples;
- \_Sistema de climatização: aquecimento central com radiadores a combustível líquido;
- \_Ventilação: natural;
- \_Orientação da fachada principal: Este.

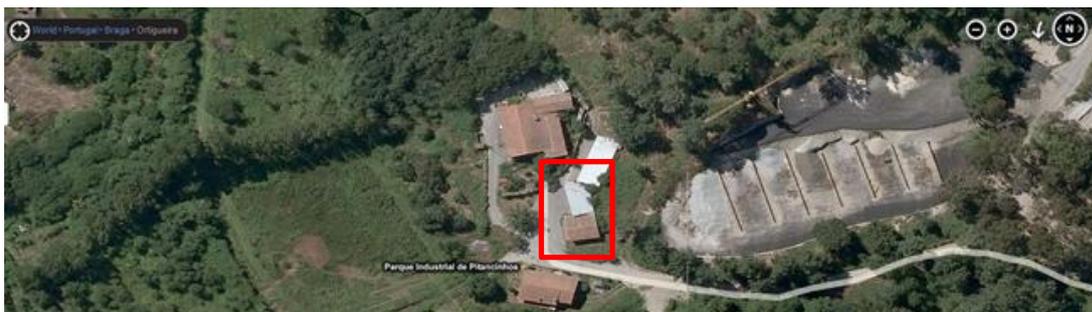


Figura 4.18 – Vista aérea do edifício CS2. Fonte: Bing Maps

#### 4.4.2.3 CS3 – Edifício Unifamiliar em Fafe

O terceiro caso de estudo foi uma moradia unifamiliar isolada com três pisos, em Fafe, construída em 1983, com as seguintes características da envolvente (Figura 4.19):

- \_Paredes de Fachada: parede dupla de alvenaria de blocos de betão e tijolo (20 + 7 cm);



- \_ Cobertura: inclinada;
- \_ Envidraçados: Caixilharia de alumínio, com vidro duplo;
- \_ Sistema de climatização: radiadores elétricos;
- \_ Ventilação: natural;
- \_ Orientação da fachada principal: Sudoeste;

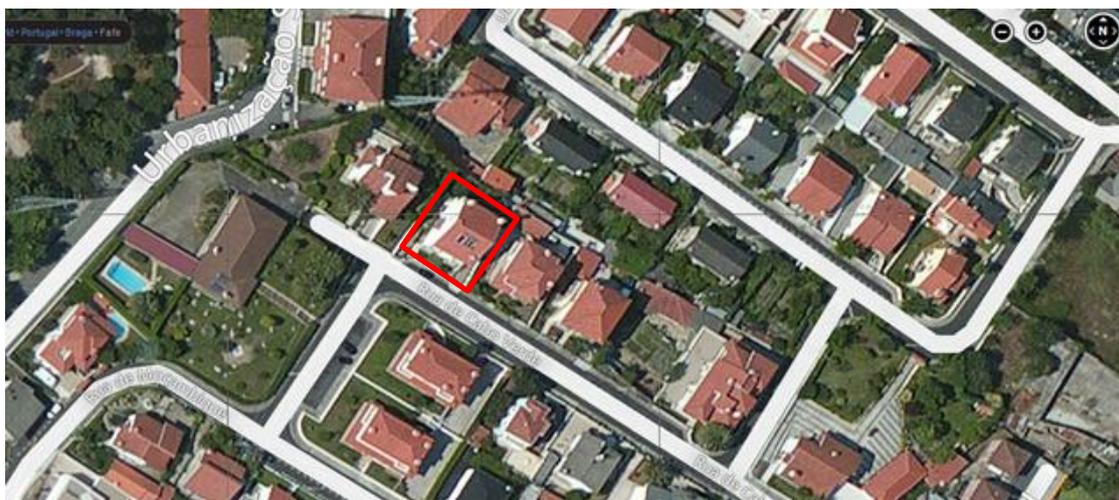


Figura 4.19 – Vista aérea do edifício CS3. Fonte: Bing Maps

#### **4.4.3.4 CS4 – Edifício Unifamiliar na Guarda**

O quarto caso de estudo foi uma moradia unifamiliar isolada com três pisos, na Guarda, construída em 1983, no entanto foi sujeita a uma intervenção de reabilitação em 1996, consistindo na aplicação de isolamento térmico na caixa-de-ar das paredes de fachada.

Este edifício apresenta as seguintes características da envolvente (Figura 4.20):

- \_ Paredes de Fachada: parede dupla de alvenaria de tijolo (11 + 15 cm) com isolamento de 4 cm (PUR – Poliuretano expandido) injetado na caixa-de-ar;
- \_ Cobertura: inclinada;
- \_ Envidraçados: Caixilharia de alumínio simples, com vidro simples;
- \_ Sistema de climatização: radiadores elétricos;
- \_ Ventilação: natural;
- \_ Orientação da fachada principal: Este.



Figura 4.20 – Vista aérea do edifício CS4. Fonte: Bing Maps

#### 4.4.3.5 CS5 – Edifício Multifamiliar em Guimarães

O quinto caso de estudo foi um edifício multifamiliar com seis pisos, em Guimarães, construído em 1995, com as seguintes características da envolvente (Figura 4.21):

- \_Paredes de Fachada: parede dupla de alvenaria de tijolo (11 + 15 cm) com isolamento de 4 cm (XPS – Poliestireno expandido extrudido) na caixa-de-ar;
- \_Cobertura: horizontal;
- \_Envidraçados: Caixilharia de alumínio simples, com vidro duplo;
- \_Sistema de climatização: radiadores elétricos;
- \_Ventilação: natural;
- \_Orientação da fachada principal: Oeste.



Figura 4.21 – Vista aérea do edifício CS5. Fonte: Bing Maps

#### 4.4.3.6 CS6 – Edifício Unifamiliar em Guimarães

O sexto caso de estudo foi uma moradia unifamiliar com dois pisos, em Guimarães, construída em 1967, no entanto foi sujeita a uma intervenção de reabilitação em 2002, consistindo na



aplicação de isolamento térmico na caixa-de-ar das paredes de fachada, substituição dos envidraçados simples por vidro duplo e instalação de um novo sistema de climatização.

Este edifício apresenta as seguintes características da envolvente (Figura 4.22):

- \_Paredes de Fachada: parede dupla de alvenaria de pedra e tijolo (15 + 11 cm) com isolamento 4 cm (PUR – Poliuretano expandido) injetado na caixa-de-ar;
- \_Cobertura: inclinada;
- \_Envidraçados: Caixilharia de alumínio simples, com vidro duplo;
- \_Sistema de climatização: radiadores + caldeira a gás;
- \_Ventilação: natural;
- \_Orientação da fachada principal: Sul.

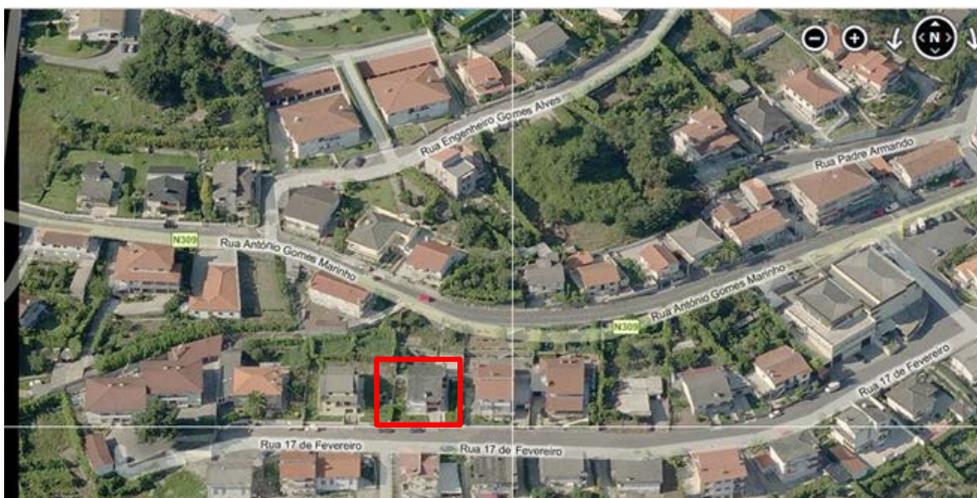


Figura 4.22 – Vista aérea do edifício CS6. Fonte: Bing Maps

#### 4.4.3.7 CS7 – Edifício Multifamiliar no Porto

O sétimo caso de estudo foi um edifício multifamiliar com quatro pisos, no Porto, construído em 1952, com as seguintes características da envolvente (Figura 4.23):

- \_Paredes de Fachada: parede dupla de alvenaria de pedra e tijolo (25 + 11 cm) sem isolamento;
- \_Cobertura: inclinada;
- \_Envidraçados: Caixilharia de madeira simples, com vidro simples;
- \_Sistema de climatização: radiadores elétricos;
- \_Ventilação: natural;
- \_Orientação da fachada principal: Este.



Figura 4.23 – Vista aérea do edifício CS7. Fonte: Bing Maps

#### 4.4.3.8 CS8 – Edifício Multifamiliar no Porto

O oitavo caso de estudo foi um edifício multifamiliar com seis pisos, no Porto, construído em 1989, com as seguintes características da envolvente (Figura 4.24):

- \_Paredes de Fachada: parede dupla de alvenaria de tijolo (15 + 11 cm) sem isolamento;
- \_Cobertura: inclinada;
- \_Envidraçados: Caixilharia de alumínio dupla, com vidro simples;
- \_Sistema de climatização: radiadores elétricos;
- \_Ventilação: natural;
- \_Orientação da fachada principal: Oeste.



Figura 4.24 – Vista aérea do edifício CS8. Fonte: Bing Maps

#### 4.4.3.9 CS9 – Edifício Multifamiliar no Porto

O nono caso de estudo foi um edifício multifamiliar com seis pisos, no Porto, construído em 2007, com as seguintes características da envolvente (Figura 4.25):

- \_Paredes de Fachada: parede dupla de alvenaria de tijolo (15 + 11 cm) com isolamento de 6 cm (XPS – Poliestireno expandido extrudido) na caixa-de-ar;
- \_Cobertura: horizontal;



- \_Envidraçados: Caixilharia de alumínio simples, com vidro duplo;
- \_Sistema de climatização: radiadores + Caldeira a Gás
- \_Orientação da fachada principal: Norte.



Figura 4.25 – Vista aérea do edifício CS9. Fonte: Bing Maps

#### 4.4.3.10 CS10 – Edifício Multifamiliar em Viseu

O décimo caso de estudo foi um edifício multifamiliar com oito pisos, em Viseu, construído em 1995, com as seguintes características da envolvente (Figura 4.26):

- \_Paredes de Fachada: parede dupla de alvenaria de tijolo (11 + 15 cm) com isolamento de 2 cm (XPS – Poliestireno expandido extrudido) na caixa-de-ar;
- \_Cobertura: inclinada;
- \_Envidraçados: Caixilharia de alumínio simples, com vidro duplo;
- \_Sistema de climatização: radiadores elétricos;
- \_Ventilação: natural;
- \_Orientação da fachada principal: Oeste.



Figura 4.26 – Vista aérea do edifício CS10. Fonte: Bing Maps

#### 4.4.3.11 CS11 – Edifício Unifamiliar no Porto

O décimo primeiro caso de estudo foi um edifício unifamiliar com três pisos, no Porto, construído em 1965, com as seguintes características da envolvente (Figura 4.27):

- \_Paredes de Fachada: parede dupla de alvenaria de pedra e tijolo (20 + 15 cm) sem isolamento;
- \_Cobertura: inclinada;
- \_Envidraçados: Caixilharia de madeira, com vidro simples;
- \_Sistema de climatização: radiadores elétricos;
- \_Ventilação: natural;
- \_Orientação da fachada principal: Oeste.



Figura 4.27 – Vista aérea do edifício CS11. Fonte: Bing Maps

#### 4.2.3.12 CS12 – Edifício Unifamiliar em Lisboa

O décimo segundo caso de estudo foi um edifício unifamiliar com dois pisos, em Lisboa, construído em 2010, com as seguintes características da envolvente (Figura 4.28):

- \_Paredes de Fachada: parede dupla de alvenaria de tijolo (11 + 15 cm) com isolamento de 3 cm (XPS – Poliestireno expandido extrudido) na caixa-de-ar;
- \_Cobertura: horizontal;
- \_Envidraçados: Caixilharia de alumínio simples, com vidro duplo;
- \_Sistema de climatização: pavimento radiante elétrico;
- \_Ventilação: natural;
- \_Orientação da fachada principal: Oeste.



Figura 4.28 – Vista aérea do edifício CS12. Fonte: Bing Maps

#### 4.4.4 Resumo dos Resultados

Para uma apresentação mais inteligível dos resultados da campanha de medições efetuada ao parque habitacional, estes foram agrupados em tabelas e suportados pela apresentação em forma gráfica – Figuras 4.29 a 4.32.

Adicionalmente, apresenta-se uma tabela resumindo as principais características dos edifícios estudados (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Resumo das principais características dos edifícios estudados

Ref.	Edifícios Unifamiliares						Edifícios Multifamiliares					
	Local	Ano	Zona Climática	Envolvente opaca		Envidraçados	Local	Ano	Zona Climática	Envolvente opaca		Envidraçados
				Parede	Isol.					Parede	Isol.	
CS1	Braga	1982	I2-V2	Dupla tijolo 11+15 cm	XPS 2cm	Madeira Vidro Simples	-	-	-	-	-	-
CS2	Braga	1971	I2-V2	Bloco betão 25cm	Sem	Alumínio Vidro Simples	-	-	-	-	-	-
CS3	Fafe	1983	I2-V2	Dupla bloco betão 25cm + tijolo 7cm	Sem	Alumínio Vidro Duplo	-	-	-	-	-	-
CS4	Guarda	1996	I3-V1	Dupla tijolo 11+15 cm	PUR 4cm	Alumínio Vidro Simples	-	-	-	-	-	-

Tabela 4.3 – Resumo das principais características dos edifícios estudados (cont.)

Ref.	Edifícios Unifamiliares						Edifícios Multifamiliares					
	Local	Ano	Zona Climática	Envolvente opaca		Envidraçados	Local	Ano	Zona Climática	Envolvente opaca		Envidraçados
				Parede	Isol.					Parede	Isol.	
CS5	-	-	-	-	-	-	Guimarães	1995	I2-V2	Dupla tijolo 11+15 cm	XPS 4cm	Alumínio Vidro Duplo
CS6	Guimarães	2002	I2-V2	Dupla tijolo 11+15 cm	PUR 4cm	Alumínio Vidro Duplo	-	-	-	-	-	-
CS7	-	-	-	-	-	-	Porto	1952	I2-V1	Dupla Pedra 25cm + tijolo 11cm	Sem	Madeira Vidro Simples
CS8	-	-	-	-	-	-	Porto	1989	I2-V1	Dupla tijolo 11+15 cm	Sem	Alumínio dupla Vidro Simples
CS9	-	-	-	-	-	-	Porto	2007	I2-V1	Dupla tijolo 11+15 cm	XPS 6cm	Alumínio Vidro Duplo
CS10	-	-	-	-	-	-	Viseu	1995	I2-V2	Dupla tijolo 11+15 cm	XPS 2cm	Alumínio Vidro Duplo
CS11	Porto	1965	I2-V1	Dupla Pedra 20cm + tijolo 11cm	Sem	Madeira Vidro Simples	-	-	-	-	-	-
CS12	Lisboa	2010	I1-V2	Dupla tijolo 11+15 cm	XPS 3cm	Alumínio Vidro Duplo	-	-	-	-	-	-



#### 4.4.4.1 Coeficiente de Transmissão Térmica

A medição dos coeficientes de transmissão térmica da envolvente opaca dos edifícios estudados teve dois objetivos distintos:

- 1) Verificar a qualidade térmica da envolvente opaca e comparar os valores obtidos com os valores regulamentares;
- 2) Verificar a adequação da metodologia prevista no ITE 50 para estimar o coeficiente de transmissão térmica.

Através da campanha de medições efetuada foi possível medir o valor do coeficiente de transmissão térmica da envolvente opaca para 9 casos de estudo, assim como calcular o mesmo através da metodologia presente no ITE 50 e comparar esses valores com os valores regulamentares de referência ( $U_{ref}$ ). Estes valores são apresentados na Tabela 4.4 e Figura 4.29.

Tabela 4.4 – Valor de U medido, estimado e de referência para os casos de estudo da campanha de medições

Caso de Estudo	Coeficiente de Transmissão Térmica ( $W/m^2 \cdot ^\circ K$ )		
	Medido	Estimado (ITE 50)	Valor de Referência $U_{ref}$ (RCCTE)
CS1	0.87	0.71	0.60
CS3	1.25	1.11	0.50
CS4	0.65	0.62	0.50
CS5	1.45	0.63	0.60
CS6	0.43	0.67	0.60
CS7	1.12	1.07	0.60
CS8	1.14	0.96	0.60
CS10	0.81	0.96	0.60
CS11	1.16	1.20	0.60
<b>Média</b>	0.97	0.88	0.58

Com os resultados obtidos no decorrer da campanha de medições é possível observar que os valores para o coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) da envolvente opaca dos edifícios são consistentemente superiores aos valores de referência apresentados na regulamentação em vigor – RCCTE.

Adicionalmente verifica-se que os valores médios medidos ( $0.97 W/m^2 \cdot ^\circ K$ ) são superiores aos valores previstos utilizando a metodologia indicada pelo ITE 50 ( $0.88 W/m^2 \cdot ^\circ K$ ), enquanto a variação entre os valores medidos e estimados é aceitável, obtendo-se uma variação média de 17%.

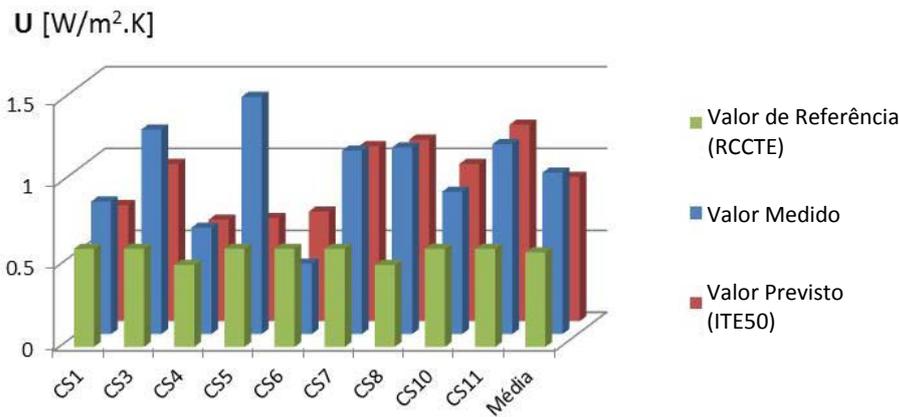


Figura 4.29 – Resultados obtidos da medição do coeficiente de transmissão térmica (U) da envolvente opaca

#### 4.4.4.2 Infiltrações

A campanha de medições da taxa de renovação do ar (RPH) dos edifícios teve dois objetivos distintos:

- 1) Verificar a qualidade térmica da envolvente opaca dos edifícios e comparar com os valores regulamentares;
- 2) Verificar a adequação da metodologia prevista no RCCTE para estimar a taxa de renovação do ar.

Através da campanha de medições foi possível medir o valor da taxa de renovação do ar para 7 casos de estudo, assim como calcular a mesma através da metodologia presente no RCCTE e ainda comparar esses valores com o valor mínimo regulamentar para este parâmetro. Estes valores são apresentados na Tabela 4.5 e Figura 4.30.

Tabela 4.5 – Valor da taxa de renovação do ar medido, estimado e valor mínimo para os casos de estudo da campanha de medições

Caso de Estudo	Taxa de Renovação do ar (RPH)		
	Medido	Estimado (RCCTE)	Valor mínimo (RCCTE)
CS1	0.86	1.10	0.60
CS2	1.00	1.05	0.60
CS3 – 1º Andar	1.20	1.00	0.60
CS3 – 2º Andar	0.96	1.00	0.60
CS4	1.13	1.00	0.60
CS7	0.73	0.95	0.60
CS10	0.90	1.00	0.60
CS11	1.16	0.95	0.60
<b>Média</b>	<b>0.99</b>	<b>1.01</b>	<b>0.60</b>

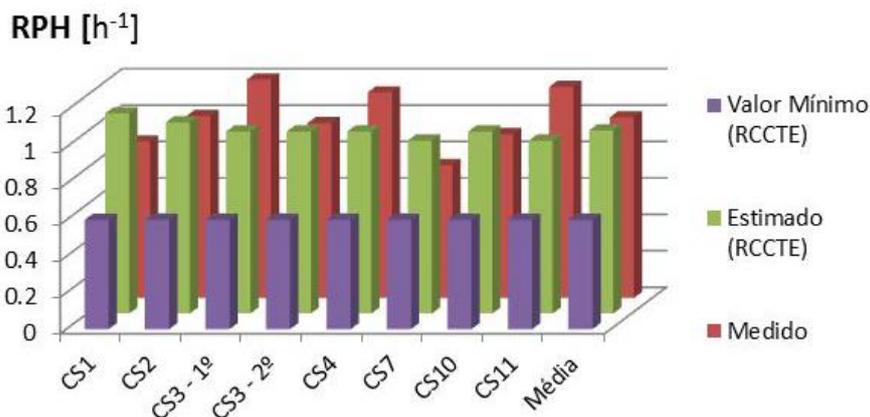


Figura 4.30 – Resultados obtidos na medição da taxa de renovação do ar das habitações

Com os resultados obtidos no decorrer da campanha de medições é possível observar que os valores medidos para as infiltrações de ar pela envolvente dos edifícios (0.99 RPH) são consistentemente superiores ao valor mínimo recomendado pela regulamentação em vigor – RCCTE (0.6 RPH), com vista a possibilitar uma maior eficiência energética. No entanto, neste ponto é necessário uma adequada ponderação entre a eficiência energética – menores infiltrações – e uma adequada qualidade do ar interior – maiores infiltrações.

Foi ainda verificado que os valores médios medidos (0.99 RPH) são ligeiramente inferiores aos valores previstos utilizando a metodologia indicada pelo RCCTE (1.01 RPH), enquanto a variação entre os valores medidos e estimados é aceitável, obtendo-se uma variação média de 14%.

#### 4.4.4.3 Pontes Térmicas

Através da utilização de uma câmara de infravermelhos e das respetivas imagens termográficas da envolvente exterior e interior dos diferentes casos de estudo, foi possível identificar a localização e importância das diferentes pontes térmicas existentes.

A Figura 4.31 apresenta um resumo das imagens obtidas no decorrer da campanha de medições nos edifícios de habitação.

Caso de Estudo	Imagem Termográfica pelo Exterior	Imagem Termográfica pelo Interior
CS1		

Caso de Estudo	Imagem Termográfica pelo Exterior	Imagem Termográfica pelo Interior
CS3		
CS4		
CS5		
CS6		



Caso de Estudo	Imagem Termográfica pelo Exterior	Imagem Termográfica pelo Interior
CS7	-	
CS10		
CS12		

Figura 4.31 – Imagens termográficas das habitações em estudo

As elações a tirar das imagens termográficas são as seguintes:

- CS1 – As zona com maiores trocas térmicas são os envidraçados. Identificada ponte térmica na laje de cobertura ao longo das vigas, com uma variação de 1°C relativamente à zona corrente;
- CS3 – As zona com maiores trocas térmicas são os envidraçados, com variações de 2.5°C relativamente à envolvente exterior contígua;
- CS4 – Identificada ponte térmica na ligação entre a fachada e as lajes de cobertura e pavimento, assim como uma ponte térmica grave na zona da caixa de estore, com uma variação até cerca de 3°C relativamente à zona corrente;

- CS5 – Identificada ponte térmica na ligação entre duas paredes exteriores, com uma variação até cerca de 3°C relativamente à zona corrente;
- CS6 – Identificada ponte térmica na ligação entre a fachada e as lajes de cobertura e pavimento, com uma variação até cerca de 2°C relativamente à zona corrente;
- CS7 – Identificada ponte térmica grave na zona da caixa de estore, com uma variação até cerca de 3°C relativamente à zona corrente;
- CS10 – As zona com maiores trocas térmicas são os envidraçados. Identificada ponte térmica na laje de cobertura ao longo das vigas, com uma variação de 4.1°C relativamente à zona corrente;
- CS12 - verifica-se que existiu o cuidado de tratar as pontes térmicas, pois foi possível observar que as zonas de pilar estão, aproximadamente, à mesma temperatura que a zona corrente;

#### 4.4.4.4 Desempenho lumínico

A campanha de medições para medição do desempenho lumínico dos edifícios teve como objetivo verificar a qualidade da iluminação natural dos edifícios.

Através da campanha de medições foi possível avaliar a qualidade da iluminação natural, através do índice FLD – Fator Luz-Dia, para 5 casos de estudo e comparação dos mesmos com os valores recomendados por Santos (2002) para este parâmetro. Estes valores são apresentados na Tabela 4.6 e Figura 4.32.

Tabela 4.6 – Valor do fator luz-dia medido e recomendado para os casos de estudo da campanha de medições

Caso de Estudo	Fator Luz-Dia (FLD - %)		
	Medido 1*	Medido 2*	Recomendado
CS1 - Cozinha	-	1.1	2.0
CS3 – Sala de estar	0.4	1.5	1.5
CS4 – Sala de estar	0.3	1.0	1.5
CS8 - Sala de estar	0.5	1.3	1.5
CS8 - Quarto	1.6	2.4	1.0
CS10 - Quarto	2.0	2.7	1.0
<b>Média</b>	<b>1.0</b>	<b>1.7</b>	<b>1.4</b>



### FLD (%)

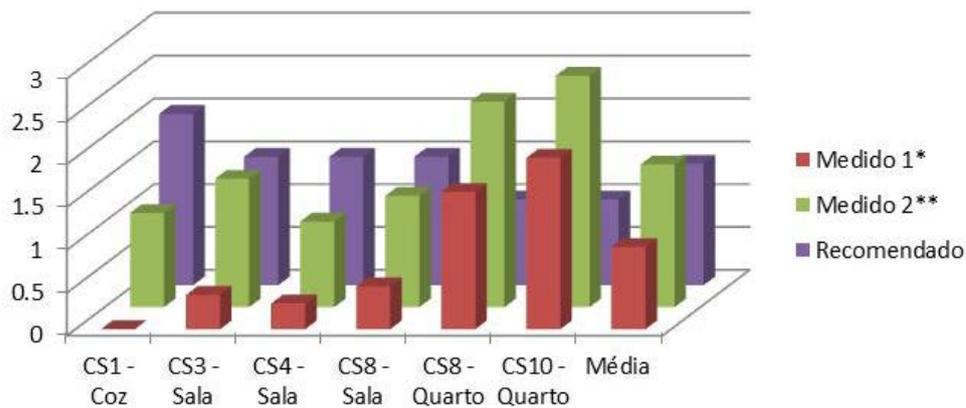


Figura 4.32 – Resultados obtidos na medição do nível de iluminação natural das habitações

#### Legenda:

\* Medições em condições normais de utilização - para este caso foi pedido aos ocupantes que ativassem os dispositivos de sombreamento conforme o habitual;

\*\* Medições em condições otimizadas de utilização - para esta situação foram desativados todos os dispositivos de sombreamento

Em termos de iluminação natural, a campanha de medições confirmou que a maioria das habitações possui um bom desempenho lumínico, apresentando valores de FLD (1.67%) superiores aos recomendados (1.42%), quando todos os dispositivos de sombreamento se encontram desativados.

Estes valores foram obtidos mesmo considerando que as condições de medição utilizadas foram o céu enublado padrão (EN12464, 2002; Rae, 2000), condições que, em Portugal, são excedidas em cerca de 90% do tempo no decorrer de um ano (Santos, 2002).

## 4.5 COMPARAÇÃO ENTRE BASES DE DADOS – SCE – E CAMPANHAS DE MEDIÇÃO

Para comparar os valores que constam das bases de dados SCE com os valores obtidos nas campanhas de medição realizadas, os casos de estudo foram organizados de acordo com o seu período de construção e agrupados conforme os dados apresentados nas bases de dados SCE, tendo sido possível fazer uma comparação direta para o coeficiente de transmissão térmica e para a taxa de renovação do ar.

### 4.5.1 Coeficiente de Transmissão Térmica (U)

Para a comparação dos valores do coeficiente de transmissão térmica medidos e presentes nas bases de dados, foi calculado o valor médio deste parâmetro para cada período de construção, conforme indicado nas bases de dados SCE. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7 – Valor de U para os casos de estudo da campanha de medições e Bases de Dados SCE**

Período de Construção	Caso de Estudo	Nº Edifícios	U <sub>médio</sub> (Medido) [W/m <sup>2</sup> .K]	U <sub>médio</sub> (Bases de Dados) [W/m <sup>2</sup> .K]
Antes 1919	-	0	-	2.0
1919 - 1945	-	0	-	2.1
1946 - 1960	CS7	1	1.1	2.0
1961 - 1970	CS11	1	1.2	1.6
1971 - 1980	CS2	1	-	1.8
1981 - 1985	CS1 + CS3	2	1.1	1.9
1986 - 1990	CS8	1	1.1	1.6
1991 - 1995	CS5 + CS10	2	1.1	1.5
1996 - 2001	CS4	1	0.7	1.6
2002 - 2011	CS9 + CS12 +	2	0.4	1.1
<b>Média</b>	-	-	1.0	1.7

De uma forma geral é possível observar que os valores para o coeficiente de transmissão térmica presentes nas bases de dados SCE são superiores aos medidos aquando da campanha de medições, com uma variação média superior a 40% entre os valores, a qual não representa um bom grau de aproximação.

#### 4.5.2 Taxa de Renovação do Ar (RPH)

Para a comparação dos valores da taxa de renovação do ar medida e os presentes nas bases de dados, foi calculado o valor médio deste parâmetro para cada período de construção, conforme indicado nas bases de dados SCE. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8 – Valor de infiltrações para os casos de estudo da campanha de medições e Bases de Dados SCE**

Período de Construção	Caso de Estudo	Nº Edifícios	RPH (medido) [h <sup>-1</sup> ]	RPH (Bases de Dados) [h <sup>-1</sup> ]
Antes 1919	-	0	-	0.8
1919 - 1945	-	0	-	0.8
1946 - 1960	CS7	1	1.2	0.9
1961 - 1970	CS6 + CS11	2	1.5	1.0
1971 - 1980	CS2	1	1.8	1.0
1981 - 1985	CS1 + CS3 + CS4	3	1.2	1.0
1986 - 1990	CS8	1	-	1.0
1991 - 1995	CS5 + CS10	2	0.8	1.1
1996 - 2001	-	0	-	1.0
2002 - 2011	CS9 + CS12	2	-	1.0
<b>Média</b>	-	-	1.3	1.0



De uma forma geral é possível observar que os valores das taxas de renovação do ar presentes nas bases de dados SCE são inferiores aos medidos aquando das campanhas de medição, com uma variação de 27% entre os valores.

#### 4.6 CONCLUSÕES

Através do tratamento dos dados disponíveis nas bases de dados da ADENE, complementados com as campanhas de medição, foi possível ter uma noção das características do parque construído e avaliar as características mais adequadas a atribuir às soluções de reabilitação.

Comparando os resultados obtidos com as campanhas de medição e os valores das bases de dados SCE, é possível verificar uma boa aproximação para os valores da taxa de renovação do ar. No entanto, para o coeficiente de transmissão térmica, os valores medidos são, de uma forma geral, mais baixos que os apresentados nas bases de dados.

Através da análise da base de dados SCE e campanhas de medição, foi possível confirmar que o parque habitacional existente tem um grande potencial de aplicação de medidas de reabilitação, especificamente na redução em, pelo menos, cerca de 50% do valor do coeficiente de transmissão térmica da envolvente, assim como uma redução de 45% da taxa de renovação do ar. Relativamente às condições de iluminação natural, os edifícios já apresentam um desempenho razoável, onde, em média, os valores do FLD são cerca de 32% superiores aos valores recomendados em condições otimizadas de utilização.

Adicionalmente, as imagens termográficas mostram um número muito significativo de pontos críticos da envolvente opaca – Pontes Térmicas – os quais necessitam de especial atenção e correção de modo a reduzir as perdas / ganhos de calor através da envolvente.

Como tal, verifica-se que o parque edificado apresenta um baixo desempenho energético, especificamente considerando as características térmicas da envolvente opaca, transparente e a taxa de renovação do ar, sendo assim necessário que os sistemas de reabilitação a desenvolver possam apresentar soluções para mitigar os problemas encontrados, em especial atentando à integração de equipamentos e/ou estratégias que assegurem o conforto térmico e a qualidade do ar interior.



**CAPÍTULO 5 – Propostas de Soluções de Reabilitação Inovadoras**

*"De erro em erro, vai-se descobrindo toda a verdade." - Sigmund Freud, Psicanalista. Áustria, 1856 // 1939*



## 5.1 INTRODUÇÃO

O ponto de partida para o desenvolvimento de soluções inovadoras com vista à reabilitação energética foi o cumprimento dos requisitos impostos pelo projeto IEA ECBCS Annex 50 e o respetivo projeto enquadrador para a realidade nacional Portuguesa – Projeto FCT – Reabilitação Energética de Edifícios.

Relativamente ao projeto IEA ECBCS Annex 50, os requisitos a considerar eram (Zimmerman, 2006a):

- Os edifícios alvo são edifícios multifamiliares de habitação (considerando que estes representam aproximadamente 40% do parque edificado Europeu);
- As necessidades de energia primária devem ser minimizadas e devem situar-se no intervalo de 30-50 kWh/m<sup>2</sup>.ano, tendo em conta as necessidades energéticas para o aquecimento, o arrefecimento e a água quente sanitária, por área bruta;
- O aproveitamento da energia solar deve ser considerado no edifício e otimizada a sua utilização;
- O nível de conforto deve ser aumentado, através da reorganização dos espaços interiores, assim como com o aumento da área útil de pavimento;
- O nível de conforto térmico e acústico, boa qualidade do ar interior e as condições de iluminação natural, devem ser assegurados;
- Um processo de construção rápida, de alta qualidade e elevada relação custo-benefício, deve ser assegurado;
- Um conceito de renovação inovador para todo o edifício, deve ser desenvolvido e demonstrado, para apartamentos típicos baseado em (Figura 5.1):
  - Sistemas prefabricados para cobertura, com sistemas de distribuição integrados para aquecimento, água quente e sistemas solares;
  - Sistemas prefabricados para fachadas, altamente isolados, com sistemas de distribuição integrados para aquecimento, arrefecimento e ventilação.

No entanto, ao ser adaptado para a realidade nacional, alguns dos requisitos mencionados foram alterados – tais como os edifícios alvo, os sistemas prefabricados para cobertura, etc. – de forma a potenciar a implementação das soluções no mercado de reabilitação Português. Assim, os requisitos finais a considerar para o desenvolvimento das soluções foram:

- O grupo alvo principal são edifícios multifamiliares e unifamiliares de habitação;
- As necessidades de energia primária devem ser minimizadas e devem situar-se no intervalo de 30-50 kWh/m<sup>2</sup>.ano, tendo em conta as necessidades energéticas para o aquecimento, o arrefecimento e a água quente sanitária, por área bruta;
- O conforto térmico das habitações deve ser assegurado;
- Um processo de construção rápida, de alta qualidade e elevada relação custo-benefício, deve ser assegurado;
- Um conceito de renovação inovador para todo o edifício, deve ser desenvolvido e demonstrado, para apartamentos/moradias típicos baseados em:
  - Sistemas prefabricados para fachadas, altamente isolados, com sistemas de distribuição integrados para aquecimento, arrefecimento e ventilação.

A integração dos sistemas de distribuição pelo interior da solução (condutas, tubagens, outras cablagens) tem dois principais propósitos. Por um lado facilitar a introdução das novas infraestruturas necessárias para os padrões atuais de uma forma oculta, por outro evitar as trocas térmicas nas redes de transporte do fluido de trabalho entre a fonte térmica e as unidades terminais de climatização.

## 5.2 CONCEITO BASE

Objetivo das soluções a desenvolver foi de dotar os edifícios existentes com eficiência energética e conforto próximos dos edifícios novos de baixo consumo; aumentar a qualidade da construção; otimizar os custos; diminuir o tempo de intervenção com o mínimo de distúrbios para os moradores.

Assim, a solução de reabilitação deve contribuir para a eficiência energética do edifício a reabilitar através do aumento do nível de isolamento dos elementos construtivos, do tratamento de pontes térmicas e da melhoria das condições de ventilação.

Duas diferentes abordagens para a criação das soluções inovadoras foram propostas:

- Uma solução totalmente prefabricada, com módulos que envolvem toda a fachada do apartamento a reabilitar;
- Uma solução semi-prefabricada, com módulos prefabricados concentrados na zona dos envidraçados, área onde se concentram mais pormenores de construção.

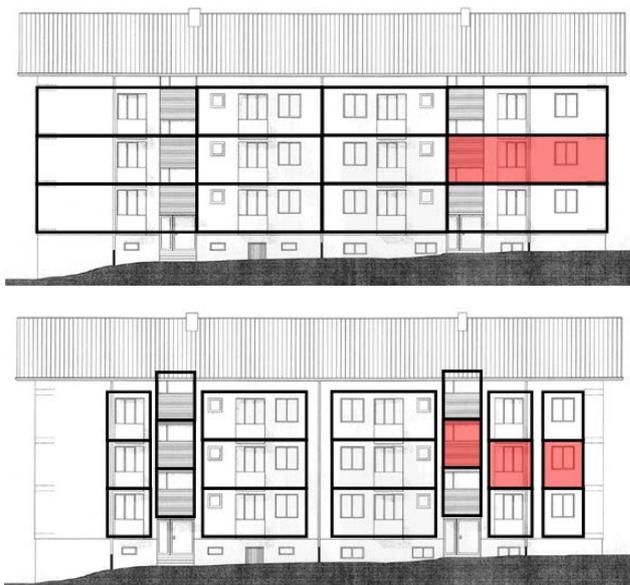


Figura 5.1 – Solução prefabricada e solução semi-prefabricada

Os tipos de soluções base a seguir para o desenvolvimento das soluções prefabricadas para a reabilitação das fachadas dos edifícios são:

- **Solução F1 - Fachada compacta** - O isolamento da fachada compacta baseia-se num isolamento convencional com poliestireno ou lã mineral e revestimento delgado armado. Este sistema apresenta potencialidade para ser totalmente prefabricado, envolvendo toda a fachada a reabilitar (Figura 5.2);
- **Solução F2 - Fachada Ventilada** - O isolamento da fachada ventilada consiste num isolamento de lã mineral e um revestimento ventilado, fixado através de um sistema de montagem. Para esta solução apenas a montagem e o sistema de revestimento são prefabricados (Figura 5.3);
- **Solução F3 - Módulo de fachada prefabricado** - composto por isolamento em lã mineral, em espuma ou vácuo e estrutura de suporte. Sistema com revestimento ventilado. Todo o sistema é prefabricado, incluindo a colocação prévia de janelas e sistema de tubagens (Figura 5.4);
- **Solução F4 - Módulo para ampliação de um espaço** - trata-se de uma construção de fachada leve e prefabricada, adequada para a integração de varandas (Figura 5.5).

Todos os módulos anteriormente apresentados devem permitir a aplicação de condutas, tubagens ou outras cablagens (eletricidade, fibra ótica, etc.) pelo seu interior.

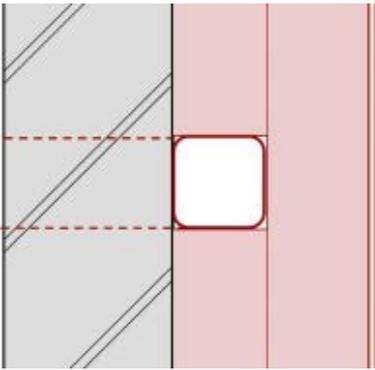


Figura 5.2 – Isolamento da fachada compacta

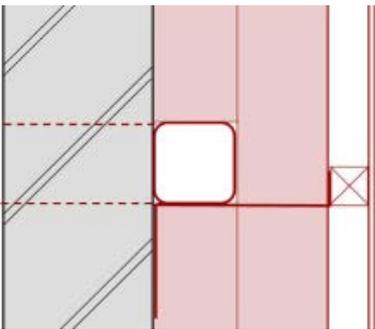


Figura 5.3 – Isolamento da fachada ventilada

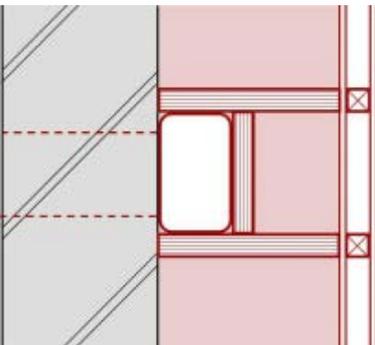


Figura 5.4 – Módulo de fachada prefabricado

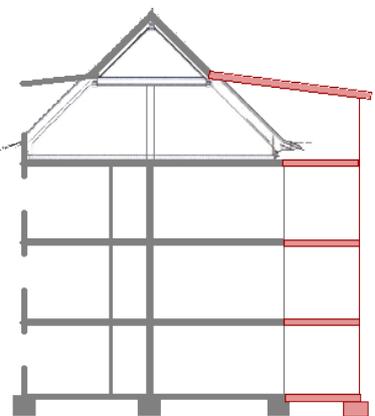


Figura 5.5 – Módulo para ampliação de um espaço



## 5.3 SOLUÇÕES PROPOSTAS

### 5.3.1 Enquadramento

A partir dos conceitos base anteriormente expostos e como estudo prévio, foram apresentadas três possíveis soluções de reabilitação de modo a verificar qual teria maior potencial de aplicação.

As soluções estudadas foram as seguintes:

- Módulo de reabilitação com painéis prefabricados de betão contendo fibras de vidro;
- Solução de reabilitação do tipo fachada ventilada;
- Módulo de Reabilitação Prefabricado (MRP).

Todas estas propostas assentam em conceitos de prefabricação e têm como princípio orientador a aplicação de isolamento nas fachadas e o aumento da eficiência energética dos edifícios de habitação.

### 5.3.2 Módulo de reabilitação com painéis prefabricados de betão contendo fibras de vidro

Um dos sistemas que foi inicialmente estudado foi baseado na utilização de painéis de betão prefabricado contendo fibras de vidro – GRC, com vista ao desenvolvimento de um módulo de reabilitação para aplicação em fachadas, integrando-se numa solução base do tipo F3 (Figura 5.6).

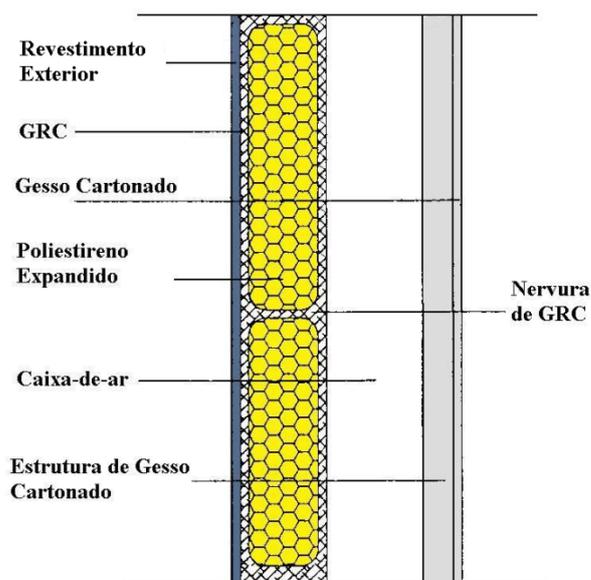


Figura 5.6 – Solução tipo de painel GRC (betão com fibras de vidro)

Estima-se que 80% da produção mundial de GRC se destine à aplicação em painéis de fachada. Os painéis de fachada GRC podem ser do tipo sanduíche ou com suporte metálico, havendo também a possibilidade da incorporação de GRC em painéis nervurados.

O processo de aplicação dos painéis GRC, conforme apresentado por Barth e Vefago (2008) consiste em:

- 1 – Aplicação da estrutura de suporte na parede existente do edifício (Figura 5.7 – esq.);
- 4 – Aplicação dos painéis a toda a fachada (Figura 5.7 – dir.);



Figura 5.7 – Aplicação do painel GRC (betão com fibras de vidro) (Fonte: F. Barth, L. Vefago, 2008)

As vantagens inerentes à utilização deste tipo de painel são:

- Elevada durabilidade e resistência à tração;
- Possibilidade de alcançar formatos com elevada capacidade e rapidez de montagem;
- Elevada flexibilidade de formas, dimensões, cores e texturas superficiais aos componentes
- Possibilidade de adaptação a qualquer tipo de estrutura, devido ao sistema móvel de fixação;
- Ausência de problemas de corrosão, como se verifica nos elementos de betão armado, uma vez que as fibras utilizadas não são suscetíveis a este fenómeno.

No mercado das fachadas, a qualidade e as características inerentes ao GRC, em conjunto com os prazos de execução mais reduzidos que os painéis de betão, fazem deste produto uma alternativa real a outros que requerem mão-de-obra especializada, cada vez mais cara e sem a garantia de controlo de qualidade que se obtém em fábrica.



A variedade de painéis permite ainda fornecer um leque de preços que vão de encontro às necessidades técnicas do projeto e da direção da obra.

No entanto, a utilização de GRC tem também algumas desvantagens:

- O Elevado custo inicial, devido à necessidade de aquisição de equipamento específico e de formação técnica do pessoal;
- O Processo de controlo de qualidade é muito exigente, para evitar problemas relacionados quer com a dispersão das fibras quer com a compacidade;
- O processo de coloração dos painéis é muito lento;
- O elevado coeficiente de transmissão térmica das soluções tipo;
- A existência de pontes térmicas significativas devido à estrutura de suporte dos painéis.

Depois de analisar as vantagens e inconvenientes desta solução foi decidido não se prosseguir com o desenvolvimento da mesma uma vez que apresentava problemas de base de difícil solução, tais como:

- O elevado peso da solução, o que pode apresentar dificuldades na colocação dos painéis;
- O elevado custo associado às matérias-primas, o que, em adição aos elevados custos iniciais para a fabricação dos painéis, vai resultar em soluções com uma relação custo/benefício baixa;

Como tal, verifica-se que esta solução poderá ser mais benéfica quando aplicada em edifícios novos servindo de fachada, do que em ações de reabilitação onde seria colocada sobre as paredes existentes.

### **5.3.3 Solução de reabilitação tipo fachada ventilada (SFV)**

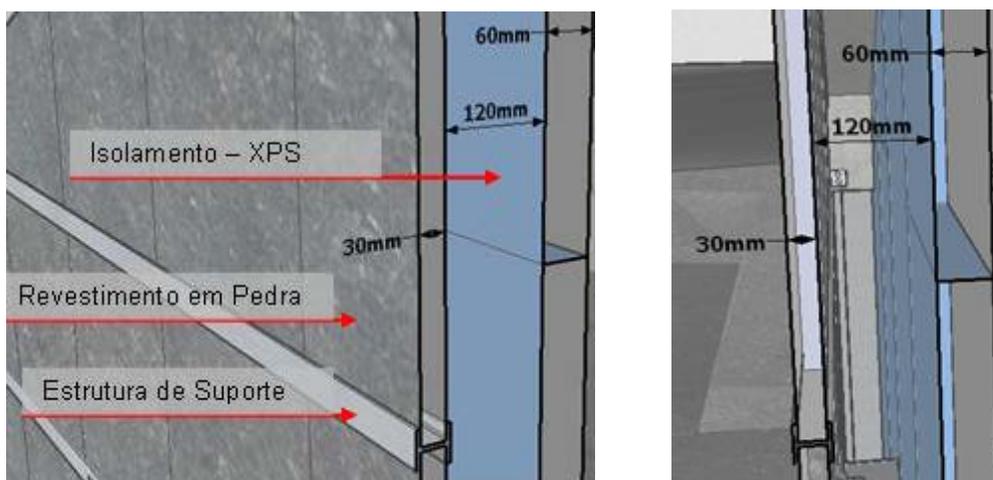
Um dos conceitos apresentados para a solução de reabilitação a desenvolver foi um sistema do tipo Fachada Ventilada, integrando-se numa solução base do tipo F2. Este sistema é baseado nos tradicionais sistemas de fachadas ventiladas, mas apresentando um maior nível de isolamento, assim como a inclusão de condutas, tubagens ou outras cablagens, pelo interior da solução.

Esta solução tem como base um sistema estrutural do tipo metálico, o qual é um dos sistemas de utilização mais usados pela empresa que cofinanciou esta investigação – DST, S.A. – e como tal foi considerado uma vantagem para a sua produção em massa pela mesma empresa.

Assim, este sistema de fachada ventilada – SFV - é composto por uma estrutura metálica de suporte, por placas de isolamento colocadas na face interior e por um revestimento exterior em pedra natural ou constituído por aglomerados feitos com as sobras de pedra provenientes do centro produtivo de rochas da DST. A partir da Figura 5.8 é possível observar a composição do sistema de reabilitação proposto.

De forma a possibilitar o estudo prévio desta solução, foi criado um modelo 3D da solução, através de ferramenta de modelação gráfica Google SketchUp®.

A aplicação dos modelos de simulação gráfica 3D é muito útil visto permitir uma avaliação visual detalhada da solução de reabilitação, possibilitando o estudo, de forma célere, de diferentes alternativas para o design das soluções, assim como dos métodos de aplicação.



**Figura 5.8 – Solução proposta para o sistema de reabilitação**

A partir da modelação 3D foi possível verificar quais os passos necessários para a aplicação do sistema de reabilitação, conforme se pode observar nas Figuras 5.9 a 5.11. O processo é constituído por seis passos:

- 1º - Aplicação dos pilares metálicos aos quais será possível a aplicação da estrutura de suporte da solução;
- 2º - Remoção dos envidraçados originais;
- 3º - Aplicação do isolamento entre os pilares metálicos;
- 4º - Instalação da estrutura de suporte do revestimento a aplicar;



5º - Aplicação de novos envidraçados;

6º - Aplicação do sistema de revestimento.

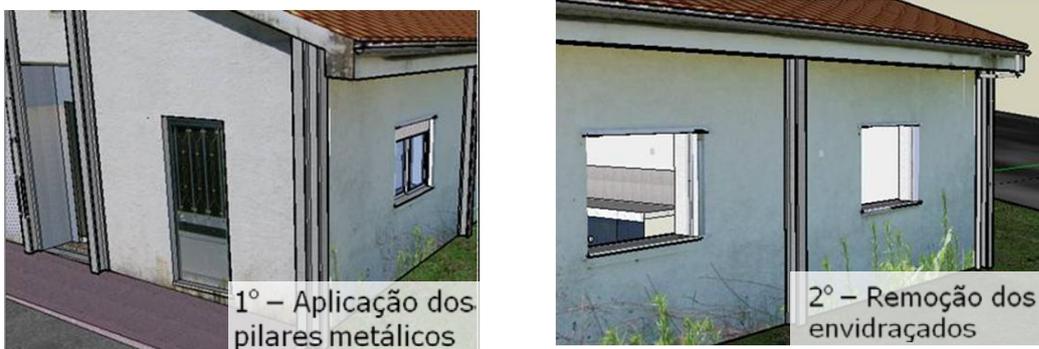


Figura 5.9 – Processo de montagem do sistema de reabilitação – SFV



Figura 5.10 – Processo de montagem do sistema de reabilitação – SFV

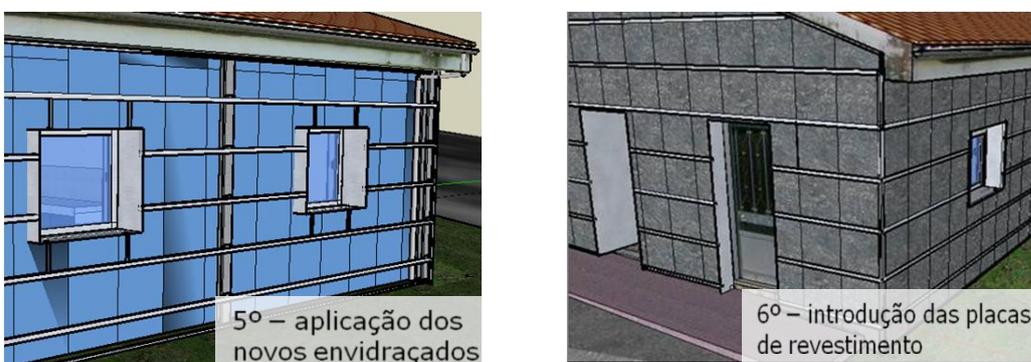


Figura 5.11 – Processo de montagem do sistema de reabilitação – SFV

A partir do estudo prévio apresentado, foi possível verificar que esta solução apresenta como vantagens:

- Um elevado desempenho energético;
- Um processo de aplicação simples;
- Baixos custos associados (devido ao reaproveitamento de sobras para a produção do material de revestimento).

No entanto esta solução apresentava alguns problemas de base, tais como:

- Um peso específico muito alto, devido ao revestimento em pedra ou aglomerado de pedra, o que resultava num peso demasiado elevado que poderia trazer problemas acrescidos aquando da sua aplicação em fachadas;
- O processo de aplicação não apresenta a rapidez pretendida.

Embora fossem verificados alguns problemas base nesta solução, com a redução da espessura do revestimento e a implementação de rotinas otimizadas para aplicação da solução, será possível mitigar os mesmos.

### 5.3.4 Módulo de reabilitação prefabricado - MRP

O último conceito apresentado para a solução de reabilitação a desenvolver foi um sistema do tipo isolamento compacto, integrando-se numa solução base do tipo F1. Este sistema é baseado no sistema tradicional de revestimento descontínuo prefabricado, mas apresentando um maior nível de isolamento, a inclusão de condutas, tubagens ou outras cablagens, pelo interior da solução, além de uma estrutura de suporte para maior facilidade de aplicação.

Após um estudo aprofundado sobre quais os materiais que se poderiam utilizar na constituição do módulo, bem como as respetivas espessuras e ordem de aplicação dos mesmos, foi definido o design base do módulo de reabilitação – MRP (Figura 5.12), o qual é constituído por (do exterior para o interior): Revestimento exterior em alumínio; Perfil “U” em aço; Isolamento em aglomerado negro de cortiça; Isolamento em XPS; Caixa para passagem de tubagens e cablagens; Isolamento em XPS; Barreira para-vapor; Revestimento interior em alumínio.



Figura 5.12 – Composição base do Módulo de Reabilitação Prefabricado

Por fim, foi também estudado o processo de aplicação do sistema MRP aos edifícios a reabilitar, com apoio do modelo 3D da habitação da Aldeia de Leste (Caso de Estudo CS2 – Capítulo 4):



1. Aplicação da estrutura de suporte na parede existente do edifício (Figura 5.13a);
2. Aplicação dos módulos a toda a fachada (Figura 5.13b,c,d);

Assim, foi verificado a necessidade de os módulos possuírem diferentes tamanhos, pois são necessários módulos de remate para a cobertura, assim como módulos de canto para a ligação entre duas paredes.

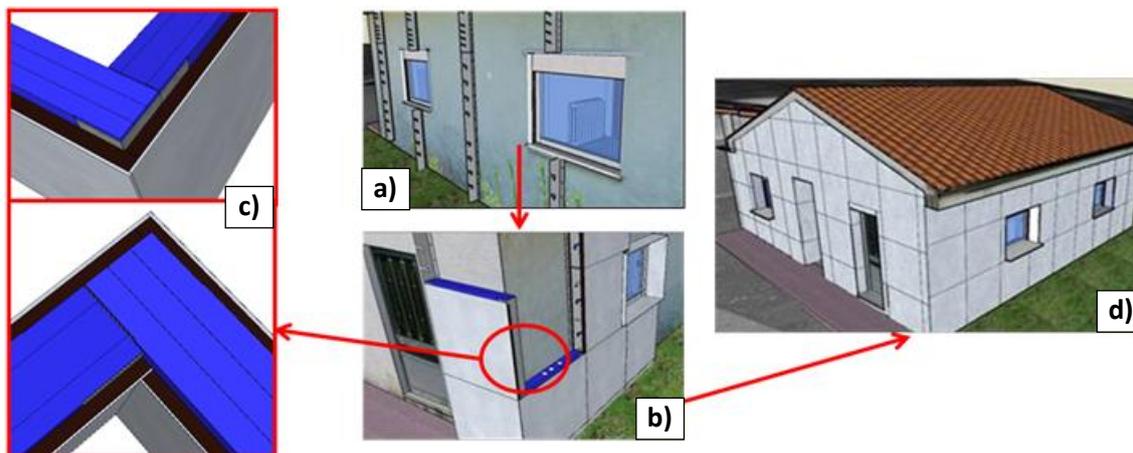


Figura 5.13 – Processo de aplicação do sistema de reabilitação – MRP – a um edifício. a) estrutura de suporte; b) pontos singulares; c) módulos de canto; d) aspeto final do edifício

A partir do estudo prévio apresentado, foi possível verificar que esta solução apresenta como vantagens:

- Um elevado desempenho energético;
- Um processo de aplicação simples;

No entanto esta solução apresentava alguns problemas de base, tais como:

- Presença de pontes térmicas devido à estrutura de suporte;

Embora fossem verificados alguns problemas base nesta solução, estes foram considerados possíveis de resolver com o prosseguimento do estudo e desenvolvimento e caracterização dos módulos.

### 5.3.5 Seleção da proposta a desenvolver

Das três soluções apresentadas foi decidido que apenas se desenvolveria aquela que apresentasse maior potencial.

Relativamente à proposta do módulo de reabilitação com painéis prefabricados em fibra de vidro, embora este conceito apresentasse algumas vantagens interessantes (estrutura leve, resistência à tração, flexibilidade), a construção de protótipos e amostras dos painéis de betão

implicavam um esforço monetário elevado e a formação específica de pessoal. Estes factos levaram a que esta solução fosse preterida relativamente às restantes.

Quanto à solução SFV, mesmo considerando as razões apontadas anteriormente para a não continuação do seu desenvolvimento, foi verificado que esta solução apresentava algumas vantagens importantes, tendo sido decidido comparar as soluções SFV e MRP, em termos do desempenho energético.

Para tal foi aplicada uma ferramenta dinâmica de simulação energética - eQuest e calculadas as necessidades energéticas de um edifício existente, comparando-as com as necessidades do edifício após aplicação de ambas as soluções (MRP e SFV), com os seguintes dados de entrada para todas as alternativas simuladas:

\_ Temperatura de Conforto de Inverno: 20 °C;

\_ Temperatura de Conforto de Verão: 25 °C;

\_ Localização – Braga (Ficheiro Climático utilizado baseado nos dados climáticos presentes na ferramenta SOLTERM®);

\_ Carga térmica da ocupação, iluminação e equipamentos – 4W/m<sup>2</sup>;

\_ Horário de ocupação, iluminação e equipamentos – horário padrão para habitações providenciado pela ferramenta.

A Figura 5.14 apresenta o modelo usado para a simulação na ferramenta eQuest e a Tabela 5.1 os resultados obtidos.

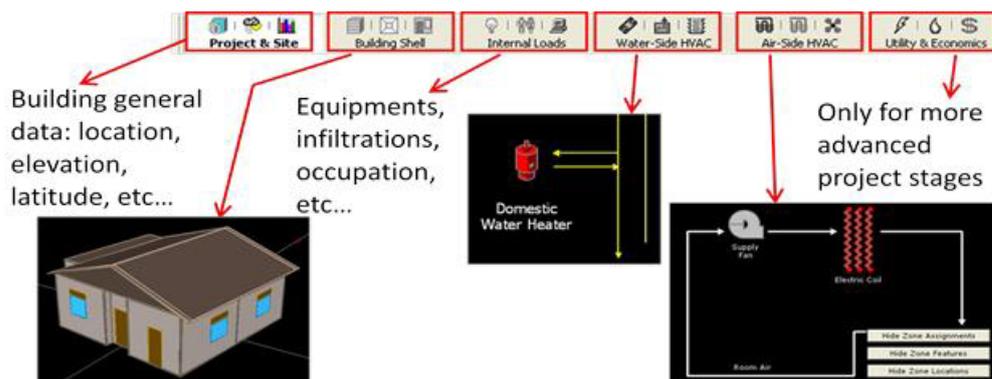


Figura 5.14 – Modelo 3D da Habitação da Aldeia de Leste adaptado à ferramenta eQuest.



Tabela 5.1 – Avaliação do desempenho energético das soluções de reabilitação.

	Necessidades de Arrefecimento (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	Necessidades de Aquecimento (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	Necessidades Aquecimento e Arrefecimento (kWh/m <sup>2</sup> .ano)
<b>Original</b>	0.9	233.8	<b>234.7</b>
<b>SFV</b>	10.5	108.2	<b>118.7</b>
<b>MRP</b>	13.4	50.4	<b>63.8</b>

Analisando os resultados obtidos foi verificado que a solução com maior potencial para produção e aplicação seria o Módulo de Reabilitação Prefabricado – MRP, visto que com esta solução se terem atingido reduções das necessidades energéticas de cerca de 73%, enquanto a solução SFV apenas promoveu reduções de 50%.

Assim, a solução selecionada para produção foi o Módulo de Reabilitação Prefabricado - MRP, apresentando-se nos capítulos seguintes o seu desenvolvimento e otimização.

#### 5.4 CONCLUSÕES

O conceito base seguido para o desenvolvimento das propostas de soluções inovadoras de reabilitação energética de fachadas assentava em três possibilidades de tipologias de soluções:

- Soluções de isolamento pelo exterior tipo ETICS;
- Soluções de isolamento térmico em sistema de fachada ventilada;
- Soluções de isolamento com módulos prefabricados.

Em todas estas estratégias deveria ser projetado a integração de tubagens pelo interior da solução, assim como prevista a ligação da solução aos vãos.

Através desta estratégia foram estudadas três soluções inovadoras, para verificação do potencial de entrada no mercado e capacidade técnica de produção da solução por parte da empresa parceira neste trabalho de investigação (DST, S.A.), tendo-se concluído, através da análise geral das propostas e de estudos comparativos do desempenho energético das soluções, que aquela que apresentava maior potencial, e assim selecionada para desenvolvimento detalhado, foi o Módulo de Reabilitação Prefabricado – **MRP**.



**CAPÍTULO 6 – Módulo de Reabilitação Prefabricado – MRP – Solução Base**

*"O mundo move-se tão depressa atualmente, que uma pessoa que diz que alguma coisa não pode ser feita é em geral interrompida por alguém que já o está a fazer." - Elbert Hubbard, Escritor. Estados Unidos, 1856 // 1915*



## 6.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo apresenta em detalhe as principais características do módulo de reabilitação prefabricado desenvolvido para a aplicação em fachadas, apresentando a sua versão base, assim como o seu processo de otimização.

Para tal são referidos os aspetos gerais do mesmo e apresentada a pormenorização da solução. Adicionalmente são apresentados os estudos efetuados com vista à previsão do coeficiente de transmissão térmica.

A otimização do MRP teve como base a redução das pontes térmicas e possibilidade de aparecimento de condensações da solução base do MRP, comparativamente com uma solução otimizada, assim como a identificação da espessura ótima do isolamento a aplicar.

## 6.2 MRP – DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO

### 6.2.1 Evolução do Módulo

Com vista ao desenvolvimento do Design e detalhes para aplicação nas fachadas existentes, foi utilizada a ferramenta CAD – Google SketchUp®. A partir desta ferramenta foi possível visualizar e otimizar, a três dimensões, o design da solução em estudo.

Foram estudados vários desenhos para se chegar a uma solução base com inclusão de todas as funcionalidades necessárias – prefabricação; elevada resistência térmica; possibilidade de aplicação de tubagens, condutas ou outras cablagens pelo interior do módulo.

A primeira versão do módulo MRP (Figura 6.1) tinha como base a aplicação de um revestimento plástico pelo exterior, uma elevada espessura de isolamento (12 cm de poliestireno expandido extrudido e 6 cm de poliuretano) e a aplicação de uma caixa com poliuretano injetado a toda a largura do módulo, para a passagem de condutas.

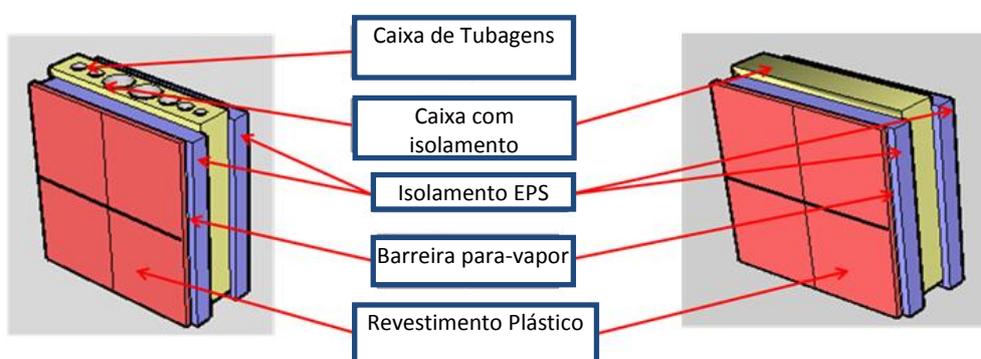


Figura 6.1 – Modelo 3D da 1ª Versão do sistema de reabilitação

As alterações efetuadas para o segundo design do módulo (Figura 6.2) prendem-se com a redução do tamanho da caixa de tubagens e a aplicação de um perfil U a unir todo o isolamento aplicado, assim como a servir de suporte para encaixe numa estrutura metálica de suporte fixada na parede existente.

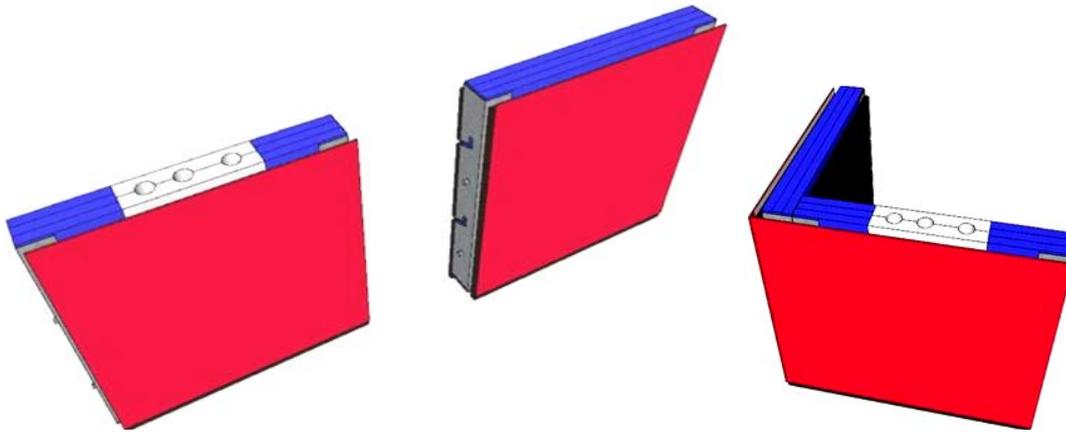


Figura 6.2 – Modelo 3D da 2ª Versão do sistema de reabilitação

Na terceira versão do MRP (Figura 6.3) foi alterado o tipo de revestimento para um compósito de alumínio, uma vez que o mesmo é mais simples de trabalhar (permitindo dobrar e cortar de forma simples), com isolamento de aglomerado de cortiça (possui melhores características ecológicas) e a substituição da caixa de tubagens por um vazio (negativo) no isolamento ou moldagem das tubagens no próprio isolamento, para a passagem das condutas ou outras cablagens pelo interior do módulo, uma vez que reduz o número de ligações entre diferentes componentes e reduz as pontes térmicas.

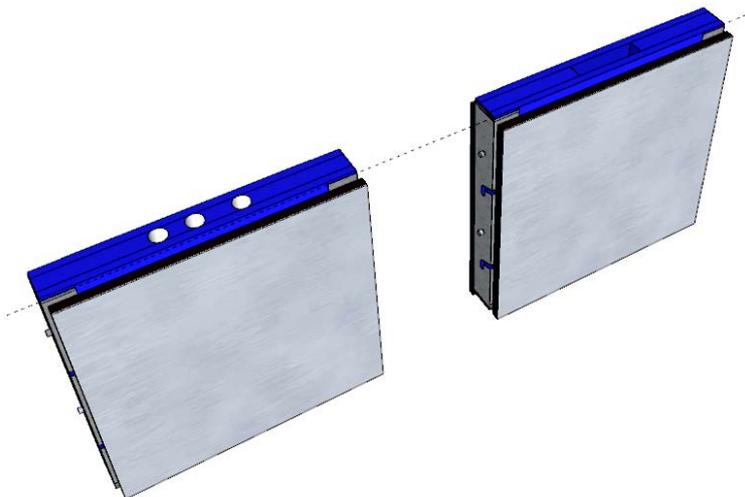


Figura 6.3 – Modelo 3D da 3ª Versão do sistema de reabilitação.



A terceira versão do módulo MRP foi identificada como a Solução Base, pois era aquela com menores custos de produção, facilidades de montagem e esteticamente a mais apelativa.

### 6.2.2 Dados Gerais da Solução Base

O módulo MRP foi desenvolvido a partir do sistema tradicional de revestimento descontínuo prefabricado.

Como ponto de partida, foi estipulado que a espessura de isolamento a aplicar, seria aquela conducente a um coeficiente de transmissão térmico correspondente a 50% do valor de referência regulamentar (RCCTE), definido para a zona climática mais severa (I3).

As dimensões de cada módulo são de cerca de 1 m x 1 m, as quais foram seleccionadas a fim de facilitar o seu transporte e aplicação.

Após o estudo e teste de várias alternativas de design anteriormente apresentadas, a composição da solução base do MRP é a seguinte (do exterior para o interior), conforme representado na Figura 6.4:

- Acabamento exterior de compósito de alumínio (6 mm);
- Isolamento de aglomerado negro de cortiça (20mm);
- Perfil-U em aço (1,5 mm);
- Isolamento de poliestireno extrudido (XPS – 120 mm) com ou sem tubagens ou cavidades moldadas para tubagens e cablagens;
- Barreira pára-vapor (1 mm);
- Isolamento de aglomerado negro de cortiça (30mm);
- Acabamento exterior de compósito de alumínio (6 mm);

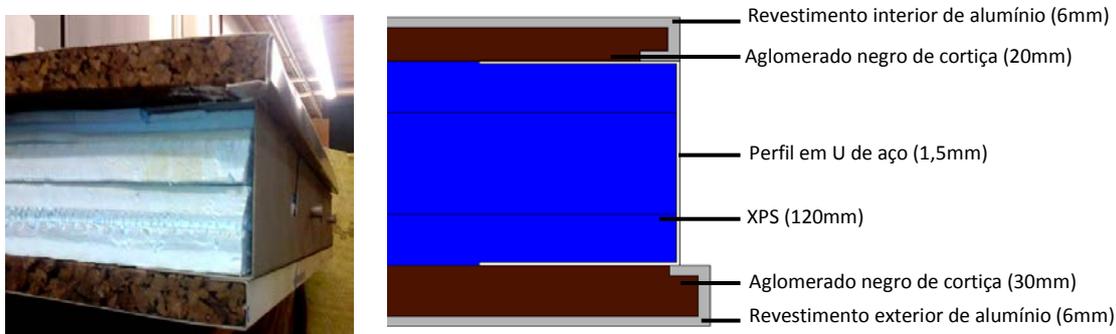


Figura 6.4 – Composição do módulo MRP (vista de topo)

### 6.2.3 Pormenorização

#### \_Vistas – Perspetivas e Cortes

De forma a possibilitar uma visualização mais abrangente da solução MRP, a Figura 6.5 inclui uma perspetiva 3D da solução base do MRP, assim como três cortes transversais de diferentes secções do módulo.

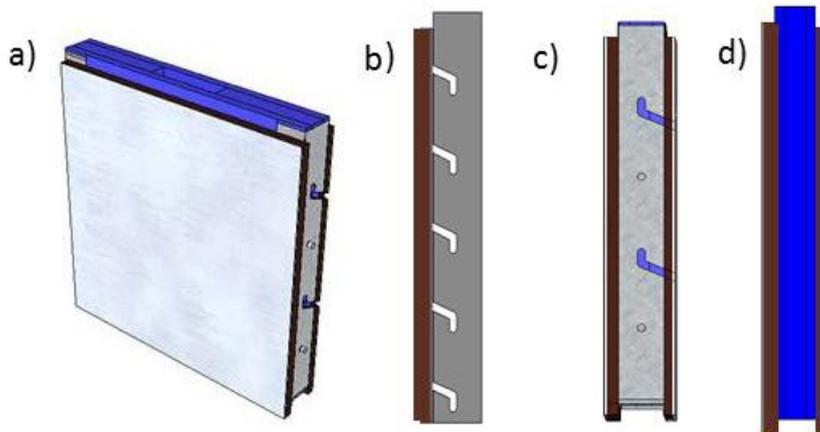


Figura 6.5 – Perspetiva 3D do MRP (a); Corte transversal com a estrutura de suporte (b); Corte transversal com o perfil-U (c); Corte transversal no centro do módulo (d).

A Figura 6.6 apresenta a versão base do MRP sem a inclusão do revestimento exterior e barreira para-vapor, sendo assim possível observar o posicionamento do isolamento de aglomerado de cortiça.

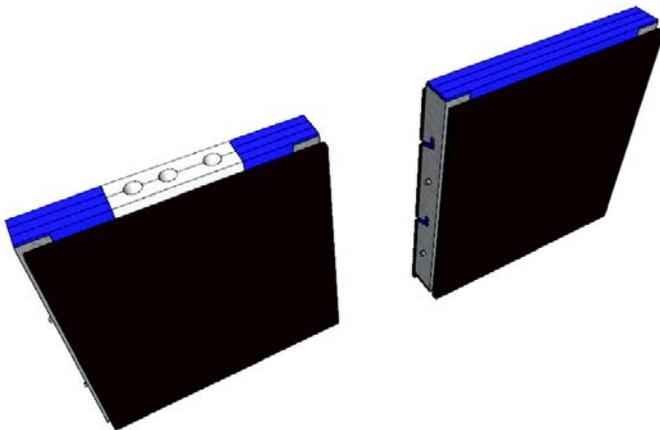


Figura 6.6 – Módulos MRP sem o revestimento e barreira para-vapor.

A Figura 6.7 apresenta a versão base do MRP sem a inclusão do revestimento exterior, barreira para-vapor e isolamento de aglomerado de cortiça, sendo assim possível observar o posicionamento do isolamento de poliestireno e a caixa de tubagens.

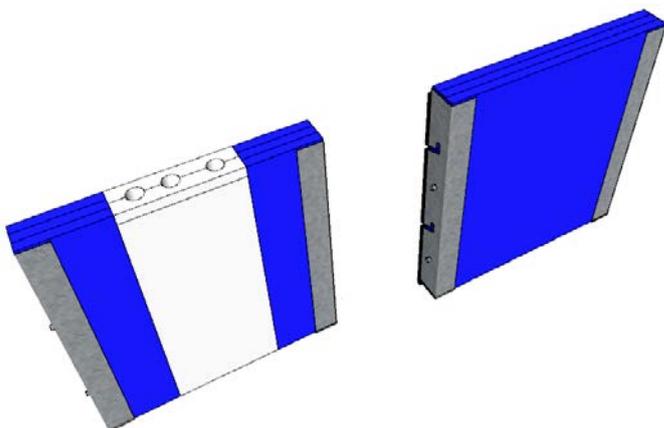


Figura 6.7 – Módulos MRP sem o revestimento, barreira para-vapor e camada exterior do isolamento de cortiça.

A Figura 6.8 apresenta a versão base do MRP sem a inclusão do revestimento exterior, barreira para-vapor, isolamento de aglomerado de cortiça e o isolamento de poliestireno, sendo assim possível observar o posicionamento da camada interior de isolamento de aglomerado de cortiça, a caixa de tubagens e os perfis U.

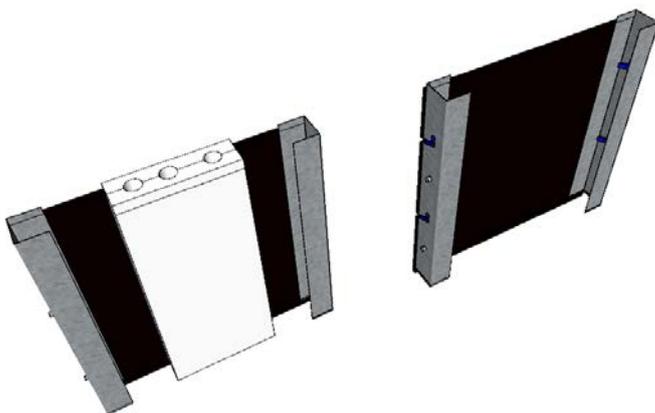


Figura 6.8 – Módulos MRP sem o revestimento, barreira para-vapor, camada exterior do isolamento de cortiça e isolamento de PXS.

### Detalhes Construtivos

A solução MRP terá uma espessura total de 17,8 cm e um peso total de, aproximadamente, 12 kg/m<sup>2</sup>. Com a aplicação deste sistema de reabilitação é esperado que a resistência térmica das paredes da envolvente exterior dos edifícios aumente em cerca de 4 m<sup>2</sup>.K/W, considerando o valor médio ponderado de resistência térmica resultante da resistência térmica da zona corrente, a resistência térmica da zona de tubagens e a resistência térmica da zona da estrutura de suporte.

Caso seja necessária a colocação de novas tubagens ou o resguardo de tubagens já existentes, é possível a criação de uma abertura no interior do painel MRP que permite a passagem dessas mesmas tubagens, conforme apresentado na Figura 6.9.



Figura 6.9 – Vista de topo do módulo com orifício para passagem de tubagens

Em termos gerais foram estudadas três diferentes soluções para o módulo MRP conforme se mostra na Figura 6.10:

- a) Zona corrente da envolvente;
- b) Zona com vazio no isolamento (negativo) para passagem de tubagens existentes ou passagem de cablagens – permite um processo de integração das tubagens e condutas existentes simples;
- c) Zona para aplicação de novas tubagens, com a moldagem dos mesmos no isolamento do módulo – permite uma melhor otimização do coeficiente de transmissão térmica do MRP e redução das pontes térmicas.

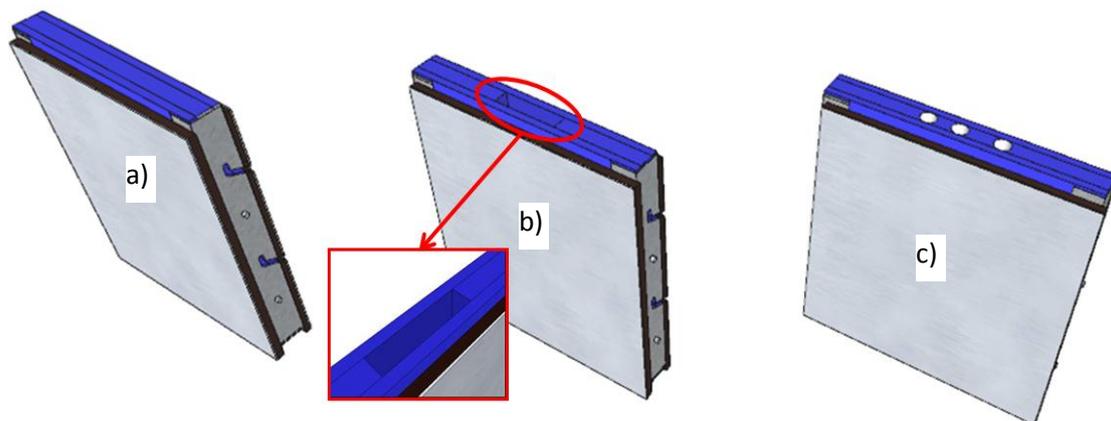


Figura 6.10 – Soluções existentes para o módulo MRP – a) base; b) com orifício para tubagens existentes ou cablagens; c) com tubagens novas

### Interfaces com os Edifícios

Foi desenvolvido um sistema de montagem que permite uma aplicação e remoção simples, baseado na introdução de perfis-U em aço, em ambos os lados do módulo, e uma estrutura de suporte com um sistema de pernos e furos, aparafusada à parede existente (Figura 6.11). O perfil-U aplicado no módulo MRP tem incluído no mesmo diversos rasgos e saliências, introduzidos a uma determinada distância entre os mesmos, cujo objetivo é a sua aplicação numa estrutura de suporte (Figura 6.11).

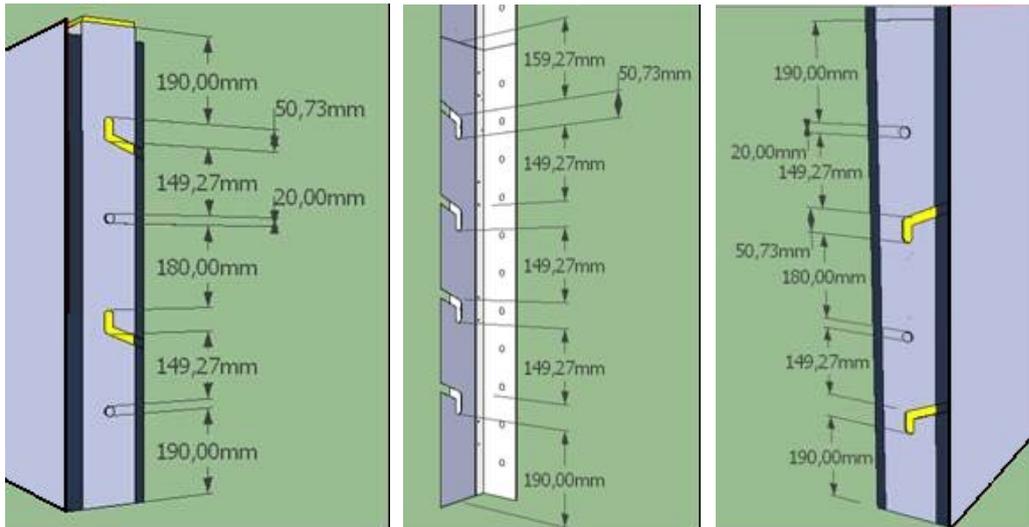


Figura 6.11 – Dimensões dos perfis laterais dos módulos e da estrutura de suporte

A ligação do módulo à parede existente será efetuada através da colocação de uma subestrutura metálica que permite a fixação mecânica do módulo. A subestrutura de suporte é composta por uma chapa de aço em “T”, com 1,5 mm de espessura. A sua ligação à fachada existente é feita por parafusos colocados na subestrutura.

A Figura 6.12 ilustra a colocação do módulo na estrutura de suporte instalada na parede exterior do edifício a reabilitar. Os módulos são colocados da direita para a esquerda, começando da base da fachada até ao topo.

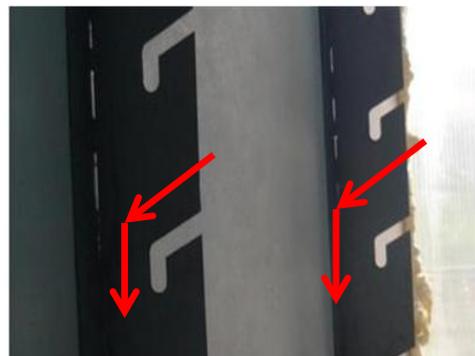


Figura 6.12 – Sistema de encaixe do módulo na subestrutura

Os orifícios das peças laterais da subestrutura tanto permitem a fixação à parede existente da subestrutura como do módulo de reabilitação prefabricado, diminuindo assim a carga exercida sobre a estrutura de suporte e módulos colocados inferiormente (Figura 6.13).

Os pernos na lateral do módulo encaixam na estrutura de suporte e na ranhura do módulo que se encontra imediatamente ao lado (Figuras 6.12 e 6.13).

Os módulos utilizam um sistema de pernos e ranhuras para a ligação lateral (Figura 6.13) e a ligação do topo e base (Figura 6.15) é feita por encaixe simples, resultando das características

geométricas do módulo (Figura 6.14), ou seja, devido à existência de uma diferença entre o alinhamento do núcleo do módulo e o revestimento de alumínio.

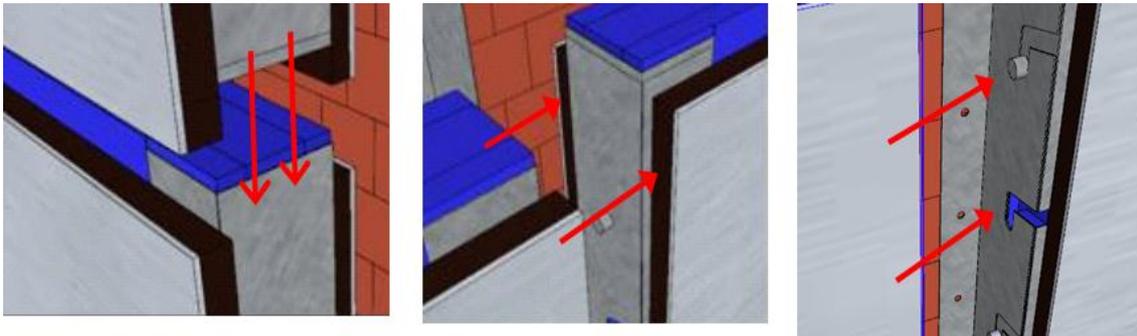


Figura 6.13 – MRP: Ligação lateral entre módulos

Por outro lado, e de forma a reduzir as pontes térmicas da ligação entre módulos, o revestimento exterior e o isolamento exterior serão desfasados em 15 mm, como mostra a Figura 6.14.

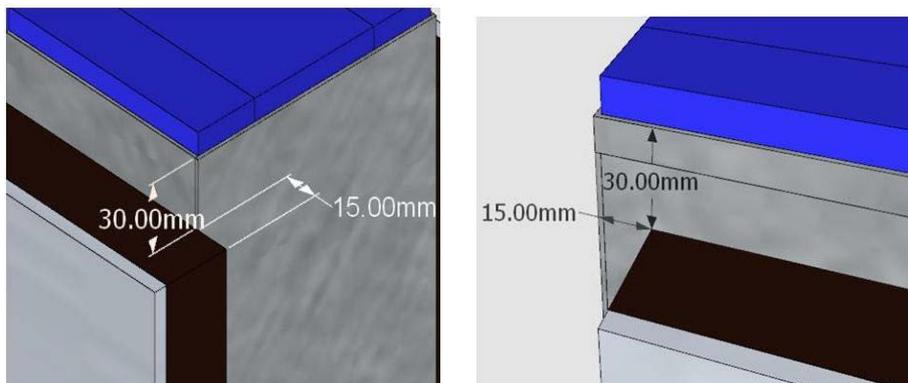


Figura 6.14 – Ligação topo/base

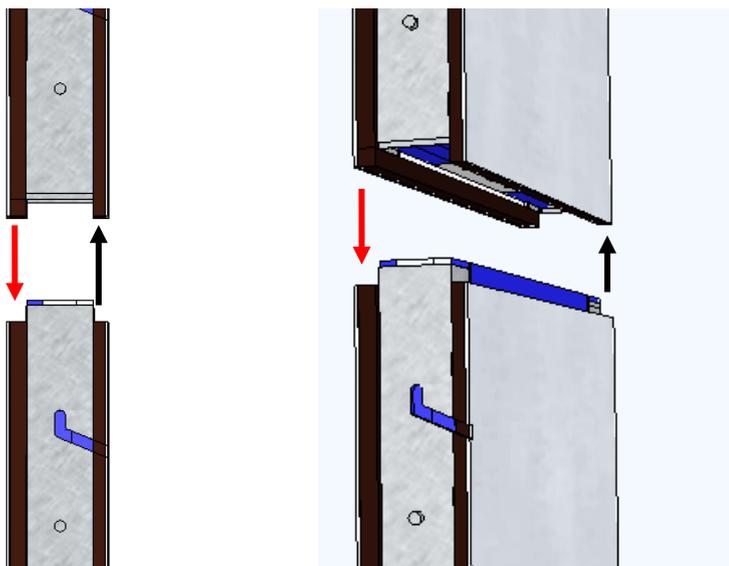


Figura 6.15 – MRP: Ligação topo/base entre módulos



Para aplicação em peitoris e ombreiras o módulo MRP é cortado e é colocada uma chapa de alumínio igual ao revestimento exterior e isolamento em poliestireno extrudado (XPS). Deste modo é possível um isolamento contínuo até ao caixilho / porta, evitando assim a existência de pontes térmicas (Figura 6.16). A ligação desse elemento ao módulo e à parede existente é colada, recorrendo a uma argamassa própria para o efeito. Esta solução permite a adaptação do módulo a qualquer tipo e dimensões de fachada.

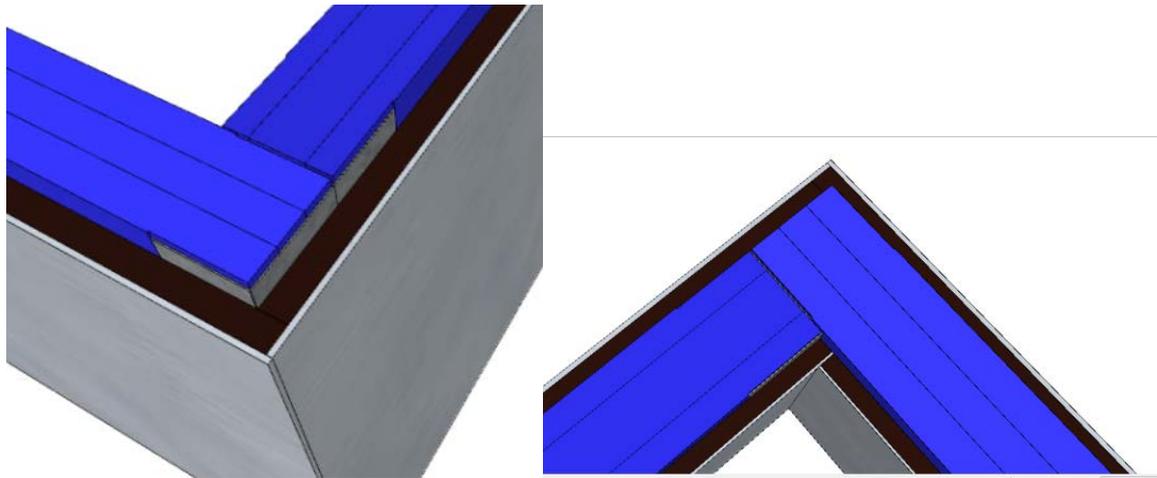


Figura 6.16 – Elemento de remate para janelas e portas

#### 6.2.4 Previsão do Coeficiente de Transmissão Térmica

A principal função do módulo é melhorar o desempenho térmico da fachada do edifício a reabilitar e, como tal, o indicador que melhor caracteriza este desempenho é o coeficiente de transmissão térmica –  $U$  ( $W/m^2.K$ ).

Considerando a regulamentação térmica Portuguesa (RCCTE), para a zona climática mais severa (I3) o valor do coeficiente de transmissão térmica superficial máximo admissível ( $U$ ) dos elementos exteriores em zona corrente opaca vertical é de  $1,45 W/m^2.K$  e o valor de referência para a mesma zona é de  $0,50 W/m^2.K$  (RCCTE, 2006).

Considerando que o módulo de reabilitação prefabricado pretende alcançar um valor de coeficiente de transmissão térmica correspondente a 50% do valor de referência, o objetivo será o módulo MRP alcançar um valor de  $U$  inferior a  $0,25 W/m^2.K$ .

O coeficiente de transmissão térmico é calculado através da equação 6.1:

$$U = \frac{1}{R_{Si} + \sum R_i + R_{Se}} \quad (6.1)$$

Com:

$U$  – Coeficiente de transmissão térmica;

$R_{Si}$ ,  $R_{Se}$  – Resistência superficial interior e exterior, respetivamente;

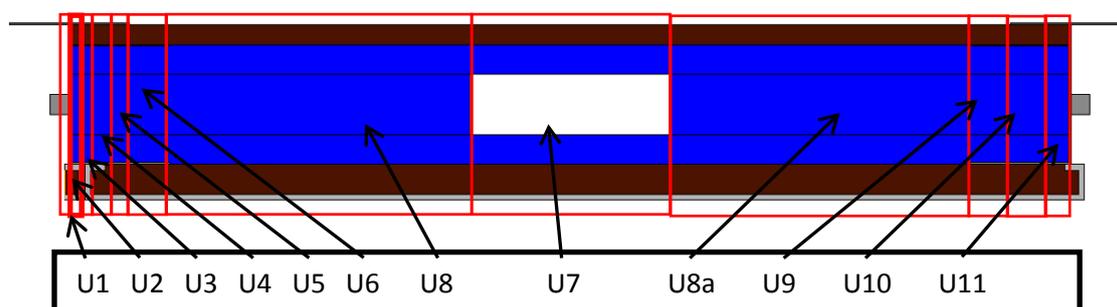
$\Sigma R_i$  – Somatório das resistências dos materiais que constituem o painel.

Na Tabela 6.1 encontram-se identificados os materiais que compõem o módulo bem como as respetivas características térmicas.

**Tabela 6.1 – Caracterização dos materiais**

Componentes do Módulo	Materiais da Solução Base	Espessura [mm]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/(m. K)]	Peso [kg/m <sup>2</sup> ]	R [m <sup>2</sup> .K/W]
Revestimento Interior	Alumínio (Reynobond)	6,00	920,00	-	5,52	0,19
Barreira Para Vapor	Filme de Polietileno	2,50	1000,00	-	0,25	0,00
Isolamento Interior	Aglomerado de cortiça expandida	30,00	130,00	0,04	3,90	0,75
Isolamento Intermédio	XPS	120,00	30,00	0,04	3,60	3,24
Isolamento Exterior	Aglomerado de cortiça expandida	20,00	130,00	0,04	3,90	0,50
Revestimento Exterior	Alumínio (Reynobond)	6,00	920,00	-	5,52	0,19
Perfil Metálico em U	Aço	1,50	7800,00	50,00	11,70	1,92E-7
Estrutura de Suporte	Aço	1,50	7800,00	50,00	11,70	1,92E-7

Uma vez que a constituição do painel não é homogénea ao longo do seu comprimento, para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica ( $U$ ) foi necessário identificar as diferentes secções e efetuar um cálculo ponderado desse parâmetro, conforme representado na Figura 6.17.



**Figura 6.17 – Identificação das diferentes secções do painel MRP**

Na Tabela 6.2 encontram-se os valores dos coeficientes de transmissão térmica das diferentes secções existentes ao longo do painel, e respetivas áreas, através dos quais foi calculado o coeficiente de transmissão térmica ponderado do painel –  $U_{MRP} = 0,23 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ .



Tabela 6.2 – Coeficiente de transmissão térmica por secção do MRP

Secção	Área [m <sup>2</sup> ]	Valor de U [W/m <sup>2</sup> .K]
U1	0,004	0,869
U2	0,004	0,508
U3	0,004	0,195
U4	0,003	0,198
U5	0,011	0,193
U6	0,001	0,194
U7	0,111	0,200
U8	0,400	0,202
U8a	0,300	0,202
U9	0,042	0,202
U10	0,060	0,198
U11	0,060	0,278
<b>U Ponderado</b>	<b>1,003</b>	<b>0,228</b>

## 6.3 OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DO MRP

### 6.3.1 Enquadramento

A otimização do desempenho do MRP teve como objetivo o cálculo da espessura média de isolamento a incluir no módulo (6.3.3), mas também a comparação do desempenho higratérmico de duas soluções do módulo de reabilitação prefabricado – Solução base e Solução alternativa - relativamente à existência de pontes térmicas (6.3.4.1) e no estudo da ocorrência de condensações ao longo do módulo (6.3.4.2).

Todos os estudos referidos foram realizados com auxílio de ferramentas de simulação, uma vez que a utilização destas ferramentas são essenciais para uma rápida análise das soluções de construção e permitem testar a eficiência de diferentes alternativas.

Estas ferramentas permitem a aplicação de complexos modelos numéricos, possibilitando assim prever o desempenho de diversas soluções de forma expedita.

### 6.3.2 Apresentação das soluções do módulo MRP em estudo

No decorrer do processo de avaliação do módulo MRP, foram comparadas duas soluções do módulo MRP:

- Solução Base – esta solução foi apresentada e caracterizada ao longo do ponto 6.2 do presente Capítulo;

- Solução Alternativa – esta solução é semelhante à solução base, no entanto sem o revestimento e isolamento interiores, mas sim com uma camada de aglomerado de cortiça pelo exterior de maior espessura - 60mm, conforme apresentado na Figura 6.18. Tal foi proposto com vista a minimizar a possíveis pontes térmicas causadas pelo sistema de encaixe dos módulos.



Figura 6.18 – Solução alternativa do MRP

### 6.3.3 Espessura do Isolamento

A determinação da espessura ótima de isolamento do módulo MRP foi feita através de um estudo paramétrico, fazendo variar a espessura de isolamento do módulo MRP com o objetivo de verificar qual a opção com melhor rácio custo-benefício. Para isso, considerou-se a aplicação do módulo MRP a um edifício existente - Edifício Unifamiliar em Braga (Aldeia de Leste) – o qual foi um dos casos de estudo monitorizados no decorrer da campanha de medições apresentada no Capítulo 4, tendo este edifício sido identificado com a referência CS2.

Para tal, foi utilizada uma análise económica detalhada com recurso ao VAL (valor atual líquido) e MTIR (taxa interna de retorno modificada) aplicados para um período de vida da habitação de 18 anos. A definição deste período teve em conta a idade média ponderada do parque edificado Português, de acordo com dados retirados dos Censos 2001, e que é de 32 anos. Tendo em conta a idade do edifício em causa, o período de vida remanescente da habitação após a aplicação das medidas de reabilitação da fachada é de 18 anos.

Com a utilização de uma ferramenta de simulação dinâmica eQuest (Hirsh, 2003) foi possível comparar as necessidades energéticas do edifício na sua forma original, com as necessidades resultantes da aplicação do módulo MRP, considerando diferentes espessuras de isolamento para os dois tipos de isolantes térmicos aplicados no módulo (Poliestireno extrudido – XPS - e Aglomerado negro de cortiça - ICB).

Os valores utilizados para as diversas espessuras de isolamento aplicadas tiveram como base o coeficiente de transmissão térmica associado (U). Como valor inicial do parâmetro U, foi considerado o valor de referência para elementos exteriores de zonas opacas verticais para a



zona climática mais severa (I3), correspondente a um valor de  $0.5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . Na Tabela 6.3 é possível observar as diferentes alternativas de espessuras de isolamento testadas, assim como as suas características e preços associados à construção e aplicação de cada solução.

**Tabela 6.3 – Variação da espessura de isolamento do MRP e características associadas.**

Solução	Espessura Isolamento (cm)		U ( $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )	Preço ( $\text{€/m}^2$ )
	XPS	ICB		
MRP1	12.00	6.00	0.21	45.00
MRP2 (Solução base)	12.00	5.00	0.23	41.50
MRP3	10.00	5.00	0.25	37.50
MRP4	9.00	5.00	0.27	35.76
MRP5	8.00	5.00	0.30	33.85
MRP6	6.00	5.00	0.35	30.01
MRP7	4.00	5.00	0.40	26.18
MRP8	3.00	5.00	0.45	24.27
MRP9	2.00	5.00	0.50	22.36

Os preços utilizados para cada solução estudada do MRP incluem a mão-de-obra necessária para a sua aplicação e o custo associado aos seus constituintes. Os diferentes custos foram estimados à custa da realização de um protótipo do sistema, tendo sido posteriormente aplicada uma redução de 20% nos custos de fabricação e montagem do módulo inerentes à fabricação em série do sistema, conforme previsto.

Considerando que as necessidades de arrefecimento do parque habitacional Português são insignificantes quando comparadas com as necessidades de aquecimento, o estudo realizado centrou-se no cálculo e otimização das Necessidades Energéticas para Aquecimento ( $N_{ic}$  –  $\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}$ ) da habitação em análise. De forma a obter a energia anual para aquecimento é necessário aplicar o rendimento do sistema de aquecimento às necessidades energéticas – Caldeira a combustível líquido com mais de 10 anos -> rendimento de 76%.

O indicador inicialmente utilizado para verificar o desempenho de cada alternativa foi o período de retorno simples – PRS, tendo sido utilizado um preço médio do gasóleo doméstico de  $0.0979 \text{ €/kWh}$ .

De forma a avaliar qual a solução com melhor relação custo-benefício, foi utilizada uma ferramenta de simulação energética para obter os valores das necessidades energéticas para aquecimento ( $N_{ic}$ ) e verificar o PRS de cada solução. Com a aplicação da eficiência do sistema é possível obter as necessidades de energia útil ( $N_{ic}$  útil) e aplicando a área útil do edifício obtém-se as necessidades de energia final. Com a aplicação da tarifa energética ( $\text{€/kWh}$ ) à

energia final calculada, é possível estimar qual será o gasto em energia para aquecimento por ano. Os resultados obtidos com a aplicação da ferramenta de simulação encontram-se na Tabela 6.4 e Figura 6.13.

Tabela 6.4 – Variação da espessura de isolamento do MRP e características associadas.

Solução	Nic (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	Nic útil (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	Energia final (kWh/ano)	Gasto em energia para aquecimento (€)	Poupança (€)	PRS (anos)
Edifício existente	267.4	351.9	19143.1	1874.1	-	-
MRP 1	219.0	288.2	15675.8	1534.7	339.4	6.5
MRP 2	219.8	289.2	15733.1	1540.3	333.8	<b>6.1</b>
MRP 3	225.6	296.8	16148.2	1580.9	293.2	6.3
MRP 4	228.2	300.3	16334.3	1599.1	275.0	6.4
MRP 5	231.5	304.6	16570.5	1622.3	251.9	6.6
MRP 6	236.1	310.7	16899.8	1654.5	219.6	6.7
MRP 7	240.5	316.4	17214.7	1685.3	188.8	6.8
MRP 8	243.9	320.9	17458.1	1709.1	165.0	7.2
MRP 9	246.3	324.1	17629.9	1726.0	148.1	7.4

Conforme se pode observar pela Tabela 6.4 e pela Figura 6.19, a solução que apresenta melhor desempenho em termos de custo-benefício e resulta no mais baixo período de retorno do investimento é a solução MRP 2, a qual representa a solução identificada como a solução base do módulo MRP.

Adicionalmente foi realizada uma análise económica detalhada da aplicação das diferentes soluções do Módulo, para o ciclo de vida da habitação, através da determinação dos parâmetros VAL (Valor atual Líquido) e MTIR (Taxa interna de retorno modificada).

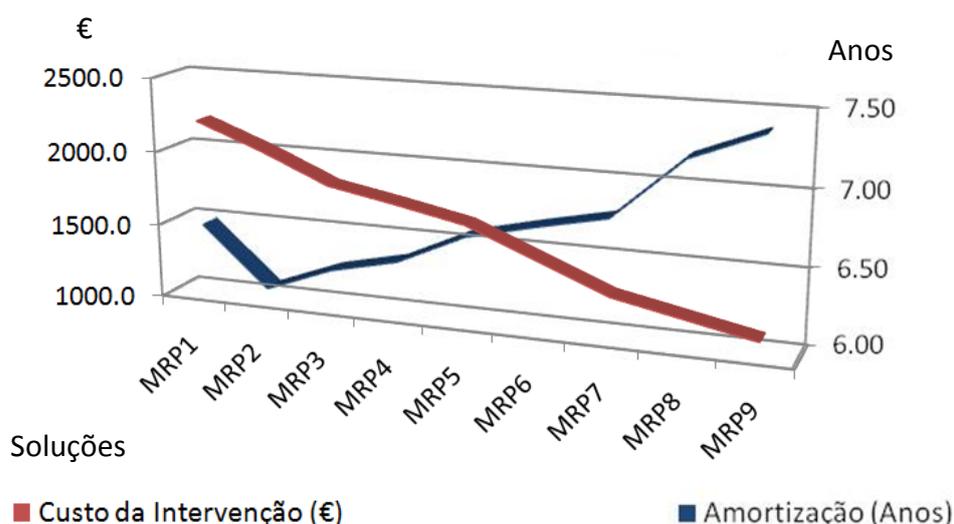


Figura 6.19 – Custo da intervenção Vs Amortização do investimento



Para determinação do fluxo de caixa anual (cash flow) foram aplicados diferentes cenários para a taxa de atualização anual, baseado em diferentes estimativas para a atualização anual do preço do gasóleo doméstico. Sendo assim, foram testados diversos cenários macro económicos, desde muito favoráveis – com a taxa de atualização anual (inflação anual) em 0.5% - até cenários muito desfavoráveis – com a taxa de atualização anual em 6%.

Através do estudo económico detalhado realizado foi verificado que:

- A taxa interna de retorno varia entre os 17% e os 8%, verificando-se assim que a aplicação do MRP não seria rentável quando apenas se consideram taxas de atualização reduzidas para a solução MRP 8 e 9 – Figura 6.20;
- As necessidades energéticas evitadas com a aplicação do módulo MRP ao fim de 18 anos, variam entre os 9000€ (MRP1) e os 1900€ (MRP9), verificando-se que quanto maior é o nível de isolamento, maior implicação no valor das necessidades evitadas tem a taxa de atualização – Figura 6.21;
- Calculando o valor médio de VAL e MTIR para as diferentes taxas de atualização, verifica-se que a aplicação de qualquer solução do MRP é economicamente viável – Figura 6.22.

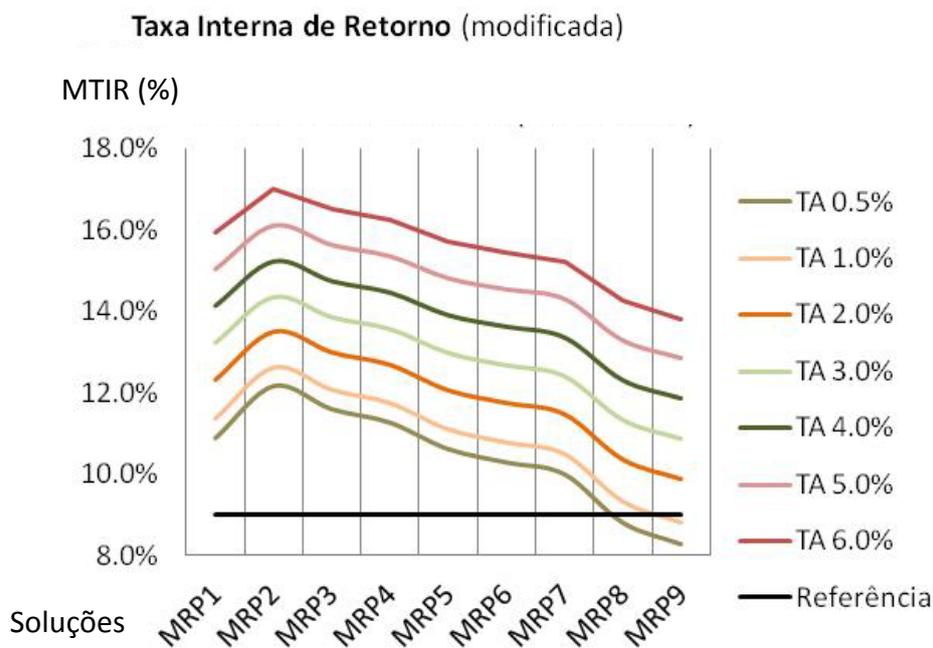


Figura 6.20 – MTIR para as diferentes alternativas do MRP com diferentes cenários de taxas de atualização





### 6.3.4 Avaliação do desempenho higrotérmico

Com o objetivo de otimizar o desempenho higrotérmico do módulo MRP, foram comparadas duas soluções do mesmo, a solução base do módulo (Figura 6.4) e a solução alternativa atrás referida (Figura 6.18) relativamente à presença de pontes térmicas e ocorrência de condensações no interior do módulo.

#### 6.3.4.1 Verificação da ocorrência de Pontes Térmicas

As pontes térmicas são zonas da envolvente onde, devido à geometria ou aos materiais aplicados, existe uma heterogeneidade relativamente à zona corrente. Essa heterogeneidade pode originar um aumento de perdas térmicas, assim como de outras patologias, pelo que deve ser evitada.

Considerando o módulo MRP, tanto a solução base como a alternativa, apresentam uma zona de ponte térmica que é a que corresponde à zona de ligação entre os painéis. Como tal, é fundamental que se analise o fluxo de calor ao longo de toda a secção do módulo de forma a quantificar a importância desta ponte térmica. Para tal, foi aplicada a ferramenta de simulação THERM (Finlayson, 1998), a qual usa um modelo 2D de transferência de calor baseado no método de elementos finitos.

Conforme é possível observar na Figura 6.23, para além da zona de ligação entre módulos (2) foi também analisada a zona de ligação entre o módulo e a estrutura de suporte (1).

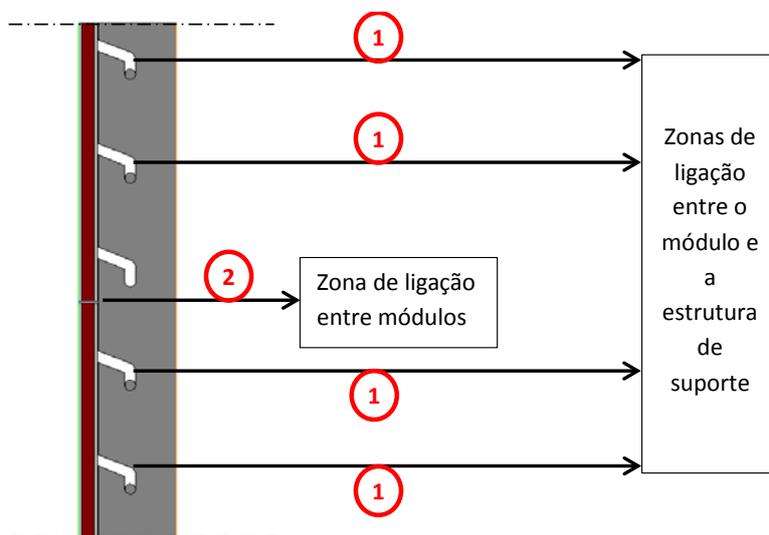


Figura 6.23 – Secção onde o painel encaixa na estrutura de suporte

Com o apoio da ferramenta THERM, foi possível obter os diagramas ilustrando a magnitude do fluxo de calor ao longo do módulo, imagens infravermelhas representando a variação da temperatura ao longo do módulo e um esquema com as linhas isométricas aplicadas ao longo

do módulo, considerando a solução base (Figura 6.24) e a solução alternativa (Figura 6.25) do módulo MRP.

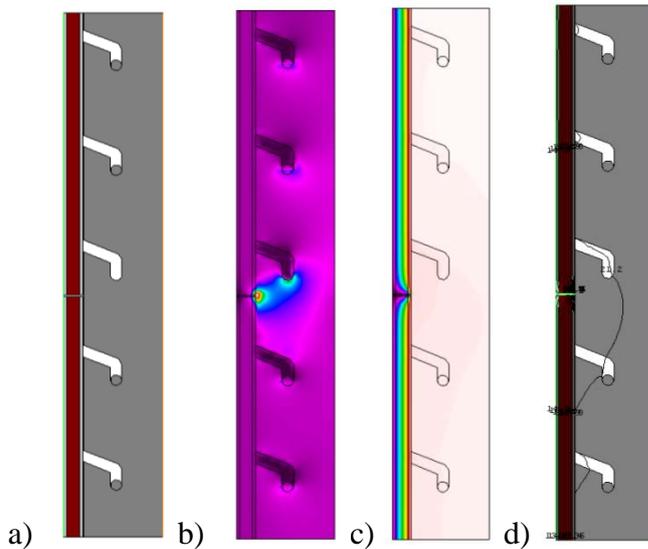


Figura 6.24 – Módulo MRP – solução base: módulo colocado na estrutura de suporte – a) secção do módulo; b) magnitude do fluxo; c) diagrama de infravermelhos; d) linhas isotérmicas

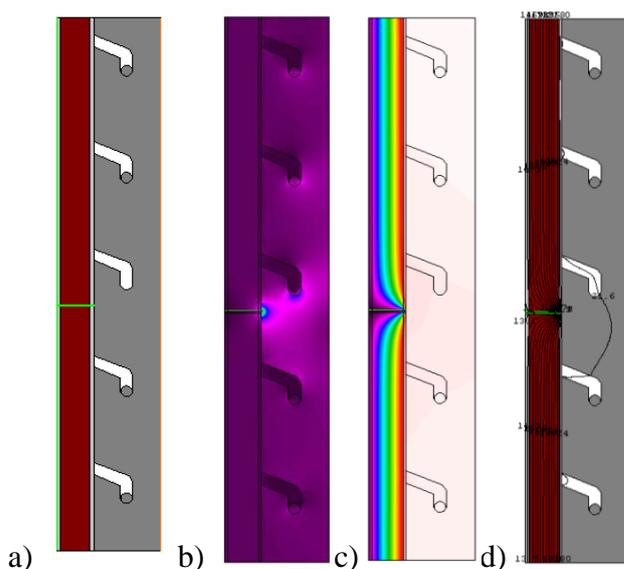


Figura 6.25 – Módulo MRP – solução alternativa: módulo colocado na estrutura de suporte – a) secção do módulo; b) magnitude do fluxo; c) diagrama de infravermelhos; d) linhas isotérmicas

Através dos esquemas produzidos é possível observar que:

- As zonas com maior fluxo de calor são: a zona de encaixe entre módulos; e a zona de encaixe entre o módulo e a estrutura de suporte. No entanto para a solução alternativa a magnitude deste fluxo é consideravelmente inferior;
- A variação da temperatura ao longo do interior do módulo (desde a superfície exterior até à superfície interior) tem uma evolução linear do exterior para o interior, exceto na



zona de ligação entre os módulos, onde a temperatura exterior tem uma maior influência na temperatura ao longo do interior módulo, para ambas as soluções;

Para uma melhor análise da evolução das linhas isotérmicas ao longo dos módulos, foi feita uma simulação específica na zona de encaixe entre os módulos (Figuras 6.26 e 6.27)

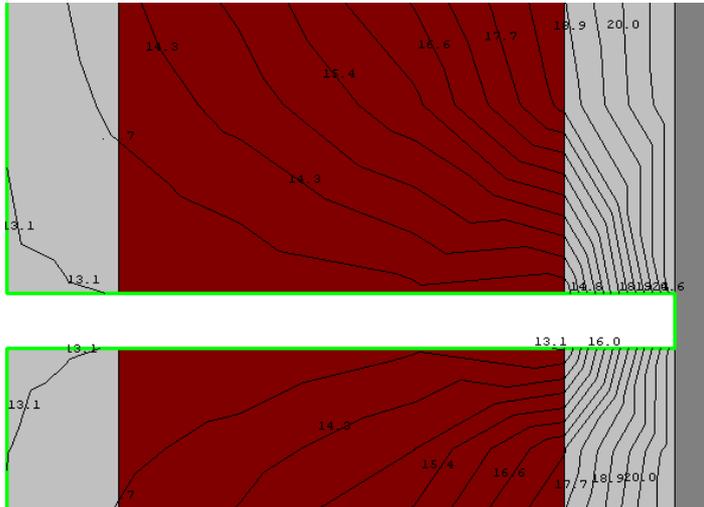


Figura 6.26 – Módulo MRP – solução base - Detalhe das linhas isotérmicas

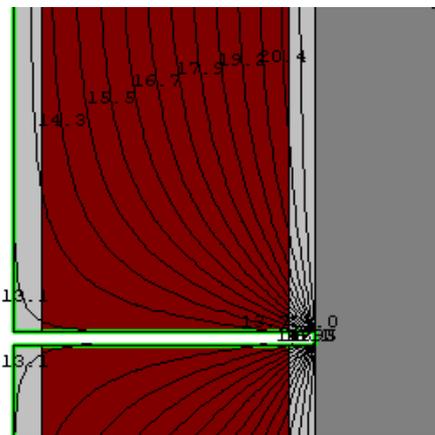


Figura 6.27 – Módulo MRP – solução alternativa - Detalhe das linhas isotérmicas

Os diagramas de linhas isotérmicas mostram uma clara convergência das linhas isotérmicas para a zona de encaixe entre os módulos.

No entanto, verifica-se que, especialmente para o caso do módulo otimizado, as linhas são paralelas entre si. Tal indica que a transferência de calor ocorre essencialmente apenas numa direção, o que representa um bom indicador de desempenho pois reduz a possibilidade de ocorrência de patologias associadas a condensações.

A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos para o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) da secção analisada pela ferramenta THERM – Secção U1 (conforme Figura 6.17 e Tabela 6.2), ou seja, a zona de encaixe entre módulos, para ambas as soluções do MRP.

**Tabela 6.5 – Coeficiente de transmissão térmica das soluções**

Solução	Coeficiente de transmissão térmica (U) [W/m <sup>2</sup> °C]
Solução base	1,048
Solução alternativa	0,713

Para a secção analisada, a solução alternativa possui um valor de coeficiente de transmissão térmica inferior ao valor obtido para a solução base. Tal significa que, nesta secção, a transferência de calor entre a superfície interior e a superfície exterior é menor, evitando-se as perdas/ganhos de calor e a presença de pontos críticos, com maior possibilidade da ocorrência de condensações.

#### **6.3.4.2 Verificação da ocorrência de condensações**

Para analisar possíveis problemas causados pela humidade foi usada a ferramenta WUFI® (Wärme- und Feuchtetransport instationär), que permite o cálculo em simultâneo da evolução da humidade e temperatura ao longo de um ano, num determinado elemento do edifício (Künzel, 2001).

Foram analisadas as diferentes secções dos módulos, correspondentes a diferentes composições que o painel apresenta ao longo da sua estrutura, por exemplo, a zona corrente, a zona de vazio para passagem de tubagens e a zona de tubagens moldadas (Figura 6.10). Contudo apenas é apresentada a análise feita à secção de corte central do módulo MRP (zona corrente), assim foram avaliadas todas as secções identificadas na Figura 6.17 e Tabela 6.2 exceto a secção U7 (zona de passagem de tubagens).

A visualização da evolução do teor de humidade, humidade relativa e temperatura ao longo do tempo de simulação definido, pode ser feita relativamente à secção transversal da solução em estudo ou a um determinado ponto pré-definido.

A análise com a ferramenta WUFI teve como base uma secção de corte central do módulo (zona corrente) da solução base e da solução alternativa do módulo MRP, representadas na Figura 6.28 e 6.29.

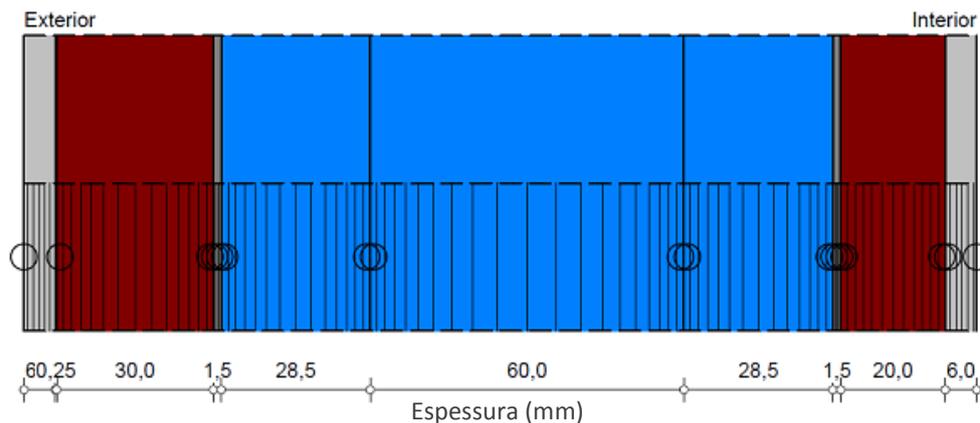


Figura 6.28 – Secção transversal do módulo MRP em zona corrente – solução base

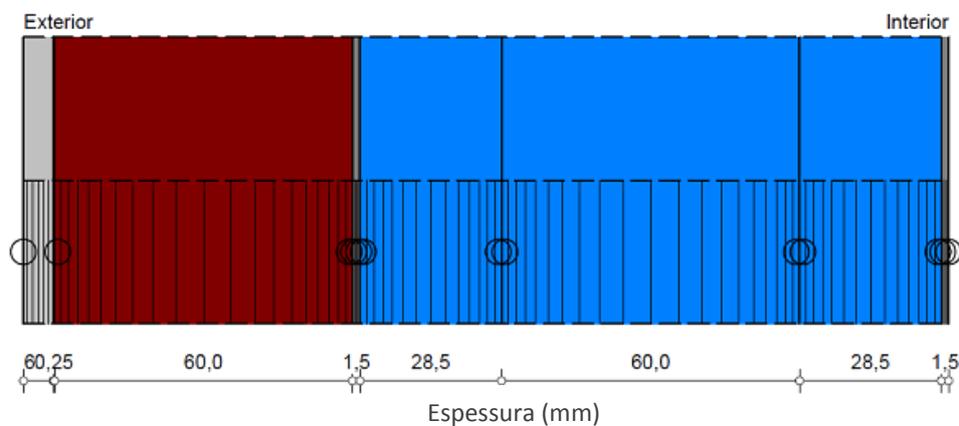


Figura 6.29 - Secção transversal do módulo MRP em zona corrente – solução alternativa

A ferramenta simula durante um período de tempo definido pelo utilizador e ao longo da secção as variações de temperatura (vermelho), a variação da humidade relativa (verde), e a água acumulada devido a condensação (azul).

A simulação foi realizada com a aplicação de um ficheiro climático de Lisboa (única localização Portuguesa disponível pela ferramenta, no momento), o qual é representativo das condições climáticas médias ao longo dos últimos 20 anos. As condições interiores consideradas foram as recomendadas pelo regulamento energético (RCCTE):

- Temperatura interior de 20 ° C (valor da temperatura interior de conforto recomendada, pelo regulamento Português, para a estação de aquecimento);
- Humidade relativa de 50%

Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 6.30 e 6.31.

Em ambas as soluções os valores de humidade relativa encontram-se maioritariamente entre os 60% e os 80% e a barreira para-vapor existente ajuda a controlar a quantidade de vapor que atravessa a parede, minimizando assim a possibilidade de ocorrência de condensação

intersticial. A condensação facilita a proliferação de fungos e bactérias, o que pode prejudicar o desempenho da solução. Como se pode comprovar pelo gráfico da Figura 6.18, não se prevê a ocorrência de condensação em qualquer uma das soluções em estudo.

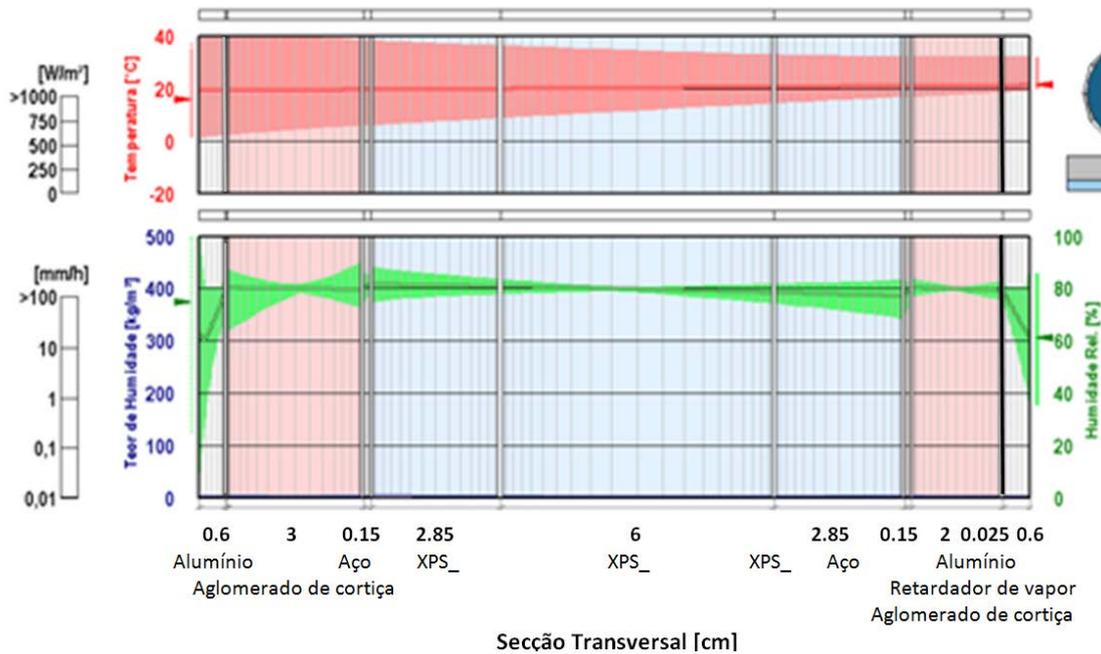


Figura 6.30 - Resultados obtidos para a temperatura e humidade ao longo da secção transversal do MRP em zona corrente – solução base

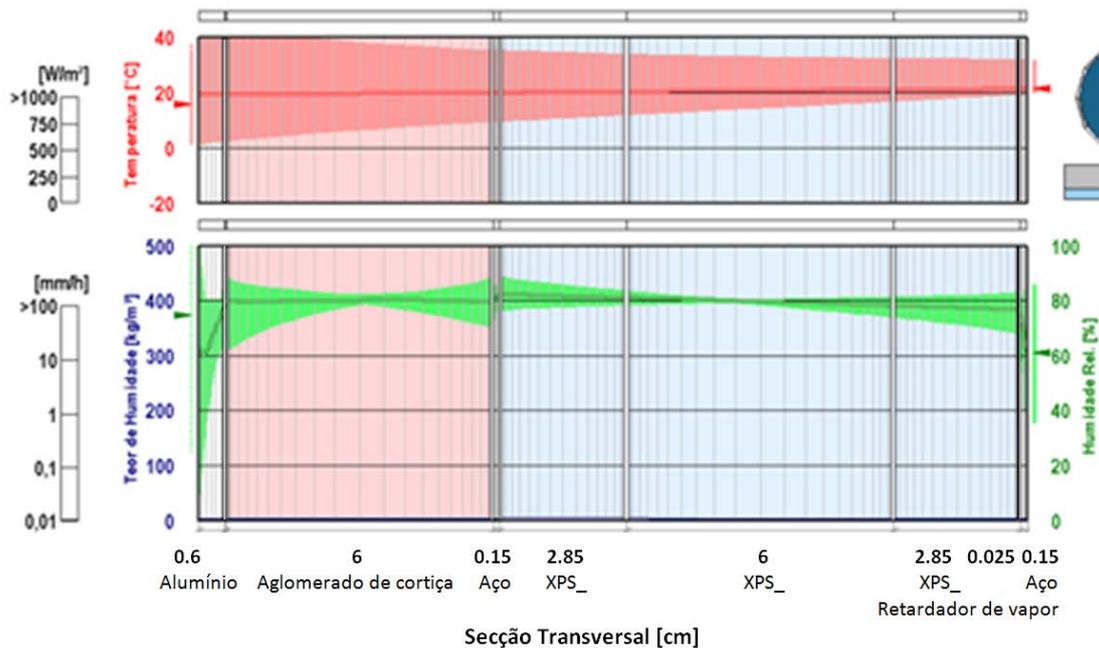


Figura 6.31 - Resultados obtidos para a temperatura e humidade ao longo da secção transversal do MRP em zona corrente – solução alternativa



## 6.4 CONCLUSÕES

O Módulo de Reabilitação Prefabricado (MRP) foi pensado tendo em conta as necessidades que atualmente emergem no mercado da reabilitação: qualidade, versatilidade, eficiência, rapidez de execução e montagem, baixo custo, baixa incomodidade para os utilizadores do edifício em causa aquando da sua aplicação e questões ambientais.

O painel é composto por materiais leves, tem uma dimensão de 1,0 m de comprimento por 1,0 m de altura e um peso de 12 kg/m<sup>2</sup> o que permite uma maior facilidade de transporte, manuseamento e montagem. Possui uma estrutura de suporte que é fixada à fachada onde o painel é posteriormente encaixado.

Com a aplicação do módulo MRP é possível atingir padrões energéticos para os edifícios existentes mais aproximados aos edifícios novos, através de soluções com um design apelativo.

Adicionalmente os módulos MRP permitem a integração de tubagens, condutas ou outras instalações elétricas, pelo interior do módulo, tornando mais simples a integração de novos sistemas de climatização e ventilação, assim como as redes elétricas.

Com o estudo paramétrico de otimização da relação custo-benefício do nível de isolamento a aplicar ao módulo MRP foi possível identificar que a melhor solução deverá possuir 12 cm de isolamento XPS e 5 cm de isolamento em aglomerado de cortiça, ou seja, a solução identificada como solução base do MRP.

Foi utilizada a ferramenta de simulação THERM para perceber quais os pontos de maior fragilidade relativamente a pontes térmicas e a ferramenta de simulação WUFI permitiu verificar um bom comportamento higrotérmico sem ocorrência de condensações.

Através do estudo comparativo efetuado com o apoio das ferramentas de simulação, foi possível avaliar o desempenho de duas soluções para o módulo MRP, tendo-se concluído que a melhor solução seria a solução alternativa, ou seja, aquela com uma maior espessura de isolamento em aglomerado de cortiça pelo exterior (solução base 3cm -> solução alternativa 6cm) e sem a camada de revestimento interior e o isolamento em aglomerado de cortiça pelo interior, uma vez que a solução alternativa, embora apresentando índices ligeiramente inferiores quanto à relação custo-benefício, permite minimizar significativamente as pontes térmicas na zona de encaixe entre módulos, e assim evitar a ocorrência de algumas patologias comuns em zonas de pontes térmicas, tais como as condensações.



Para a validação do desempenho do módulo – em termos térmicos e mecânicos – e verificação da efetiva presença de pontes térmicas na solução base do MRP, foram feitos vários protótipos e conduzida uma campanha de monitorização do seu desempenho. Esta campanha será apresentada no próximo Capítulo.

Assim, de forma a possibilitar a seleção da solução final para o módulo MRP vão ser considerados os estudos numéricos realizados no presente capítulo – verificação da espessura de isolamento ótima e o desempenho higrotérmico – mas também os resultados obtidos com a medição do desempenho térmico e mecânico dos protótipos do módulo MRP.





## **CAPÍTULO 7 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MÓDULO DE REABILITAÇÃO PREFABRICADO**

*"Saber é compreendermos as coisas que mais nos convém." - Friedrich Nietzsche, Filósofo.  
Alemanha, 1844 // 1900"*



## 7.1 INTRODUÇÃO

O presente Capítulo apresenta a produção dos protótipos da solução de reabilitação prefabricada – MRP – para a avaliação do desempenho da mesma. Assim, são expostos os motivos pelo qual foi considerado fundamental a realização desta validação do desempenho do módulo. Seguidamente apresenta-se os procedimentos para a produção dos protótipos, assim como a metodologia de avaliação e resultados obtidos, nomeadamente para a avaliação do desempenho energético e mecânico.

## 7.2 MOTIVAÇÃO

A avaliação do desempenho da solução de reabilitação apresentada é um ponto fulcral para a demonstração do potencial de aplicação do mesmo, e também para garantir que cumpre os seus objetivos funcionais e técnicos. Pretende-se saber se o módulo tem efetivamente uma aplicação simples, se o encaixe entre o módulo e a estrutura de suporte foi corretamente dimensionada e se o módulo é eficaz na redução das trocas de calor entre o exterior e o interior e se este é adequado para utilizar com segurança nas fachadas dos edifícios.

Com este propósito foi necessário a produção de diversos protótipos da solução em desenvolvimento, assim como criar metodologias de medição adequadas para a verificação do desempenho térmico e mecânico da solução.

Assim, considerando que o objetivo principal do módulo é o aumento da resistência térmica das paredes de fachada dos edifícios, é essencial a realização de ensaios térmicos aos protótipos do módulo para avaliar o seu desempenho real. No entanto, é também essencial verificar a segurança na sua utilização tendo sido, para tal, executados alguns ensaios mecânicos ao módulo.

Os ensaios realizados com os protótipos dos módulos MRP, seus objetivos e local de realização dos mesmos foram os seguintes:

- Ensaio de avaliação do desempenho térmico: o objetivo desta avaliação foi determinar o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) e detetar pontes térmicas existentes nos protótipos. Os protótipos foram montados nas Células de Teste de Edifícios não Convencionais da Universidade do Minho;
- Ensaio de avaliação do desempenho mecânico do módulo: o ensaio realizado foi o de resistência ao impacto de corpo duro, para garantir a ausência de problemas

relacionados com o desempenho do painel enquanto elemento exterior das paredes da fachada dos edifícios. Os testes foram também realizados no Laboratório de Física e Tecnologia das Construções da Universidade do Minho.

### 7.3 PRODUÇÃO DOS PROTÓTIPOS

A produção dos protótipos do módulo MRP foi realizada em Março de 2010, nas instalações da empresa DST, S.A., e teve a participação do autor, assim como do Eng.º Vasco Mesquita e mais três colaboradores da DST.

Por forma a produzir os protótipos, depois de concluído o mapa de quantidades (Anexo III.1) e encomendados as respetivas matérias-primas, apenas foi necessário proceder ao corte dos mesmos (isolamentos e placas de alumínio) na serralharia da DST, e montagem e colagem final dos diversos componentes.

Assim, a produção dos módulos passou pelos seguintes processos:

- Produção de perfis-U em aço e estrutura de suporte (Figuras 7.1);
- Aplicação do isolamento térmico XPS nos perfis-U em aço (Figura 7.5);
- Produção do revestimento de alumínio em forma de caixa (Figura 7.6);
- Aplicação da barreira para-vapor e isolamento de cortiça na caixa de revestimento de alumínio (Figura 7.6);
- Ligação do revestimento de alumínio com os perfis-U em aço (Figura 7.5 e 7.6);

Com vista à produção da estrutura de suporte do MRP foi necessário proceder ao dimensionamento da estrutura (Figura 7.2) e as dimensões do entalhe para encaixe do módulo MRP à estrutura de suporte (Figura 7.3), assim como ao estudo da localização dos parafusos para fixação da estrutura à fachada existente (Figura 7.4).



Figura 7.1 - Perfis-U em aço (esq.) e estrutura de suporte (dir.)

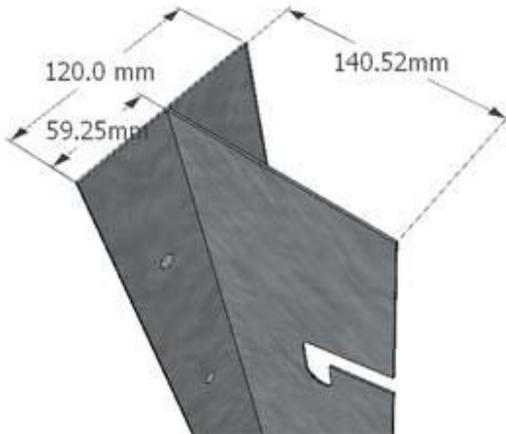


Figura 7.2 – Dimensões da subestrutura de suporte metálica (perspetiva).

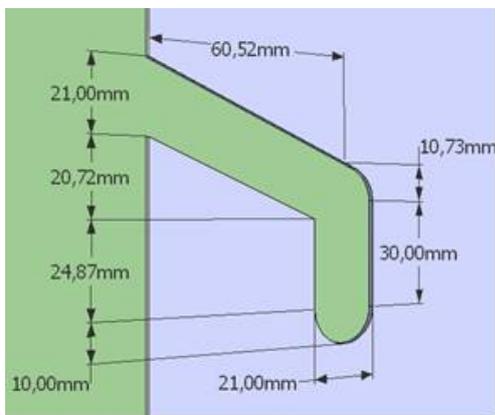


Figura 7.3 – Pormenor do entalhe na estrutura metálica de suporte.

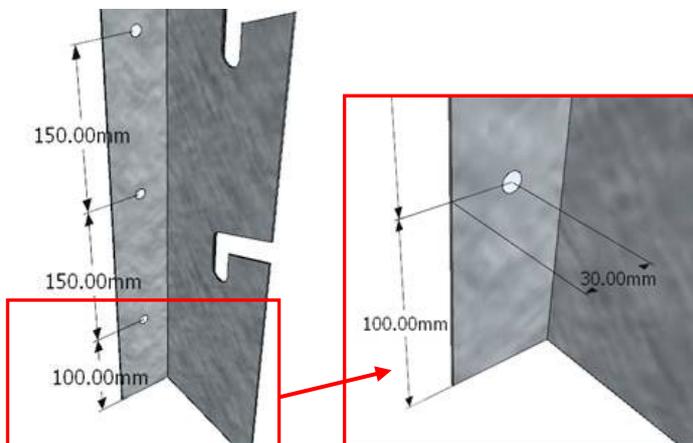


Figura 7.4 – Localização dos parafusos de ligação das peças da subestrutura à parede existente.

A aplicação do isolamento térmico (XPS) nos perfis-U em aço foi executada através do encaixe por pressão do isolamento no interior do perfil-U.

Através da produção do revestimento de alumínio em forma de caixa foi possível aplicar a barreira para-vapor e o isolamento de cortiça apenas por colocação destas no interior da caixa.



Figura 7.5 – Ligação isolamento XPS com Perfis-U em aço (esq.); revestimento em alumínio em forma de caixa com isolamento de cortiça (centro); colagem do revestimento ao perfil-U (dir.)

A ligação do revestimento, contendo a barreira para-vapor e o isolamento de cortiça, foi realizada com a utilização de cola de contacto em ambas as superfícies.



Figura 7.6 – Aplicação da barreira pára-vapor (esq.); protótipo finalizado (dir.)

## 7.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO

### 7.4.1 Definição da metodologia de avaliação

A avaliação do desempenho térmico dos protótipos da solução de reabilitação MRP foi executada através da aplicação dos mesmos a uma parede interior das Células de Teste Multifuncionais, as quais são um conjunto de três células, com forma retangular (Figura 7.7), com a seguinte constituição:

- Célula de teste convencional (CTC) – apresentando soluções típicas da construção tradicional Portuguesa, tal como paredes exteriores duplas de alvenaria de tijolo com 4 cm de isolamento na caixa-de-ar ( $U = 0.45 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ );
- Célula de teste não convencional (CTnC) – apresentando soluções não convencionais, com objetivo de utilizar materiais com menor energia incorporada e de disponibilidade local, podendo encontrar-se uma parede exterior de terra compactada ( $U = 2.9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ); parede exterior dupla de terra compactada, isolamento de aglomerado negro expandido e placa de fibrocimento ( $U = 0.34 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ); e parede



exterior de placa de fibrocimento, caixa-de-ar, isolamento de aglomerado negro de cortiça e isolamento de fibras de coco ( $U = 0.96 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ );

- Célula de teste tipo Passys (CTP) – apresentando elevadas espessuras de isolamento de forma a simular um compartimento adiabático, e assim testar soluções de fachada, ou outras, relativamente à sua performance térmica e lumínica;

A Figura 7.7 apresenta o alçado frontal das Células de Teste.



Figura 7.7 – Fachada Sul das células de teste e pormenor do interior da célula de teste Passys com parede para teste

Os protótipos foram aplicados na CTP, a qual é formada por dois compartimentos. O primeiro foi o local onde se realizaram os testes, enquanto o segundo foi aquele onde se encontrava o sistema de medição.

De forma a instalar os módulos MRP nas células de teste, foi executada uma parede de compartimentação em alvenaria no compartimento 1 desta célula de teste (Figura 7.7). No entanto, devido à atual conjuntura económica e de forma a despender menos fundos, foi decidido apenas introduzir três protótipos do MRP nesta parede, tendo estes de ser ladeados por placas de isolamento com espessura similar ao MRP para forçar o fluxo de calor entre os compartimentos a seguir um comportamento linear, resultando assim num processo de trocas de calor igual ao que ocorreria caso fossem aplicados módulos MRP em toda a parede de compartimentação. A parede de compartimentação está colocada perpendicularmente à fachada principal e a meio desta.

Os módulos foram aplicados a meio da parede sendo posicionados topo-a-topo e lado-a-lado, conforme ilustrado na Figura 7.8.

A avaliação do desempenho térmico do painel foi realizada de acordo com as normas ASTM - C1046, 1995 “Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components” e a norma ASTM - C1155, 1995 “Standard Practice for

Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data”, ambas da ASTM (American Society for Testing and Materials).



**Figura 7.8 – Colocação da estrutura de suporte, aplicação dos módulos e preenchimento com isolamento**

A norma C1046 indica os procedimentos para colocação e utilização correta dos equipamentos de medição. Para monitorizar o desempenho térmico do painel foi necessário estudar um sistema de instrumentação para aplicação nos painéis, tendo-se decidido aplicar um sistema para medição do fluxo de calor que atravessa os módulos.

Assim o sistema escolhido consistiu na aplicação de sensores de temperatura do ar e humidade relativa (Vaisala, 2008), sensores de fluxo de calor para aplicação nos painéis e parede existente (HFP01, 2007) e termopares do tipo T para medição da temperatura superficial do painel e parede existente, conforme apresentado na Figura 7.9 (Moreira, 2002).

Todos os sensores foram ligados a um datalogger (CR800/CR850, 2010) com vista ao armazenamento dos dados recolhidos.

Devido ao elevado número de sensores do sistema de medição, foi também necessário acoplar um multiplexador ao sistema (AM16/32<sup>a</sup>, 2007), o qual permite a multiplicação dos sinais de entrada para o dispositivo de armazenamento de dados, possibilitando assim a ligação de todos os equipamentos de medição. A Figura 7.9 ilustra a colocação dos diferentes tipos de sensores.

Com a ajuda de uma ferramenta de CAD 3D, Google SketchUp<sup>®</sup>, 2008 foi executado um preciso modelo 3D das Células de Teste, possibilitando verificar as medidas específicas do MRP e respetivas tolerâncias para permitir uma aplicação fácil e também para identificar o melhor posicionamento dos sensores necessários para a monitorização do sistema.

Na Figura 7.10 é possível observar os diversos sensores colocados pela face interior da parede de compartimentação, sendo estes numerados de forma sequencial. Por exemplo, os sensores



1 e 4 representam sensores de fluxo de calor. Os sensores 2 e 3 também são sensores de fluxo de calor mas encontram-se na face exterior da parede de compartimentação, não sendo, por isso, visíveis no esquema representado na Figura 7.10. Os sensores 5, 6, 7, 8 e 10 são termopares aplicados na face exterior da parede de compartimentação.

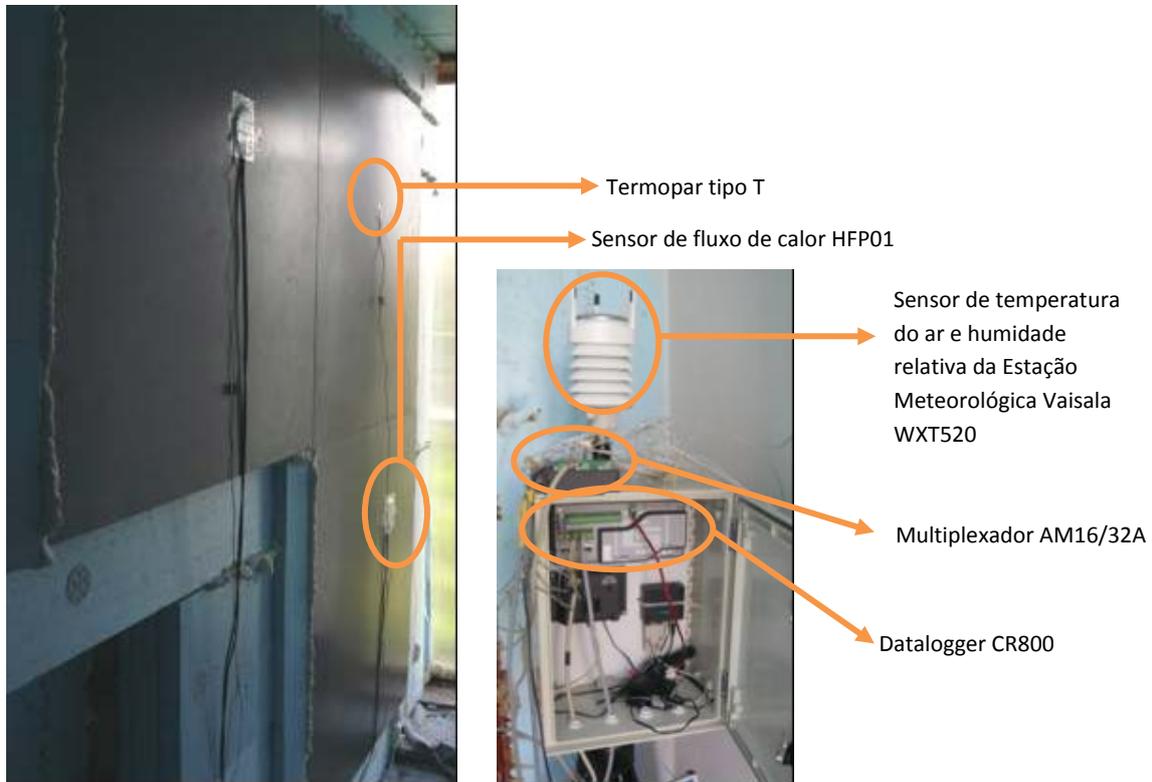


Figura 7.9 – Instrumentação dos painéis

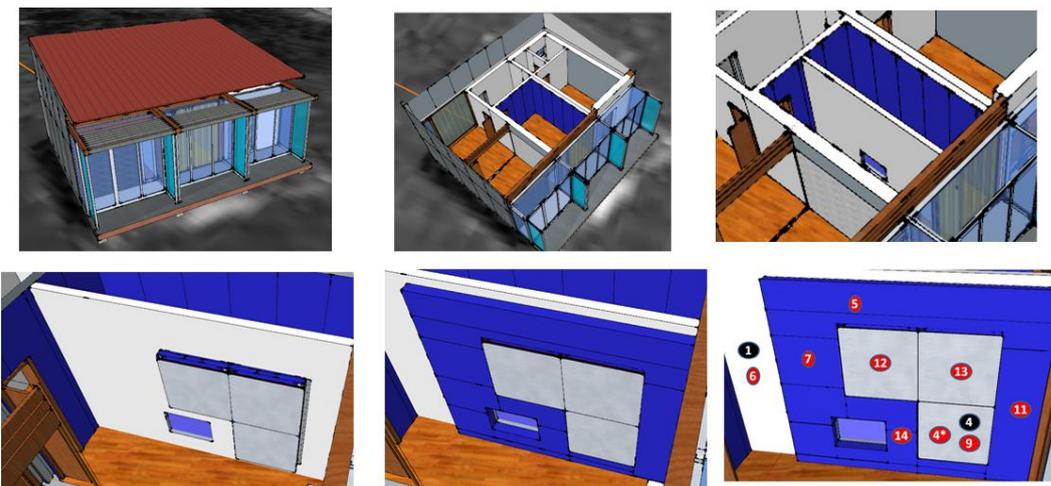


Figura 7.10 – Modelo 3D das Células de Teste e esquema da instrumentação dos painéis

Os pontos de medição foram escolhidos de forma a garantir um fluxo de calor perpendicular ao plano do painel e sem fluxo lateral de calor. A análise de resultados foi efetuada de acordo com o capítulo 6 da norma C 1155 – 95.

Sendo o fluxo de calor perpendicular ao plano do painel, a diferença de temperaturas entre as faces dos elementos é calculada através da expressão:

$$\Delta T_s = T_{is} - T_{os} \quad (7.1)$$

Onde,

$\Delta T_s$  – Diferença entre as temperaturas superficiais;

$T_{is}$  – Temperatura superficial interior;

$T_{os}$  – Temperatura superficial exterior.

De seguida, procedeu-se ao cálculo da resistência térmica do elemento recorrendo ao método da soma que se traduz na seguinte expressão:

$$R_e = \frac{\sum_{k=1}^M \Delta T_{sk}}{\sum_{k=1}^M q_k} \quad (7.2)$$

Onde,

$R_e$  - Resistência térmica do elemento;

$\Delta T_{sk}$  - Diferença de temperaturas entre as faces opostas do elemento num determinado período de tempo;

$q_k$  - fluxo de calor num determinado período de tempo.

Para testar a convergência dos valores de resistência térmica foi usada a fórmula abaixo indicada, verificando que o valor de  $CR_n$  permanece abaixo de 10% pelo menos durante três períodos.

$$CR_n = \frac{R_e(t) - R_e(t-n)}{R_e(t)} \leq 0,1 \quad (7.3)$$

Onde,

$CR_n$  - fator de convergência;

$R_e(t)$  - resistência térmica no período de tempo t;

$R_e(t-n)$  - resistência térmica no período anterior ao período de tempo t.

É ainda necessário determinar a variância para três períodos de tempo onde já tenha sido verificado o teste de convergência:



$$V(R_e) = [s(R_e) / \text{mean}(R_e)] \times (100\%) \quad (7.4)$$

Onde,

$V(R_e)$  – Variância da resistência térmica;

$s(R_e)$  – Desvio padrão da resistência térmica;

$\text{mean}(R_e)$  – Média da resistência térmica.

Se a variância  $V(R_e)$  for inferior a 10%, então pode ser utilizada a média dos valores de  $R_e$  para determinar a resistência térmica do elemento. Se for superior a 10%, significa que o método de cálculo não permitiu obter um valor de  $R_e$  aceitável para os dados analisados.

#### 7.4.2 Análise dos resultados

De forma a obter uma alta precisão na medição de fluxo de calor, foi necessário forçar uma diferença de temperatura quase constante entre os dois compartimentos da CTP. Para isso criou-se um gradiente de temperaturas na ordem dos 20°C, utilizando para tal um sistema de climatização em um dos compartimentos da CTP forçando uma temperatura de 45°C ± 5°C. Assim, com os valores da temperatura superficial interior e exterior do módulo MRP e do fluxo de calor (Figura 7.11), foi possível calcular o valor do Coeficiente de Transmissão Térmica do MRP, com uma alta precisão, considerando o intervalo de confiança do sensor de fluxo de calor (± 2% dos valores totais diários) e a calibração dos termopares (±0.5°C).

O valor de U medido para a zona corrente do MRP foi de 0,19 ± 0.004 W/m<sup>2</sup>.K e para a zona de passagem de tubagens foi de 0,30 ± 0.016 W/m<sup>2</sup>.K. Tal resultou num valor U global para o MRP de 0,23 ± 0.007 W/m<sup>2</sup>.K, conforme também previsto no Capítulo 6, ponto 6.2.4.

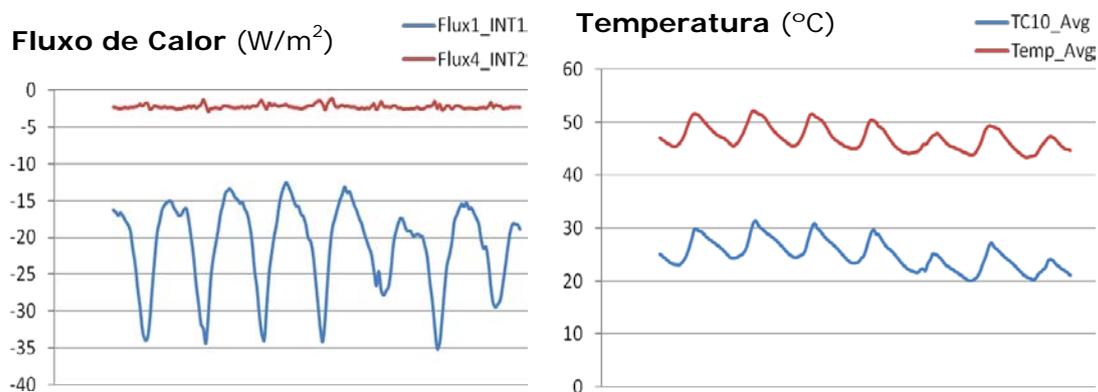


Figura 7.11 – Resultados obtidos pelo Sistema de monitorização.

Com a utilização de uma câmara termográfica foi possível obter imagens de infravermelho dos protótipos MRP (Figura 7.12). Estas mostram uma variação da temperatura superficial muito

significativa entre o módulo MRP e o restante isolamento XPS da parede de compartimentação.

Adicionalmente, verifica-se a existência de uma pequena ponte térmica na zona de ligação entre os módulos, tal como previsto pelo software THERM (Capítulo 6).

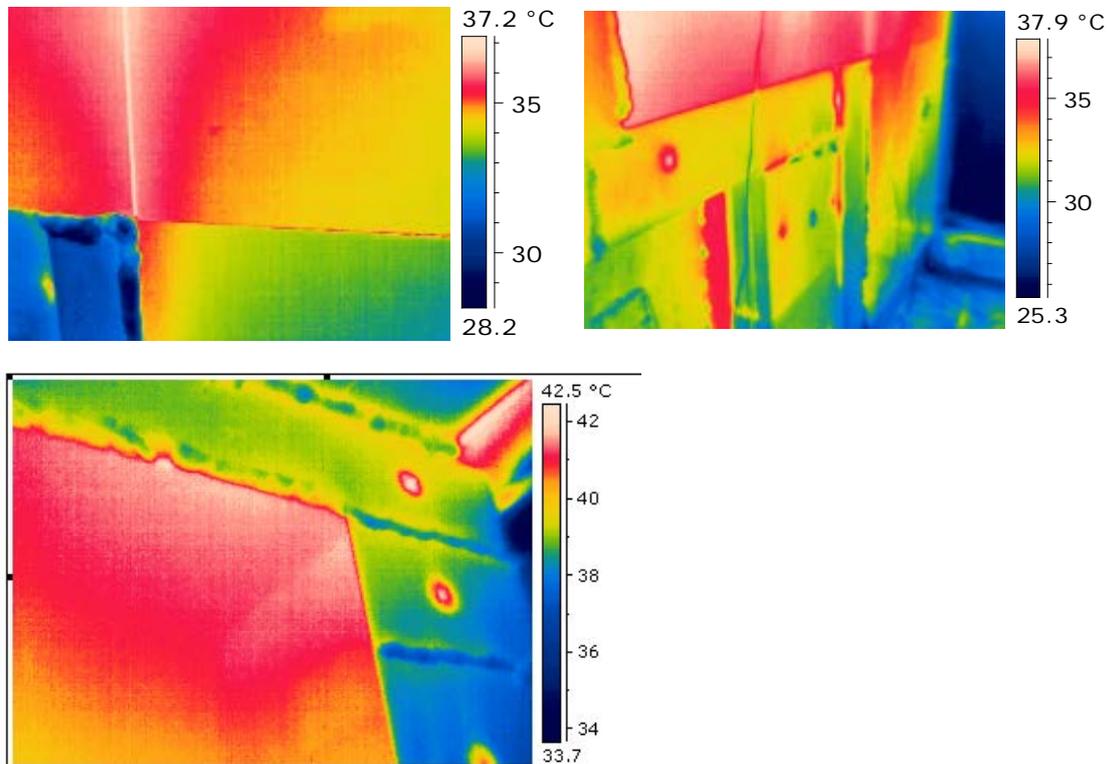


Figura 7.12 – Imagens termográficas dos protótipos MRP instalados nas Células de Teste.

Através da campanha de medições realizada entre 13/04/2010 e 25/06/2010, aos protótipos da solução MRP aplicados nas Células de Teste, foi possível validar o seu desempenho, tendo-se obtido valores de U de acordo com os previstos ( $U_{\text{medido}} = 0,230$ ;  $U_{\text{previsto}} = 0,228 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ) e detetado pequenas pontes térmicas conforme previstas com a ajuda da ferramenta de simulação THERM.

Encontram-se no Anexo IV.1 os gráficos contendo os dados de temperatura, humidade relativa e fluxo de calor, para o período total de monitorização)

## 7.5 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO MECÂNICO

### 7.5.1 Definição da metodologia de avaliação

Uma vez que o módulo de reabilitação prefabricado não é um painel estrutural mas sim um painel para revestimento de fachadas (incluindo isolamento térmico), este apenas terá de



suportar a carga resultante do seu peso próprio e as cargas resultantes de eventuais impactos que possam ocorrer na superfície exterior da fachada do edifício.

Assim, para testar a resistência do painel MRP a estes impactos foi realizado o ensaio de impacto de corpo duro segundo a metodologia descrita no Relatório Técnico da EOTA (European Organization for Technical Approvals), TR 001 – Determination of impact resistance of panels and panel assemblies (EOTA, 2003). Este ensaio, que pretende avaliar o comportamento do sistema de revestimento ao choque acidental, está dividido em dois ensaios: ensaio relativo à avaliação da segurança na utilização e ensaio relativo à aptidão à utilização.

De seguida descrevem-se sucintamente estes dois ensaios.

**Ensaio de segurança na utilização:** o objetivo do ensaio é garantir que o sistema não apresente risco de colapso devido ao choque acidental de objetos ou pessoas. Para este ensaio é utilizado como corpo duro uma esfera de aço com um diâmetro de 63,5 mm ( $\pm 1$ ) e com uma massa de 1030 g ( $\pm 40$ ) – ensaio de esfera de aço de 1 kg (Figura 7.13).



Figura 7.13 – Esfera de aço de 1kg

**Ensaio de aptidão à utilização:** o objetivo deste ensaio é garantir que o sistema apresente as características apropriadas de resistência ao choque para utilização como material de revestimento de edifícios. Para este ensaio é utilizado como corpo duro uma esfera de aço com um diâmetro de 50 mm ( $\pm 0,5$ ) e com uma massa de 514 g ( $\pm 19$ ) – ensaio de esfera de aço de 0,5 kg (Figura 7.14).



Figura 7.14 – Esfera de aço de 0,5 kg

## 7.5.2 Análise dos resultados

Conforme referido anteriormente a avaliação do desempenho mecânico do módulo MRP foi executada através da realização de dois ensaios, ou seja, o ensaio de segurança na utilização e o ensaio de aptidão à utilização. Apresentam-se de seguida as principais conclusões obtidas.

### 7.5.2.1 Ensaio de segurança na utilização

O ensaio de segurança na utilização consiste num impacto e o ponto de impacto escolhido deve ser o ponto considerado mais frágil do painel em estudo. Na Figura 7.15 identifica-se a zona de impacto selecionada, aquela que está diretamente por cima do negativo para a passagem de tubagens, considerando-se assim que esta é a zona mais crítica do módulo.



Figura 7.15 – Definição do ponto de impacto no painel

O painel é colocado horizontalmente, apoiado em suportes, para permitir que o corpo de impacto atravesse completamente o painel, no caso de um resultado desfavorável.

Para paredes exteriores o nível de energia indicado pelo Relatório Técnico (TR 001) é o apresentado na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Nível de energia indicado para ensaio de impacto de corpo duro em paredes exteriores

Ensaio	Corpo de Impacto [kg]	N.º de Impactos	Energia [Nm]	Critério
Impacto de Corpo Duro	1	1	10	Sem colapso, sem penetração e sem projeção

O corpo rígido de massa ( $m$ ) é largado de uma altura ( $h$ ), de modo que a energia total ( $E$ ) corresponda ao valor indicado pelo TR 001. O valor da Energia Total é calculado através da seguinte expressão:  $E = g \times m \times h$  (EOTA, 2003). O que significa que para um valor de energia de 10 Nm é necessário largar a esfera de 1,02 m de altura.

O resultado obtido com a realização de este ensaio foi registado fotograficamente, conforme apresentado na Figura 7.16.



Figura 7.16 – Ensaio de impacto com esfera de aço de 1kg e respetiva deformação

Neste ensaio foi verificado que o painel possui segurança na sua aplicação, pois foram cumpridos todos os critérios mencionados na norma. Não houve colapso do painel testado, a esfera não atravessou o painel e a superfície do painel oposta à superfície de ensaio não sofreu qualquer dano.

#### 7.5.2.2 Ensaio de aptidão à utilização

O ensaio de aptidão à utilização consiste em pelo menos três impactos, aproximadamente no mesmo ponto de impacto. Este ponto de impacto deve ser o ponto considerado mais frágil do painel em análise.

Os níveis de energia indicados pelo Relatório Técnico (TR 001) para paredes exteriores são apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 – Nível de energia indicado para ensaio de impacto de corpo duro em paredes exteriores

Ensaio	Corpo de Impacto [kg]	N.º de Impactos	Energia [Nm]	Critério
Impacto de Corpo Duro	0,5	3	1, 3 ou 6	Sem penetração e sem degradação

O valor da Energia Total é calculado através da expressão:  $E = g \times m \times h$  [TR001, 2003], pelo que a esfera terá de ser largada de uma altura de 0,2 m, 0,61 m e 1,22 m, conforme o indicado pela Tabela 7.3.

Tabela 7.3 – Cálculo das alturas a que deve ser largado o corpo de impacto

E [Nm]	g [m/s <sup>2</sup> ]	m [kg]	h [m]
1	9,81	0,5	0,20
3	9,81	0,5	0,61
6	9,81	0,5	1,22

Um bom resultado obtido pelo painel MRP nestes ensaios permite assegurar que o mesmo é um sistema apropriado para ser utilizado como material de revestimento exterior de edifícios assegurando uma adequada resistência a choques.

Para este ensaio foi largado um corpo rígido de 0,5 kg a diferentes alturas, tendo-se registado fotograficamente os resultados obtidos e medida a indentação provocada pelo corpo rígido (Figuras 7.17 a 7.19).



Figura 7.17 – Ensaio de impacto com esfera de aço de 0,5kg – altura de 0,20m

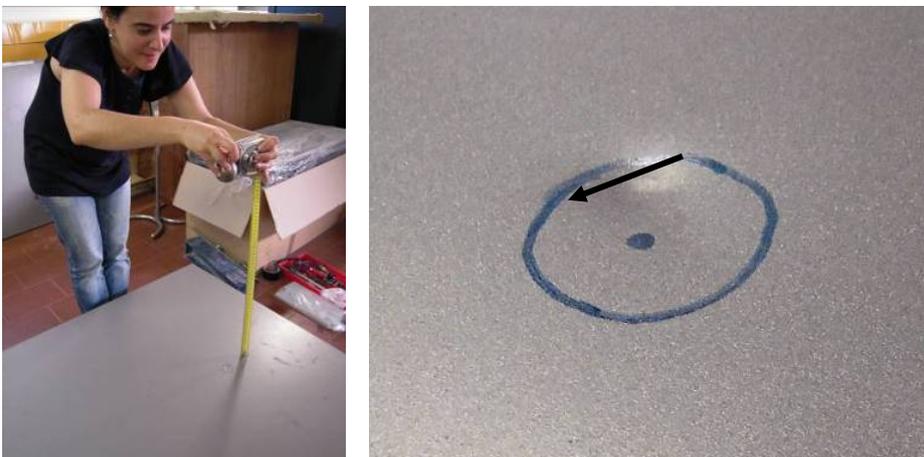


Figura 7.18 - Ensaio de impacto com esfera de aço de 0,5kg – altura de 0,61m

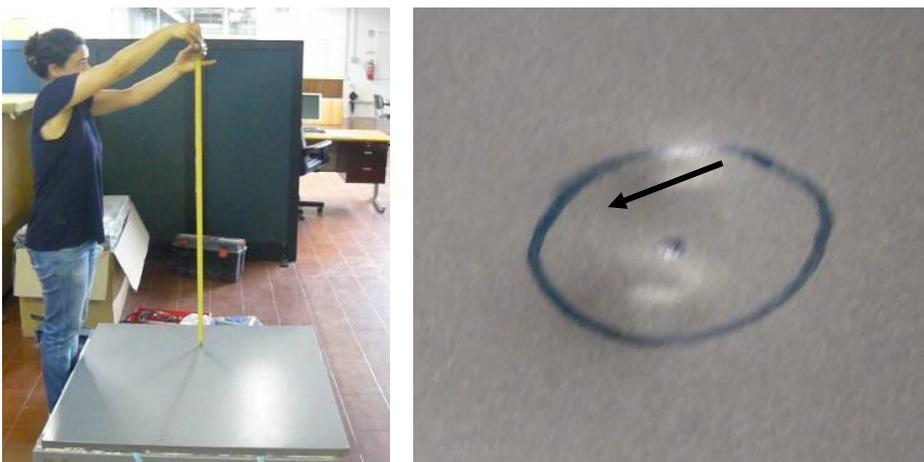


Figura 7.19 - Ensaio de impacto com esfera de aço de 0,5kg – altura de 1,22m

Após cada ensaio foi medido o diâmetro da massa e a sua profundidade máxima. Os valores registados encontram-se na Tabela 7.4.

**Tabela 7.4– Diâmetro e máxima profundidade das moças resultantes dos ensaios de impacto**

E [Nm]	h [m]	d [mm]	p [mm]
1	0,20	6	0,4
		7	0,5
		8	0,6
3	0,61	12	1,5
		14	1,6
		13	1,6
6	1,22	2	2,5
		17	3,0
		20	3,0

Como pode ser verificado através das Figuras 7.17, 7.18 e 7.19 não houve penetração do corpo de impacto no painel, nem ocorreu nenhuma degradação que possa influenciar a aptidão do painel para utilização. Apenas se verificaram pequenas moças na superfície do revestimento exterior do mesmo.

## 7.6 CONCLUSÕES

Com a construção de quatro protótipos do painel MRP, foi possível a avaliação do desempenho da solução de reabilitação desenvolvida. Para tal, os protótipos foram colocados nas Células de Teste do LFTC da UMinho para serem submetidos a ensaios térmicos e seguidamente a ensaios mecânicos de resistência ao impacto. O valor ponderado do coeficiente de transmissão térmica obtido no ensaio térmico ( $0,23 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ) encontra-se muito próximo do valor calculado ( $0,228 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ), mostrando que o método de ensaio utilizado e as características do local onde foi implementado o mesmo foram adequados ao que era pretendido, fornecendo resultados credíveis. No ensaio de resistência ao impacto de um corpo duro, verificou-se que o painel atende aos requisitos de desempenho estabelecidos pelo Relatório Técnico da EOTA – TR 001.



**CAPÍTULO 8 – Módulo de Reabilitação Prefabricado – MRP – Solução Final**

*" A busca do perfeito é a consciência do perfeito a que se dirige, atinja-o ou não, sempre, no entanto, nele morando o processo do mundo, que não é processo senão a nossos olhos." – Agostinho da Silva, Filósofo. Portugal, 1906 // 1994*



## 8.1 INTRODUÇÃO

O presente Capítulo tem como objetivo a seleção e apresentação da solução final do Módulo de Reabilitação Prefabricado, desenvolvido para a aplicação em fachadas dos edifícios existente, como forma de atualizar o desempenho energético do parque edificado para os novos padrões de eficiência energética. Para a seleção da solução final do módulo MRP, entre a solução base e a solução alternativa apresentada no Capítulo 6, foram considerados os estudos numéricos apresentados no decorrer do Capítulo 6 e a campanha de medições realizada aos protótipos da solução base do módulo MRP, apresentada no Capítulo 7.

## 8.2 MRP – SELEÇÃO DA SOLUÇÃO FINAL

Após a realização dos estudos numéricos de avaliação do desempenho de duas soluções do módulo MRP – Solução Base e Solução Alternativa – apresentados no Capítulo 6, persistiam algumas incertezas sobre qual seria a melhor solução.

Conforme apresentado no Capítulo 6, a diferença entre estas soluções é apenas uma questão de organização do isolamento de aglomerado negro de cortiça (ICB), ou seja, enquanto na solução base este isolamento se encontra dividido pela superfície interior e exterior do módulo, na solução alternativa todo o isolamento ICB encontra-se agrupado na superfície exterior do módulo, com o objetivo de reduzir as pontes térmicas presentes na zona de encaixe entre módulos.

Como tal, foram construídos diversos protótipos do módulo MRP e realizada uma campanha de medições com vista a avaliar o desempenho térmico e mecânico do módulo, mas também de forma a verificar se as conclusões obtidas através dos estudos numéricos eram válidas.

Tendo como objetivo a seleção da solução do MRP que apresente o melhor desempenho global foram utilizadas as seguintes ferramentas:

- Avaliação da presença de pontes térmicas e caracterização da sua magnitude – estudos numéricos e campanha de medições;
- Avaliação do risco de formação de condensação no interior da solução – estudos numéricos;
- Verificação do rácio custo-benefício da solução – estudos numéricos.

### 8.2.1 Avaliação da presença de pontes térmicas

O estudo da presença de pontes térmicas no módulo foi realizado inicialmente através da utilização da ferramenta THERM, para duas alternativas do módulo MRP – *solução base e solução alternativa*.

Com a utilização da ferramenta calculou-se o fluxo de calor que atravessa o módulo MRP para as diversas secções do mesmo, conforme exemplificado na Figura 8.1.

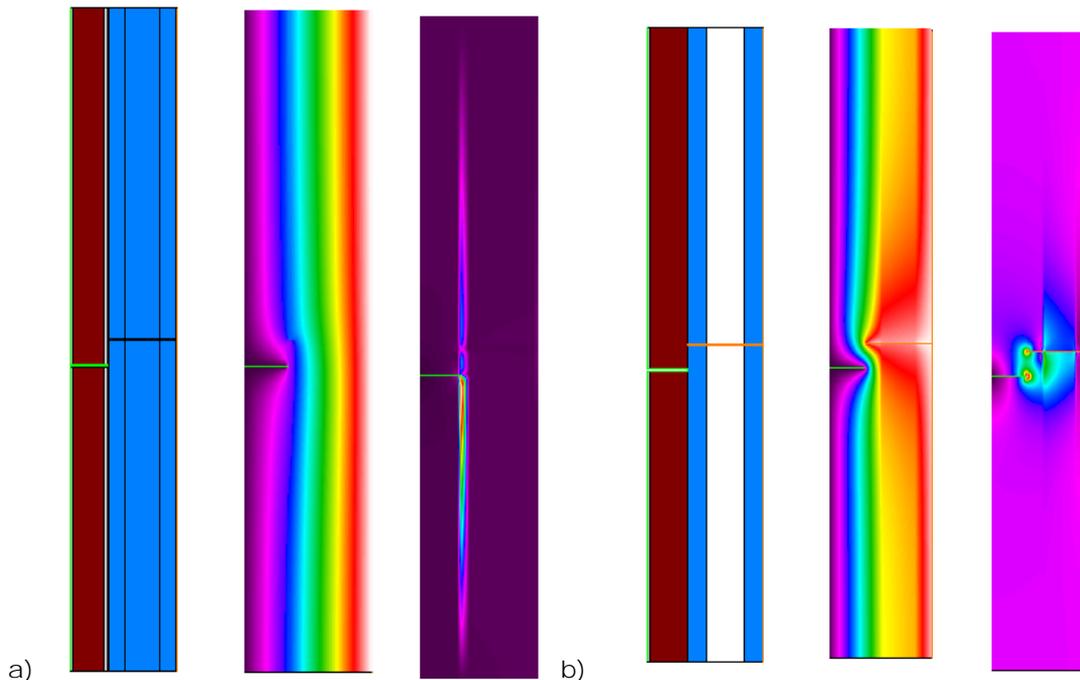


Figura 8.1 – Módulo MRP – a) fluxo de calor em zona corrente; b) fluxo de calor em zona de cavidade

As secções do módulo MRP com maior peso para o valor ponderado do U são:

- Zona corrente do módulo (representa a maior secção do módulo, na qual o isolamento e o revestimento apresentam a sua espessura total);
- Zona de Cavidade (secção que pode ter um peso significativo no valor ponderado de U e corresponde à zona onde existe a caixa de ar para passagem de condutas, tubagens ou outras cablagens);
- Zona de ligação entre módulos – ponte térmica (secção com peso relativo pouco significativo para o valor ponderado do U, no entanto com um peso relativo importante para o desempenho global do módulo).

A identificação das diferentes secções analisadas ao longo de um módulo MRP, pode ser observada na Figura 8.2.



A Tabela 8.1 apresenta os resultados obtidos para o valor do coeficiente de transmissão térmica (U) das diferentes secções do módulo MRP.

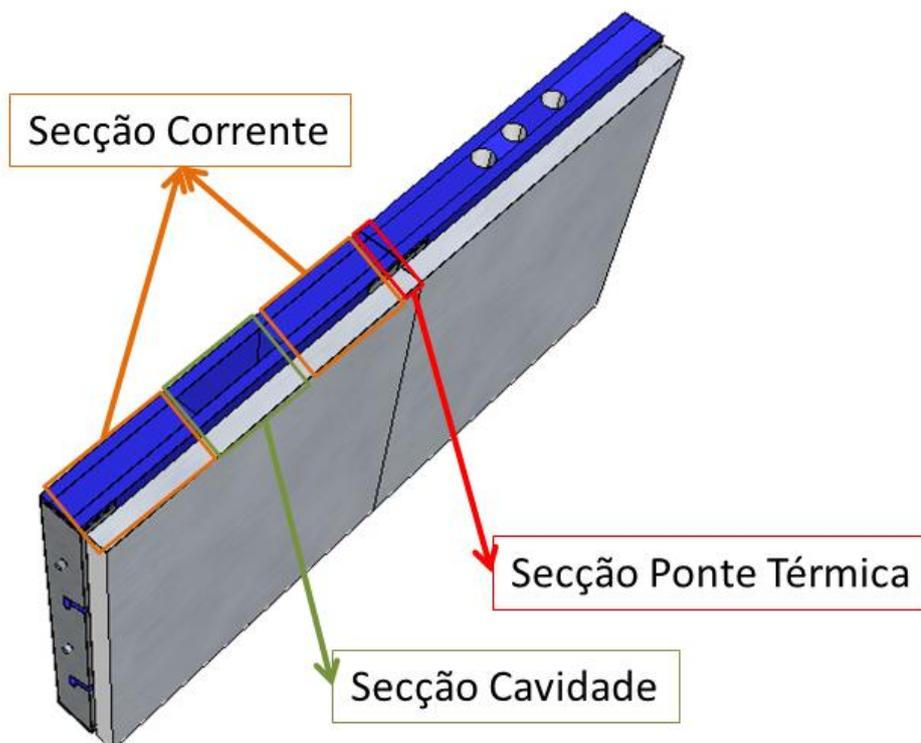


Figura 8.2 – Módulo MRP – exemplo de secções críticas

Tabela 8.1 – Coeficiente de transmissão térmica da zona de ponte térmica e corrente do MRP

Soluções	Coeficiente de transmissão térmica (U) [W/m <sup>2</sup> K]	
	MRP - Solução base	MRP - Solução alternativa
Zona Corrente	0,21	0,20
Zona de Cavity	0,33	0,32
Zona Ponte Térmica	1,10	0,71
Valor ponderado	0,23	0,21

Verificando as duas alternativas propostas é possível concluir que a solução alternativa apresenta um valor 9% inferior para o coeficiente de transmissão térmica, assim como a zona de ponte térmica tem um valor 35% inferior.

Adicionalmente, com a campanha de monitorização realizada aos protótipos da solução base do módulo MRP, foi possível confirmar a ponte térmica na ligação entre módulos, onde se verifica uma variação de 2.2°C na temperatura superficial, entre a zona corrente e a zona de ligação entre módulos, validando assim as conclusões obtidas com a utilização da ferramenta de simulação numérica THERM.

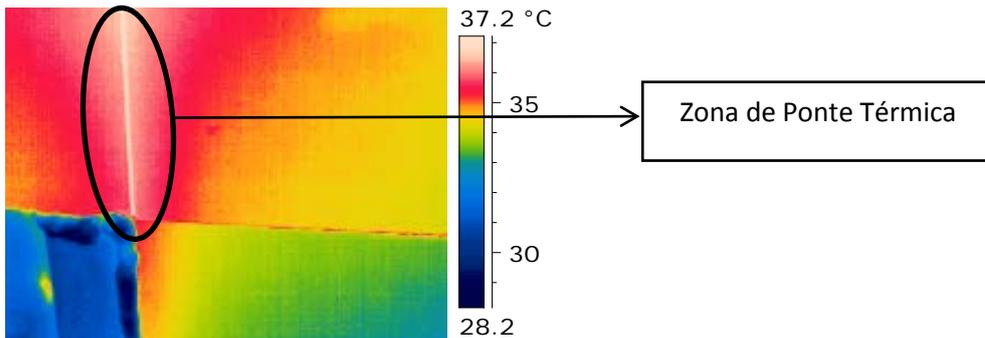


Figura 8.3 – Módulo MRP – imagem de infravermelhos para identificação de pontes térmicas

### 8.2.2 Avaliação do risco de formação de condensação

O estudo da ocorrência de condensação ao longo do módulo foi realizado com a utilização da ferramenta WUFI, para as mesmas duas alternativas para o módulo MRP – *solução base e solução alternativa*.

Através do estudo realizado, simulando a evolução das trocas de calor ao longo do módulo por um ano, com as condições interiores de referência (20°C no inverno; 25°C com 50% de humidade relativa no verão), não se prevê a ocorrência de condensações ao longo do módulo em ambas as soluções.

### 8.2.3 Determinação do rácio custo-benefício

A identificação do rácio custo-benefício foi realizada estimando o período de retorno simples (PRS) do investimento necessário para a aplicação das diferentes alternativas para a solução MRP, mas também através do valor atualizado líquido do investimento (VAL) e da taxa interna de retorno do investimento (mTIR), para uma taxa de atualização de 3.25% (valor médio das diferentes taxas de atualização aplicadas no Capítulo 6 – Secção 6.3.3). Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 8.2.

Tabela 8.2 – Análise do rácio custo-benefício do módulo MRP para diferentes soluções

Solução	Preço (€/m <sup>2</sup> )	Gasto em energia para aquecimento (€)	Poupança (€)	PRS (anos)	VAL (€)	mTIR (%)
Solução alternativa	45.00	1534.7	339.4	6.5	6500	13
Solução base	41.50	1540.3	333.8	6.1	6500	14

Através do estudo realizado, verificou-se que as soluções apresentam rácios custo-benefício muito similares, com valor de VAL iguais, valores de mTIR 1% superiores para a solução base e um período de retorno inferior para a solução base em 0.4 anos (6%).



## 8.2.4 Conclusões

Através do estudo comparativo das duas soluções alternativas para o módulo MRP – solução base e solução alternativa – verificou-se que aquela com um melhor desempenho global seria a solução alternativa, uma vez que o estudo da relação custo-benefício mostrou que esta solução apresentava um desempenho muito aproximado à solução base, mas apresentava uma redução de cerca de 35% relativamente às pontes térmicas. Assim a solução selecionada como a versão final do MRP foi a solução alternativa.

## 8.3 MRP – SOLUÇÃO FINAL

### 8.3.1 Composição

A composição da solução final do MRP é a seguinte (do exterior para o interior), conforme representado na Figura 8.4:

- Acabamento exterior de compósito de alumínio (6 mm);
- Isolamento de aglomerado negro de cortiça (60mm);
- Perfil-U em aço (1,5 mm);
- Isolamento de poliestireno extrudado (XPS – 120 mm) com ou sem tubagens ou cavidades moldadas para tubagens e cablagens;
- Barreira pára-vapor (1 mm);

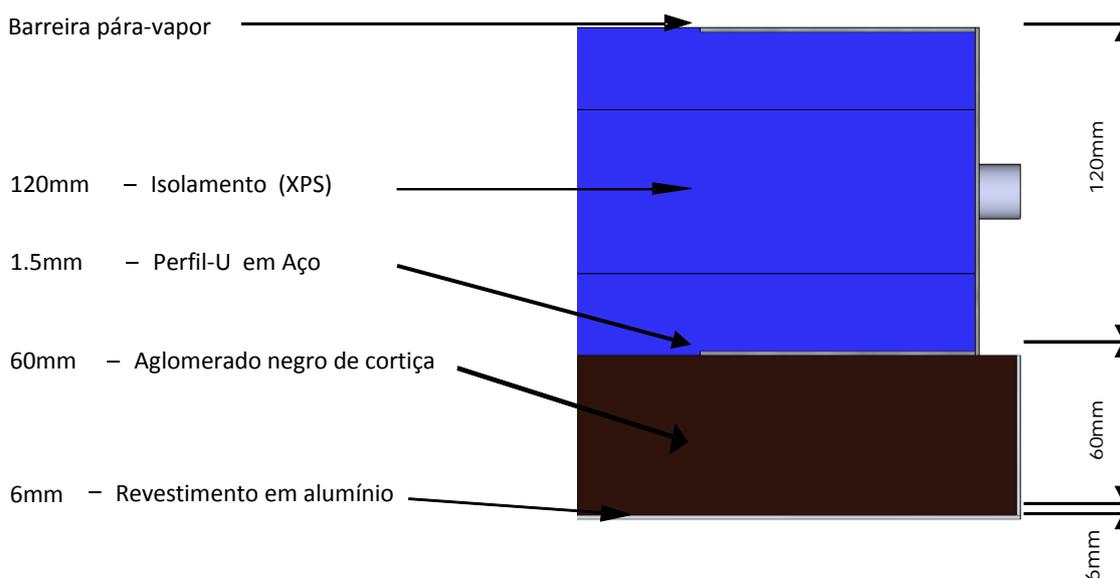


Figura 8.4 – Composição do MRP

### 8.3.2 Pormenorização

Com a solução final do módulo MRP selecionada, foi necessário atualizar a pormenorização do módulo, através de nova simulação 3D e obtenção de perspetivas, cortes e secções do módulo atualizadas, conforme representado na Figura 8.5.

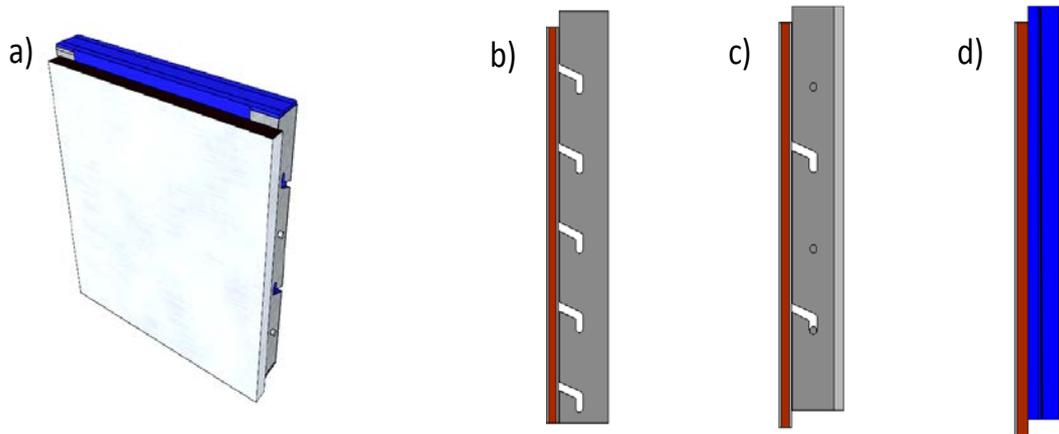


Figura 8.5 – Perspetiva 3D do MRP (a); Corte transversal com a estrutura de suporte (b); Corte transversal com o perfil-U (c); Corte transversal no centro do módulo (d).

A Figura 8.6 apresenta os três tipos de soluções do módulo MRP consoante corresponda a:

- Zona corrente da envolvente;
- Zona com vazio no isolamento (negativo) para passagem de tubagens existentes ou passagem de cablagens;
- Zona para aplicação de novas tubagens.

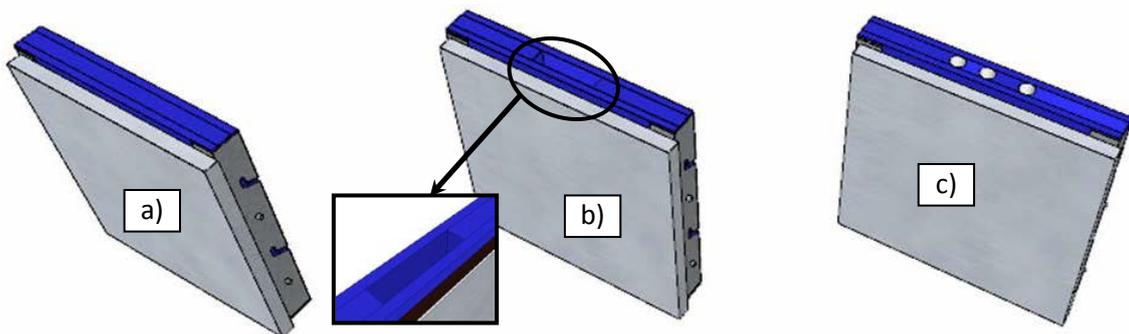


Figura 8.6 – Soluções existentes para o módulo MRP – a) base; b) com orifício para tubagens existentes ou cablagens; c) com tubagens novas.

O sistema de encaixe e aplicação do módulo nas paredes de fachada existentes é igual à solução base, ou seja, colocação de estrutura metálica na parede existente e aplicação dos módulos na mesma através dos pernos e ranhuras existente no módulo, conforme apresentado nas Figura 8.7 e 8.8.

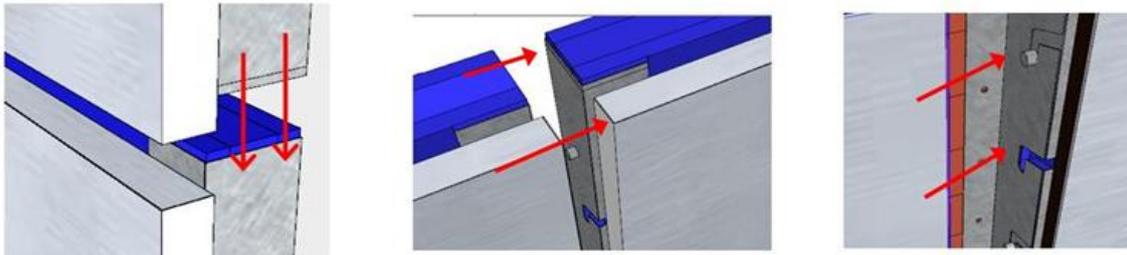


Figura 8.7 – MRP: Ligação lateral entre módulos

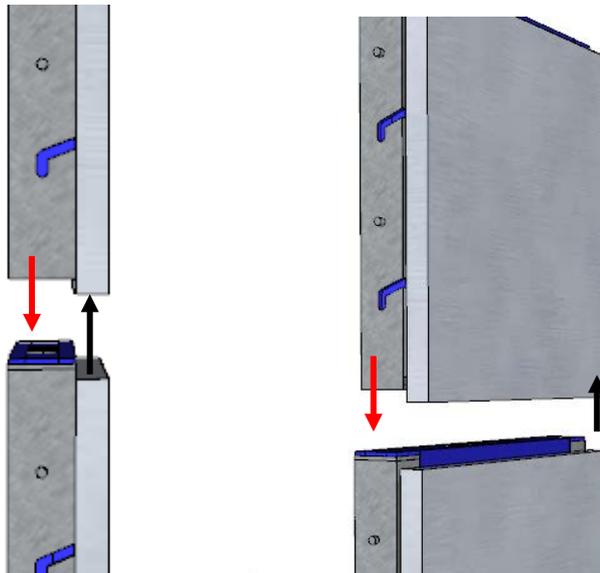


Figura 8.8 – MRP: Ligação topo/base entre módulos

Os módulos de canto e de remate para janelas e portas apresentam a mesma configuração da solução base do MRP, tal como representado na Figura 8.9.

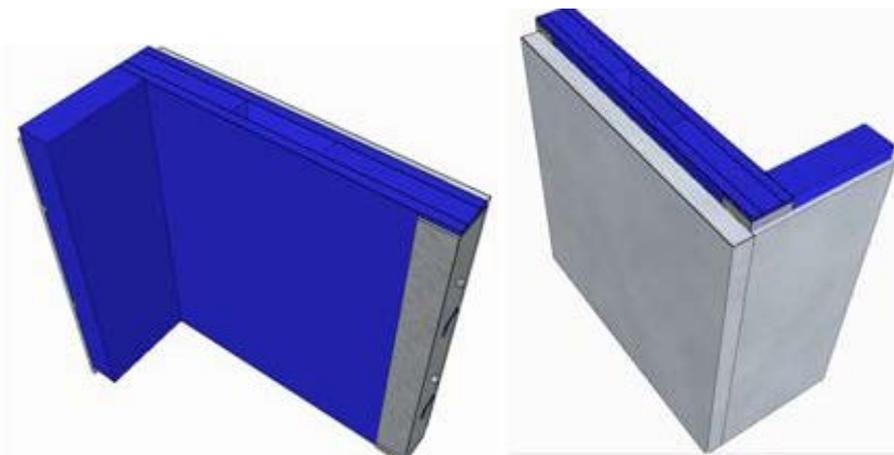


Figura 8.9 – Elemento de remate para janelas e portas

### 8.3.3 Aspetos Ecológicos

O sistema MRP foi projetado minimizando as ligações coladas e mecânicas em seu conjunto, com o objetivo de melhorar as potencialidades de reciclagem. Assim, o isolamento XPS é apenas prensado nos perfis-U e o revestimento de alumínio é sujeito a um processo de

quinagem de forma a ser alterado para uma forma de caixa, a fim de fixar o isolamento de cortiça (Figura 8.10). Ainda assim, foi necessário executar uma ligação colada entre o revestimento de alumínio e o perfil-U em aço para uma melhor distribuição dos esforços, no entanto o tipo de cola aplicada permite uma fácil separação dos materiais (Figura 8.10).



**Figura 8.10 – Interligações do módulo MRP: perfil-U com isolamento XPS (esq.); revestimento de alumínio e isolamento de aglomerado de cortiça (centro); aplicação do revestimento de alumínio (dir.)**

Para a escolha dos materiais a incorporar no módulo e na própria estrutura do módulo foram consideradas as questões ambientais. Na escolha dos materiais foi ponderada a possibilidade de reutilização e reciclagem, minimizando os impactos associados à produção do painel. Aquando da escolha foi também tida em linha de conta a energia incorporada dos materiais utilizados, isto é, a energia despendida na sua produção, no seu transporte e na sua aplicação no painel. Assim, os critérios que levaram à escolha dos materiais base utilizados na produção do módulo foram:

- O aglomerado negro de cortiça por ser um produto nacional, sem aditivos, 100% reciclável, com uma densidade de  $110 \text{ kg/m}^3$  e uma condutividade térmica de  $0,045 \text{ W/m.K}$ .
- O poliestireno extrudido (XPS) por permitir a modulação para colocação das tubagens pelo interior do painel. É também um dos materiais mais utilizados para isolamento e como tal encontra-se disponível no mercado a um preço competitivo, obedecendo às disposições ambientais europeias referidas na Diretiva EC 2037 de 29 de Junho de 2000 (EU,2000).
- O alumínio, utilizado nos revestimentos interior e exterior do painel, por ser um material 100% reciclável, leve, de grande durabilidade, resistência e flexibilidade, maleável e se encontrar disponível numa vasta variedade de cores e texturas.



### 8.3.4 Aceitação por Parte dos Utilizadores

O processo de instalação do módulo de reabilitação de fachadas nas paredes existentes do edifício é bastante rápido e fácil. Isto permite reduzir os transtornos causados aos moradores do edifício a reabilitar e envolve também um menor investimento económico uma vez que os custos de mão-de-obra são reduzidos. Estes fatores são de grande importância para a aceitação da solução por parte dos utilizadores finais.

### 8.3.5 Qualidade de execução

Uma vez que o módulo é produzido em fábrica, eliminam-se quaisquer riscos de má execução do módulo pois existe um maior controlo da sua qualidade promovendo o rigor da sua execução. A prefabricação não é influenciada por fatores como o clima, o que aumenta a rapidez de produção dos módulos.

## 8.4 CONCLUSÕES

Os estudos de otimização e avaliação do desempenho das diferentes alternativas de soluções para o módulo MRP indicaram que a melhor solução, em termos de desempenho global, era a solução otimizada do MRP.

Assim a solução final do módulo MRP é uma solução com dimensões 1m X 1m (largura X altura), peso específico de 12 kg/m<sup>2</sup>, valor do coeficiente de transmissão térmica de 0,21 W/m<sup>2</sup>.K e pontes térmicas com pouco significado.

Esta solução permite o aumento da eficiência energética dos edifícios existentes, através de processos rápidos, de elevada qualidade e sem necessidade de mão-de-obra especializada.

O estudo mais aprofundado do desempenho energético resultante da aplicação dos módulos MRP a edifícios, será apresentado no Capítulo 9, onde é incluído a verificação do desempenho energético decorrente da aplicação do módulo MRP final a dois casos de estudo selecionados, através de ferramentas de simulação energética dinâmica. Uma vez que as ações de reabilitação devem apresentar diversas medidas de reabilitação combinadas com o objetivo de atingir melhores padrões de desempenho energético e conforto, será também apresentado a reabilitação integrada dos edifícios, incluindo a aplicação do módulo MRP.



**CAPÍTULO 9 – Casos de Estudo – Reabilitação Energética de Edifícios**

*"A essência do conhecimento consiste em aplicá-lo, uma vez possuído." – Confúcio, Sábio.  
China, 551AC // 479AC*



## 9.1 INTRODUÇÃO

O presente Capítulo apresenta a aplicação da solução final do Módulo de Reabilitação Prefabricado – MRP – a dois casos de estudo selecionados – edifício unifamiliar e edifício multifamiliar.

Por outro lado, considerando que qualquer ação de reabilitação deve sempre verificar todas as oportunidades de melhoria da envolvente e sistemas dos edifícios e aplica-los de forma integrada, foram também apresentadas ações de reabilitação integrada aos casos de estudo, com a inclusão do MRP.

Para tal foram utilizadas diversas ferramentas disponíveis no mercado, desde ferramentas de simulação energética dinâmicas, com vista ao estudo e previsão do desempenho energético dos edifícios, até à utilização de ferramentas económicas com vista à aplicação das medidas com melhor relação custo-benefício.

## 9.2 APRESENTAÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

### 9.2.1 Enquadramento

Para a demonstração das potencialidades da aplicação da solução final do módulo MRP foram estudados dois exemplos de aplicação desta solução a edifícios com diferentes tipologias e necessidades de reabilitação:

- Edifício multifamiliar em Guimarães – Edifício Elfenau;
- Edifício unifamiliar em Braga – Aldeia de Leste;

No entanto, considerando que as ações de reabilitação devem sempre incluir o estudo de todos os aspetos de melhoria da envolvente ou sistemas do edifício durante a mesma intervenção, como por exemplo, isolamento da fachada, tratamento de pontes térmicas, substituição do sistema de climatização por outro com maior eficiência, etc..

Este processo é chamado de Reabilitação Integrada e pode ajudar o processo de reabilitação a atingir níveis de qualidade térmica elevados e reduzir o tempo de intervenção, custos de mão-de-obra e a incomodidade dos ocupantes.

Assim, para ambos os casos de estudo, foram estudados as respetivas ações de reabilitação integrada, que incluíam a aplicação da solução MRP.

## 9.2.2 Edifício Multifamiliar Elfenau

O primeiro edifício selecionado para a aplicação do módulo de reabilitação MRP e o estudo de uma intervenção de reabilitação integrada foi um edifício multifamiliar composto por dois blocos (B1 e B2) com cinco pisos: uma cave semienterrada não climatizada; três pisos com apartamentos do tipo T2; um sótão com apartamento do tipo T1 a SE e NW sendo a restante área não climatizada (Figura 9.1).



Figura 9.1 – Caso de estudo 1 - Fachada a SE e SW, respetivamente

Os cinco pisos de cada bloco apresentam a seguinte compartimentação, remetendo-se para as Figuras 9.2 e 9.3 a distribuição dos diversos espaços em planta:

- Piso 1: cave semienterrada com garagens e arrumos;
- Piso 2 a 4: pisos (P1, P2 e P3) com apartamentos do tipo T2;
- Piso 5: sótão (S) com apartamentos do tipo T1 a SE e NW.

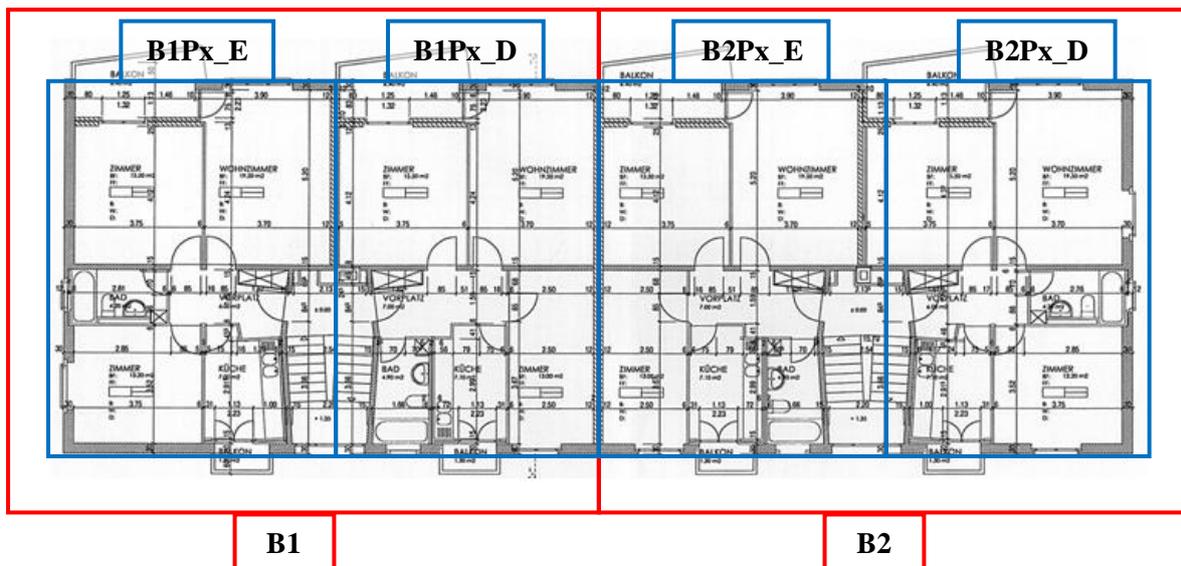


Figura 9.2 – Planta dos Pisos 1,2 e 3 e respetivos apartamentos - B1Px\_E (Bloco 1, Piso x, Esquerdo), B1Px\_D (Bloco 1, Piso x, Direito), B2Px\_E (Bloco 2, Piso x, Esquerdo), B2Px\_D (Bloco 2, Piso x, Direito)

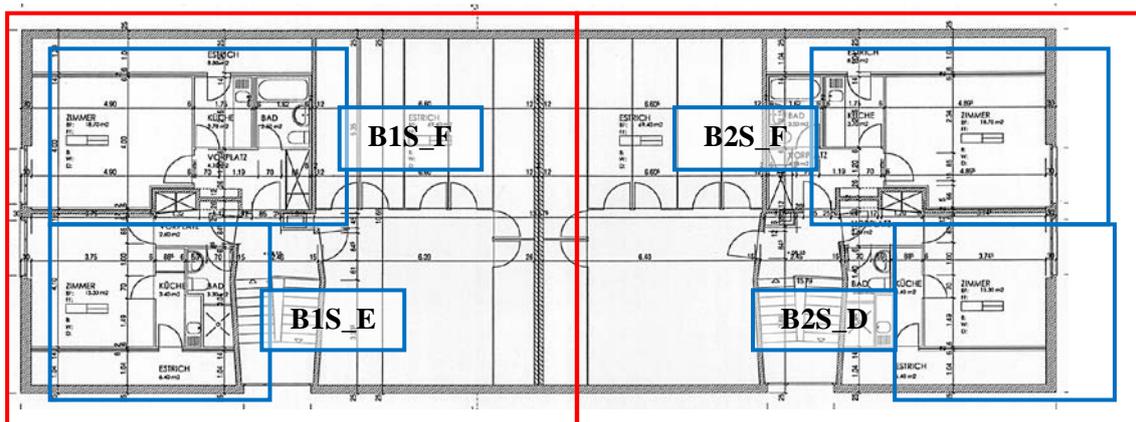


Figura 9.3 – Planta do Sótão e respetivos apartamentos - B1S\_F (Bloco 1, Sótão, Frente), B1S\_E (Bloco 1, Sótão, Esquerdo), B2S\_F (Bloco 2, Sótão, Frente), B2S\_E (Bloco 2, Sótão, Esquerdo)

Adicionalmente à caracterização geométrica e de organização espacial do edifício, foi também realizado um levantamento das características da envolvente e dos sistemas energéticos do edifício original, tendo-se obtido os valores apresentados na Tabela 9.1.

Tabela 9.1 – Características do Edifício Multifamiliar

Área do edifício por bloco	Bruta [m <sup>2</sup> ]	565
	Útil [m <sup>2</sup> ]	452
Sistema de climatização - Caldeira a combustível líquido	Eficiência [%]	80
Sistema de AQS - Caldeira a combustível líquido	Eficiência [%]	80
Sistema de Ventilação - Natural	Taxa de renovação [RPH]	1.05
Envidraçados	U [W/m <sup>2</sup> .°C]	2,90
	Factor Solar Inverno	0,65
	Factor Solar Verão	0,26
Paredes Exteriores	Cave – U [W/m <sup>2</sup> .°C]	2,55
	Pisos – U [W/m <sup>2</sup> .°C]	1,19
	Varandas – U [W/m <sup>2</sup> .°C]	4,10

### 9.2.3 Edifício Unifamiliar Aldeia de Leste

Para estudar a aplicação do módulo de reabilitação MRP, assim como uma ação de reabilitação integrada num edifício de tipologia unifamiliar, foi utilizada uma moradia unifamiliar em Braga – *Aldeia de Leste* – com as características identificadas na Figura 9.4 (Esta moradia foi já apresentada no decorrer da campanha de medições incluída no Capítulo 4 – Caso de Estudo CS2 ).



<b>Localização:</b>	<i>Braga</i>
<b>Período de Construção:</b>	<i>1980's</i>
<b>Orientação da fachada principal:</b>	Este
<b>Altitude:</b>	89 m
<b>Área:</b>	54.42 m <sup>2</sup>

**Estrutura:**

\_estrutura de betão armado

**Pavimento:**

\_laje de betão

**Cobertura:**

\_cobertura inclinada

**Paredes exteriores:**

\_parede simples de alvenaria de betão

**Paredes de compartimentação:**

\_tijolo furado

**Envidraçados:**

\_vidro simples com caixilho metálico sem corte térmico

**Revestimento exterior:**

\_reboco

**Revestimento interior:**

\_estruque tradicional



Figura 9.4 – Características e fotografias do Edifício Aldeia de Leste

### 9.3 CASO DE ESTUDO I – EDIFÍCIO MULTIFAMILAR “ELFENAU”

Para estudar a aplicação do módulo MRP ao edifício multifamiliar foi necessário verificar o desempenho energético do edifício original (necessidades energéticas), com a utilização de uma ferramenta de simulação energética, e seguidamente foi aplicada a solução MRP à fachada do edifício e calculado o seu desempenho final.



Seguidamente foi realizado o estudo económico de aplicação do MRP e encontrado o período de retorno do investimento, ou seja, os anos necessários para amortizar o investimento efetuado para a aplicação do MRP.

Por fim, foram estudados quais as medidas globais de melhoria da envolvente e sistemas com maior potencial de aplicação para este caso de estudo e verificada a reabilitação integrada do mesmo. Para tal foram seguidos os mesmos passos apresentados na aplicação da solução MRP.

### 9.3.1 Avaliação do desempenho térmico inicial do edifício multifamiliar

De forma a verificar o desempenho energético do edifício multifamiliar na sua forma original, foi utilizada a ferramenta de simulação DesignBuilder (2008) para a criação do modelo do edifício multifamiliar, ou seja, introdução das características geométricas do edifício e localização do edifício – resultando nos modelos apresentados nas Figuras 9.5 a 9.7, considerando os seguintes dados de entrada:

\_ Temperatura de Conforto de Inverno: 20 °C;

\_ Temperatura de Conforto de Verão: 25 °C;

\_ Localização – Guimarães (Ficheiro Climático utilizado baseado nos dados climáticos presentes na ferramenta SOLTERM®);

\_ Carga térmica da ocupação, iluminação e equipamentos – 4W/m<sup>2</sup>;

\_ Horário de ocupação, iluminação e equipamentos – horário padrão para habitações providenciado pela ferramenta.



Figura 9.5 – Edifício Efenau – Vista SW-SE (esquerda) e vista NW-SW



Figura 9.6 – Edifício Efenau – Vista SE-NE

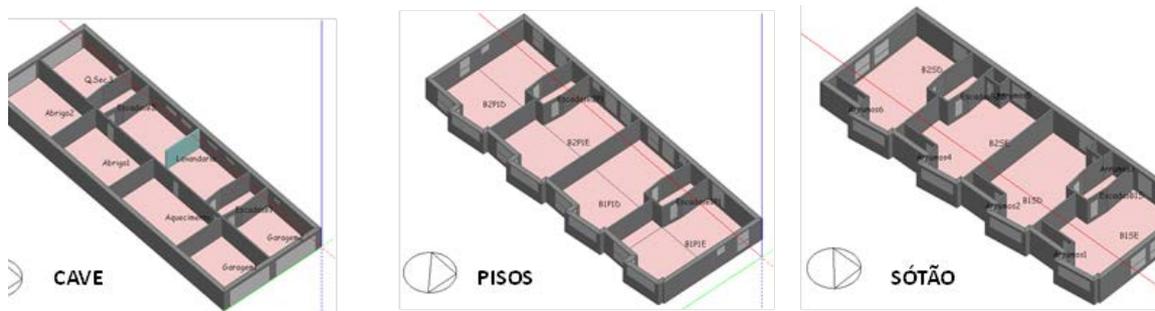


Figura 9.7 – Modelação dos pisos com o DesignBuilder

Após esta primeira abordagem foram exportados os ficheiros para a ferramenta de simulação EnergyPlus (2008), onde foi possível introduzir os sistemas energéticos do edifício, recalculer a massa interna do edifício, em termos de inércia térmica e estudar o desempenho energético do edifício multifamiliar. Assim, após a simulação energética do edifício foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 9.2.

Tabela 9.2 – Resultados obtidos para o edifício multifamiliar

Parâmetros	Valor obtido [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
Necessidades nominais de aquecimento	81,31
Necessidades nominais de arrefecimento	18,69
Necessidades nominais de água quente sanitária	52,26

Como tal, é possível afirmar que, de forma a manter o edifício a uma temperatura de conforto de 20°C, durante toda a estação de aquecimento, este necessita de consumir uma energia térmica correspondente a 81,31kWh/m<sup>2</sup>.ano. De igual modo, de forma a manter o edifício a uma temperatura de conforto de 25°C, durante toda a estação de arrefecimento, este necessita de consumir uma energia térmica correspondente a 18,69kWh/m<sup>2</sup>.ano. A energia útil



necessária para aquecimento de águas sanitárias a uma temperatura de 60°C é de 52,26kWh/m<sup>2</sup>.ano.

As temperaturas interiores de conforto e de aquecimento de águas sanitárias estão estipuladas no Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado pelo Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de Abril.

### 9.3.2 Avaliação do desempenho térmico do edifício multifamiliar após aplicação do MRP

Conforme anteriormente descrito, a modelação do edifício foi feita através do programa DesignBuilder. Após a modelação do edifício no programa DesignBuilder foram exportados os ficheiros para o EnergyPlus e nesse programa foram realizadas as simulações energéticas do edifício reabilitado com o Módulo de Reabilitação Prefabricado. Os resultados obtidos após a simulação encontram-se resumidos na Tabela 9.3.

Tabela 9.3 - Resultados obtidos para a simulação do edifício multifamiliar

Parâmetros	Edifício Reabilitado – MRP [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Edifício Original [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
N <sub>ic</sub>	57,56	81,31
N <sub>vc</sub>	12,63	18,69
N <sub>ac</sub>	52,26	52,26

Onde:

- N<sub>ic</sub> - Necessidades energéticas para aquecimento;
- N<sub>vc</sub> - Necessidades energéticas para arrefecimento;
- N<sub>ac</sub> - Necessidades de água quente sanitária;

Com os valores obtidos para o edifício antes da reabilitação e os valores obtidos após a aplicação do Módulo de Reabilitação Prefabricado, foram calculadas as necessidades nominais de aquecimento (N<sub>ic</sub>), de arrefecimento (N<sub>vc</sub>) e de preparação de águas quentes sanitárias (N<sub>ac</sub>), obtidos para o edifício multifamiliar antes e após a aplicação do módulo MRP (Figura 9.8).

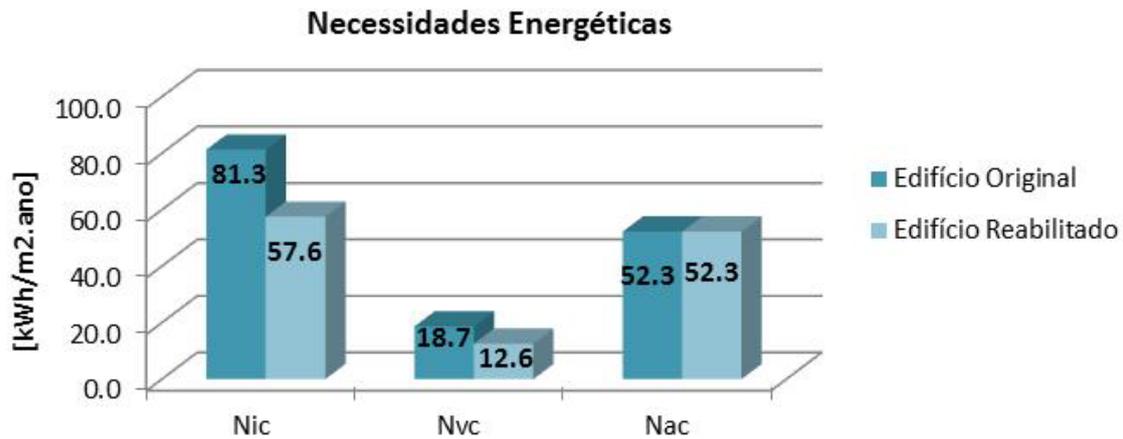


Figura 9.8 – Necessidades nominais de aquecimento (Nhc), de arrefecimento (Nvc) e de produção de águas quentes sanitárias (Nac) – Aplicação do módulo MRP

Comparando os resultados obtidos para o edifício antes e após a aplicação do módulo MRP, foi possível verificar a redução em cerca de 30% das necessidades de aquecimento e 32% das necessidades de arrefecimento, comparativamente ao edifício original.

### 9.3.3 Análise Económica da aplicação do MRP no edifício multifamiliar

A análise económica da aplicação do MRP no edifício multifamiliar foi realizada com base no cálculo do período de retorno simples indicado pelo DL 79/2006 – RSECE. Segundo este Decreto-Lei, o Período de Retorno Simples (PRS) é o quociente entre o custo adicional de investimento e a Poupança anual resultante da aplicação da alternativa mais eficiente.

O custo adicional de investimento é calculado pela diferença entre o custo inicial da solução base, isto é, sem a alternativa de maior eficiência energética, e o da solução mais eficiente, estimada aquando da construção do sistema, com base na melhor informação técnica e orçamental ao dispor do projetista.

A poupança anual resultante da aplicação da alternativa mais eficiente é estimada com base em simulações anuais, detalhadas ou simplificadas do funcionamento do edifício e dos seus sistemas energéticos, conforme aplicável em função da tipologia e área útil do edifício, nos termos do Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), da situação base e da situação com a solução mais eficiente.

Para tal, foi estimado o custo associado à produção e aplicação do módulo, conforme apresentado na Tabela 9.4, considerando um desconto de 20% para a aquisição do material em grandes quantidade e de 20% para a produção do MRP em série.



Tabela 9.4 – Custo estimado para produção e aplicação do módulo MRP

Camada	UN	Material - Descrição	Quant.	Preço/UN [€]	Preço [€]	Desconto quant. Material
Estrutura de Suporte	m	Perfil T - Chapa ST37	2.00	1.82	3.65	2.92
Barreira Pára Vapor	m <sup>2</sup>	Filme de polietileno	1.15	0.97	1.12	0.90
Perfil U	m	Perfil U 30x120x1,5mm - Chapa ST37	2.00	1.67	3.34	2.67
Isolamento Tubagens	m <sup>2</sup>	XPS 30mm	4.00	2.18	8.72	6.96
Isolamento Exterior	m <sup>2</sup>	Aglomerado de cortiça expandida (ICB) - 60mm	1.00	8.91	15.04	12.03
Revestimento Exterior	m <sup>2</sup>	Alumínio 0,5mm	1.15	8.08	9.32	7.46
Fixações	un	Parafusos	6.00	0.08	0.48	0.38
Cola	ml	Fixação dos revestimentos aos perfis U - x4	110.00	0.038	4.13	3.30
Mão-de-obra	h	Oficial de 1ª construção	0.40	12.18	4.90	3.92
	h	Operário não qualificado	0.20	11.02	2.22	1.77
Outros Custos	%	Meios auxiliares	2.00%	89.06	1.78	1.42
	%	Custos indiretos	3.00%	90.84	2.73	2.18
Total					57.63	48.43
<b>Preço total MRP (€)</b>						<b>38.70</b>

Assim, os custos associados à aplicação do MRP são os seguintes:

Custo de Investimento (inicial) = 0,00 €

Custo de Investimento (reabilitação) = 32 615,33 €

Δ Custo Investimento = 32 615,33 €

Na Tabela 9.5 recordam-se os valores correspondentes às necessidades energéticas do edifício antes e após a reabilitação, resultantes da simulação feita anteriormente.

Tabela 9.5 – Resultados obtidos para o edifício multifamiliar original e reabilitado

Parâmetros	Valor obtido [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	
	Edifício Reabilitado	Edifício Original
Nic	57,56	81,31
Nvc	12,63	18,69
Nac	52,26	52,26

Mesmo considerando que as melhorias atingidas com a aplicação da solução - MRP - afetaram também as necessidades de arrefecimento do edifício, na equação 9.1 apenas se utilizaram as parcelas correspondentes às necessidades Nic e Nac (aquecimento e água quente sanitária) uma vez que para o cálculo do PRS, segundo do DL 79/2006, apenas podem ser incluídas as necessidades energéticas que efetivamente apresentem instalações e/ou equipamentos



mecânicos, ou seja, o edifício em estudo apenas possui equipamento para AQS e para aquecimento ambiente.

$$\text{Custo\_Exploração} = \frac{N_{ic}}{\eta_i} \times A_p \times \text{custo}_i + \frac{N_{vc}}{\eta_v} \times A_p \times \text{custo}_v + N_{ac} \times A_p \times \text{custo}_{aqs} \quad (9.1)$$

Com:

$N_{ic}$	Necessidades energéticas para aquecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano];
$\eta_i$	Eficiência nominal dos equipamentos de aquecimento utilizados;
$A_p$	Área do pavimento [m <sup>2</sup> ];
$\text{Custo}_i$	Custo da energia para aquecimento [€/kWh];
$N_{vc}$	Necessidades energéticas para arrefecimento [kWh/m <sup>2</sup> .ano];
$\eta_v$	Eficiência nominal dos equipamentos de arrefecimento utilizados;
$\text{Custo}_v$	Custo da energia para arrefecimento [€/kWh];
$N_{ac}$	Necessidades energéticas para aquecimento de águas sanitárias [kWh/m <sup>2</sup> .ano];
$\text{Custo}_{aqs}$	Custo da energia para aquecimento de águas sanitárias [€/kWh];

Tendo em consideração a equação 9.1, os custos de exploração do edifício em análise, antes e após a reabilitação, são os seguintes:

***\_Custo de Exploração (inicial):***

$$81,31/0,8 \times 933 \times 0,1326 + 52,26 \times 933 \times 0,096 = 17\,253,60 \text{ €/ano}$$

***\_Custo de Exploração (após reabilitação):***

$$57,56/0,8 \times 933 \times 0,1326 + 52,26 \times 933 \times 0,096 = 13\,582,18 \text{ €/ano}$$

Considerando que a eletricidade é de baixa tensão normal com uma tarifa simples até 2,3 kVA, e o gás natural pertence ao Escalão 1 com consumo anual até 220 m<sup>3</sup>, ou seja, o consumo típico para um apartamento de tipologia até T5.

***\_Poupança anual***  $\Rightarrow \Delta$  Custo Exploração

$$17\,253,60 - 13\,582,18 = 3\,672,81 \text{ €/ano}$$

O período de retorno simples, segundo o Decreto-Lei nº79/2006, é determinado através da equação 9.2.

$$\text{- Período de retorno simples (DL. 79/2006): PRS} = \frac{\Delta \text{Custo de Investimento}}{\Delta \text{Custo de Exploração}} \quad (9.2)$$

$$\text{PRS} = \frac{32615,33}{3672,81} = 8,9 \text{ anos}$$



Conclui-se assim que a aplicação do módulo de reabilitação prefabricada, **MRP**, resulta em significantes reduções das necessidades energéticas deste edifício, o que leva a que o período de retorno simples desta solução é de **8,9 anos**.

### 9.3.4 Proposta de Soluções para a Reabilitação Integrada do Edifício

De forma a aplicar os princípios da reabilitação integrada, as medidas de melhoria utilizadas tiveram em consideração, tanto a envolvente (Figura 9.9), como os sistemas energéticos e fontes de energia renováveis, tendo-se concluído que as medidas de aplicação essencial para os dois blocos do edifício eram:

- Colocar o Módulo de Reabilitação Prefabricado (MRP) na fachada do edifício.
- Colocar isolamento térmico nos elementos em contacto com espaços não aquecidos;
- Climatizar as áreas da Cave e do Sótão para possibilitar novos apartamentos;
- Introduzir ventilação mecânica dos espaços com recuperação de calor (55%);
- Colocar varandas a SW envidraçadas, do topo da varanda à base dos pisos superiores;
- Introduzir os módulos de cobertura plana no Sótão e colocação de painéis solares para AQS;
- Criar um corredor exterior de acesso e elevador a NE do Piso 1 ao Sótão;

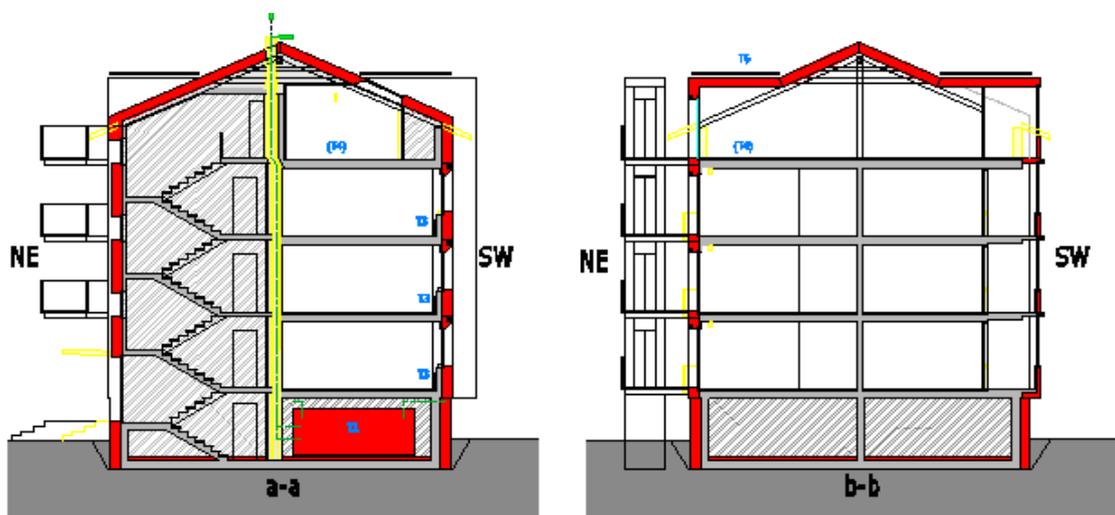


Figura 9.9 – Cortes do edifício reabilitado

As diferenças no edifício antes e após a sua reabilitação são facilmente identificadas nas Figuras 9.10 a 9.12. As áreas preenchidas com trama de traço cinzento nas plantas do edifício reabilitado correspondem a espaços não aquecidos do edifício.

A implementação das soluções de reabilitação levou à alteração de algumas características dos dois blocos do edifício, por exemplo, áreas, características térmicas dos envidraçados e

envolvente exterior do edifício, ventilação, etc. A Tabela 9.6 apresenta um resumo das alterações efetuadas.

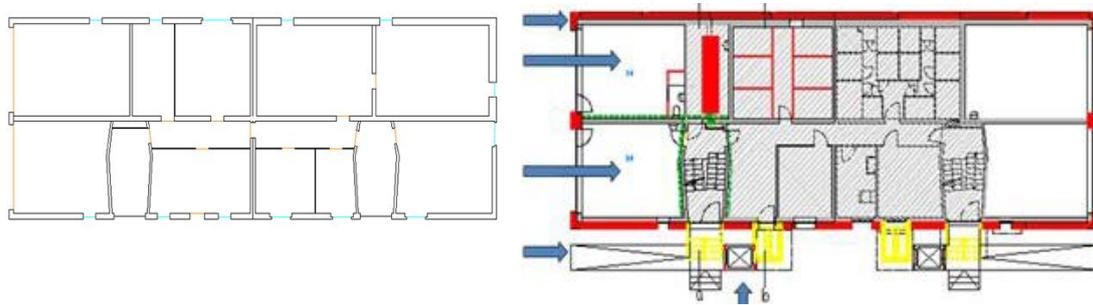


Figura 9.10 – Planta da Cave do Edifício original (esq.) e Reabilitado (dir.)

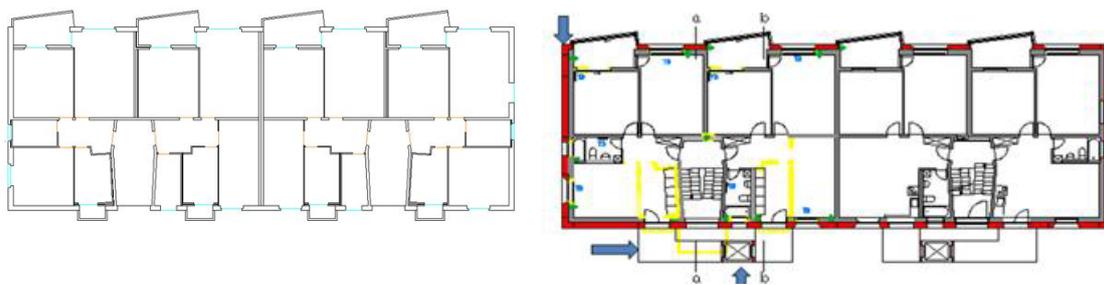


Figura 9.11 – Planta de piso do Edifício original (esq.) e Reabilitado (dir.)

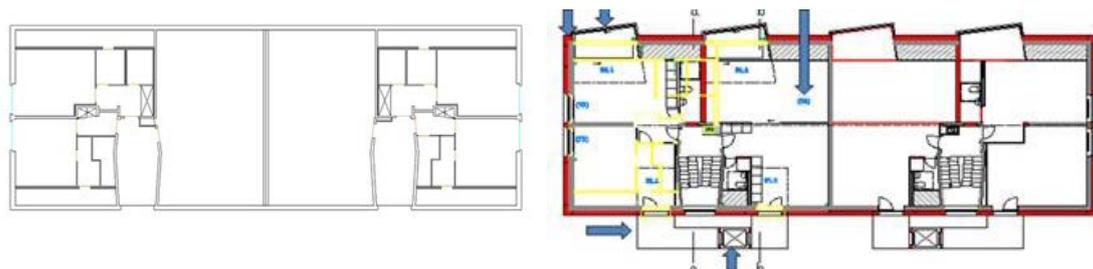


Figura 9.12 – Planta do sótão do Edifício original (esq.) e Reabilitado (dir.)



Tabela 9.6 – Características do edifício antes e depois de reabilitado

		Edifício Original	Edifício Reabilitado
Área dos 2 blocos do edifício	Bruta [m <sup>2</sup> ]	1130.00	1565.00
	Útil [m <sup>2</sup> ]	933.00	1212.00
Sistema de climatização - Caldeira a combustível líquido	Eficiência [%]	80.00	90.00
Sistema de AQS - Caldeira a combustível líquido	Eficiência [%]	80.00	90.00
Sistema de AQS - Painéis Solares	Produção energética [kWh/ano]	-	9700.00 kWh/ano
Sistema de Ventilação - Natural	Taxa de renovação [RPH]	1.10	-
Sistema de Ventilação - Mecânico	Taxa de renovação [RPH]	-	2.00 (com 80% do calor do ar extraído recuperado)
Envidraçados	U [W/m <sup>2</sup> .°C]	2,90	1,10
	Factor Solar Inverno	0,65	0,45
	Factor Solar Verão	0,26	0,17
Paredes Exteriores	Cave – U [W/m <sup>2</sup> .°C]	2,55	0,21
	Pisos – U [W/m <sup>2</sup> .°C]	1,19	0,19
	Varandas – U [W/m <sup>2</sup> .°C]	4,10	0,22

O edifício reabilitado apresenta um sistema de climatização do mesmo tipo, no entanto como este é novo, tem uma maior eficiência => de 80% para os 90%.

O aquecimento das águas sanitárias antes da reabilitação do edifício era feito através de uma caldeira a combustível líquido. Para a reabilitação do edifício foram colocados na cobertura painéis solares do tipo concentradores parabólicos (CPC) e as tubagens foram devidamente isoladas com lã de rocha com uma espessura de 10mm, mantendo-se como sistema de apoio a caldeira a combustível líquido. Os ganhos solares resultantes da colocação dos painéis solares foram calculados no programa SOLTERM (Aguiar, 2010), tendo-se realizado uma afetação por apartamento conforme apresentada na Tabela 9.7.

Tabela 9.7 – Distribuição da produção solar

	Nº Ocupantes p/ apartamento	Nº total de ocupantes	Distribuição da produção solar (kWh)
T0 – cave	2.0	4.0	1492.3
T1 – sótão	2.0	4.0	1492.3
T2 – piso 1,2 e 3	3.0	18.0	6715.4
<b>Total</b>	-	<b>26.0</b>	<b>9700.0</b>

A nível da ventilação foi introduzido um sistema de ventilação mecânica com uma potência de 45W por ventilador e recuperador de calor com uma eficiência de 80%.

### 9.3.5 Avaliação do desempenho térmico final do edifício multifamiliar

Conforme anteriormente descrito, a modelação do edifício foi feita através do programa DesignBuilder. Após a modelação do edifício no programa DesignBuilder foram exportados os ficheiros para o EnergyPlus e nesse programa foram realizadas as simulações energéticas do edifício reabilitado de uma forma integrada. Os resultados obtidos após a simulação encontram-se resumidos na Tabela 9.5, onde também se incluiu os resultados obtidos apenas com a aplicação do módulo MRP.

Tabela 9.8 - Resultados obtidos para a simulação do edifício multifamiliar

Parâmetros	Edifício Reabilitado – reabilitação integrada [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Edifício Reabilitado – MRP [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Edifício Original [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
N <sub>ic</sub>	4,47	57,56	81,31
N <sub>vc</sub>	15,62	12,63	18,69
N <sub>ac</sub>	39,64	52,26	52,26

Onde:

- N<sub>ic</sub> - Necessidades energéticas para aquecimento;
- N<sub>vc</sub> - Necessidades energéticas para arrefecimento;
- N<sub>ac</sub> - Necessidades de água quente sanitária;

Com os valores obtidos para o edifício antes da reabilitação e os valores obtidos após a implementação das soluções de reabilitação incluindo a aplicação do Módulo de Reabilitação Prefabricado, foram calculadas as necessidades nominais de aquecimento (N<sub>ic</sub>), de arrefecimento (N<sub>vc</sub>) e de preparação de águas quentes sanitárias (N<sub>ac</sub>), obtidos para o edifício multifamiliar antes e após a intervenção integrada de reabilitação (Figura 9.13).

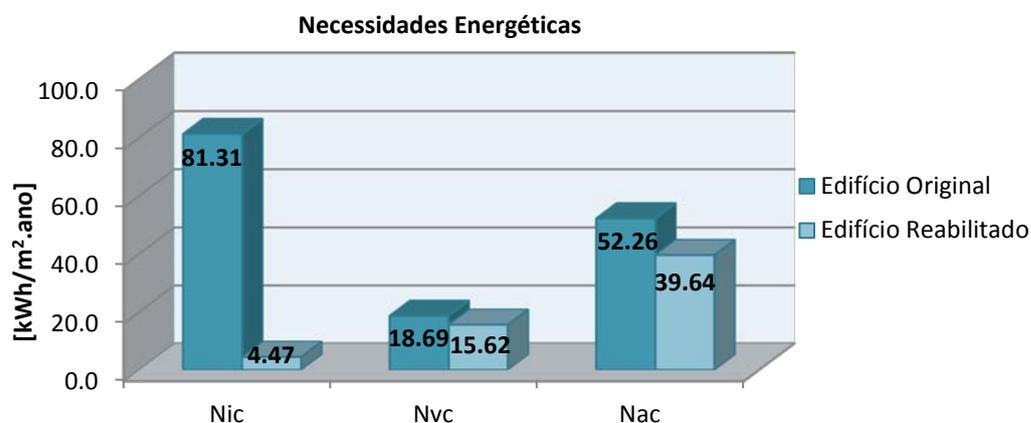


Figura 9.13 – Necessidades nominais de aquecimento (N<sub>ic</sub>), de arrefecimento (N<sub>vc</sub>) e de produção de águas quentes sanitárias (N<sub>ac</sub>) – Reabilitação Integrada



Comparando os resultados obtidos para o edifício antes e após a **reabilitação integrada** verifica-se que as necessidades de aquecimento foram reduzidas em cerca de 95%, as necessidades de arrefecimento reduziram 16%, as necessidades para aquecimento das águas sanitárias diminuíram em cerca de 24%, enquanto com a implementação **apenas do módulo MRP**, foi possível a redução em cerca de 30% das necessidades de aquecimento e 32% das necessidades de arrefecimento, comparativamente ao edifício original.

Como tal, a reabilitação integrada do edifício com a aplicação do Módulo de Reabilitação Prefabricado na fachada permite a redução do tempo de execução da obra, redução do incómodo causado aos moradores, redução dos custos associados à mão-de-obra, maior garantia de qualidade do produto utilizado, redução dos resíduos existentes no local da obra.

### 9.3.6 Análise Económica da Reabilitação Integrada do edifício multifamiliar

A análise económica da reabilitação integrada do edifício multifamiliar foi realizada da mesma forma do que aquela apresentada para a aplicação do módulo MRP, ou seja, com o cálculo do período de retorno simples (PRS).

Para tal, inicialmente foi estimado o custo associado à manutenção e conservação dos dois blocos do edifício, considerando a substituição da caldeira, substituição dos envidraçados, caixilhos e portas das habitações (componentes atualmente bastante degradados e com necessidades de substituição) por outros semelhantes. A Tabela 9.9 apresenta os gastos necessários para a manutenção do edifício e para a sua reabilitação.

Tabela 9.9 – Custo das intervenções a realizar no edifício multifamiliar

	Solução Original	Solução reabilitada
<b>Sistema de aquecimento e AQS</b>	Caldeira a combustível líquido	Painéis Solares CPC Isolamento das tubagens
<b>Envidraçados</b>	6 + 8 + 6mm U = 2,9 W/m <sup>2</sup> .C Gás - ar	6 + 16 + 6mm U = 1,1 W/m <sup>2</sup> .C Gás - árgon
<b>Caixilharia</b>	Madeira	Madeira Estores madeira – g = 0,05
<b>Portas</b>	Madeira (diferentes áreas)	
<b>Ventilação mecânica</b>	-	Recuperador de calor
<b>Paredes Exteriores</b>	-	MRP aplicado na parede existente
<b>Custo TOTAL [€]</b>	<b>58 062,1</b>	<b>112 680,7</b>

Custo de Investimento (inicial) = 58 062,10 €

Custo de Investimento (reabilitação) = 112 680,70 €

Δ Custo Investimento = 54 618,60 €

Na Tabela 9.10 recordam-se os valores correspondentes às necessidades energéticas do edifício antes e após a reabilitação, resultantes da simulação feita anteriormente.

Tabela 9.10 – Resultados obtidos para o edifício multifamiliar original e reabilitado

Parâmetros	Valor obtido [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	
	Edifício Original	Edifício Reabilitado
Nic	81,31	4,47
Nvc	18,89	15,62
Nac	52,26	39,64

**\_Custo de Exploração (inicial):**

$$81,31/0,8 \times 933 \times 0,1326 + 52,26 \times 933 \times 0,096 = 17\,253,6 \text{ €/ano}$$

**\_Custo de Exploração (após reabilitação):**

$$4,47/0,9 \times 1212 \times 0,1326 + 39,64 \times 1212 \times 0,0646 = 3\,902,9 \text{ €/ano}$$

Considerando que a eletricidade é de baixa tensão normal com uma tarifa simples até 2,3 kVA, e o gás natural pertence ao Escalão 1 com consumo anual até 220 m<sup>3</sup>, ou seja, o consumo típico para um apartamento de tipologia até T5.

**\_Poupança anual**  $\Rightarrow \Delta$  Custo Exploração

$$17\,253,6 - 3\,902,9 = 13\,350,7 \text{ €/ano}$$

O período de retorno simples, segundo o Decreto-Lei nº79/2006, é determinado através da equação 9.2.

$$\text{- Período de retorno simples (DL. 79/2006): } PRS = \frac{\Delta \text{ Custo de Investimento}}{\Delta \text{ Custo de Exploração}} \quad (9.2)$$

$$PRS = \frac{54618,6}{13350,7} = 4,1 \text{ anos}$$

O período estimado para o retorno do investimento feito para implementar a reabilitação integrada do edifício é de **4,1 anos**.

Com a implementação da mesma análise económica, mas apenas considerando a aplicação do módulo de reabilitação prefabricada, **MRP**, foi estimado um período de retorno simples de **7,0 anos**.



Embora, com a implementação da estratégia de reabilitação integrada, tenha sido possível atingir valores significativamente inferiores em termos de necessidades energéticas, tal não se refletiu de forma tão evidente no PRS, comparativamente com apenas a aplicação do MRP, pois esta inclui também intervenções de acessibilidades (corredores e elevadores) que representam maiores investimentos, aumentando o PRS.

#### 9.4 CASO DE ESTUDO II – EDIFÍCIO UNIFAMILAR “ALDEIA DE LESTE”

Para estudar a aplicação do módulo MRP ao edifício unifamiliar, foi necessário verificar o desempenho energético do edifício original (necessidades energéticas), com a utilização de uma ferramenta de simulação energética. Seguidamente foi aplicada a solução MRP à fachada do edifício e calculado o seu desempenho final.

Por fim, foram estudados quais as medidas integradas de reabilitação da envolvente e de substituição de instalações e equipamentos mecânicos, que apresentavam maior potencial de redução das necessidades energéticas para este caso de estudo.

##### 9.4.1 Avaliação do desempenho térmico inicial do edifício unifamiliar

De forma a verificar o desempenho energético do edifício unifamiliar na sua forma original, foi utilizada a ferramenta gráfica Google SketchUp para a criação do modelo, ou seja, introdução das características geométricas do edifício e localização do edifício – resultando nos modelos apresentados nas Figuras 9.14 e 9.15.



Figura 9.14 – Modelo 3D do caso de estudo original: a) perspetiva frente; b) perspetiva traseiras



Figura 9.15 – Modelo 3D do caso de estudo original: a) corte do alçado Oeste; b) perspetiva de topo

Após esta primeira abordagem foram exportados os ficheiros para a ferramenta de simulação eQuest, onde foi possível introduzir os sistemas energéticos do edifício e estudar o desempenho energético do edifício unifamiliar, considerando os seguintes dados de entrada:

\_ Temperatura de Conforto de Inverno: 20 °C;

\_ Temperatura de Conforto de Verão: 25 °C;

\_ Localização – Braga (Ficheiro Climático utilizado baseado nos dados climáticos presentes na ferramenta SOLTERM®);

\_ Carga térmica da ocupação, iluminação e equipamentos – 4W/m<sup>2</sup>;

\_ Horário de ocupação, iluminação e equipamentos – horário padrão para habitações providenciado pela ferramenta.

Assim, após a simulação energética do edifício foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 9.1.

Tabela 9.11 – Resultados obtidos para o edifício multifamiliar

Parâmetros	Valor obtido [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
Necessidades nominais de aquecimento	267,4
Necessidades nominais de arrefecimento	0,4
Necessidades nominais de água quente sanitária	83,7

Como tal, é possível afirmar que, de forma a manter o edifício a uma temperatura de conforto de 20°C, durante toda a estação de aquecimento, este necessita de consumir uma energia térmica correspondente a 267,4kWh/m<sup>2</sup>.ano. De igual modo, de forma a manter o edifício a uma temperatura de conforto de 25°C, durante toda a estação de arrefecimento, este



necessita de consumir uma energia térmica correspondente a  $0,4\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$ . A energia útil necessária para aquecimento de águas sanitárias a uma temperatura de  $60^\circ\text{C}$  é de  $83,7\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$ .

#### 9.4.2 Avaliação do desempenho térmico do edifício unifamiliar após aplicação do MRP

Conforme anteriormente descrito, a modelação do edifício foi feita através do programa Google SketchUp. Após a modelação do edifício no programa DesignBuilder foram exportados os ficheiros para o eQuest e nesse programa foram realizadas as simulações energéticas do edifício reabilitado com o Módulo de Reabilitação Prefabricado, considerando os mesmos dados de entrada que aqueles apresentados para a simulação do edifício original.

Os resultados obtidos após a simulação encontram-se resumidos na Tabela 9.3.

**Tabela 9.12 - Resultados obtidos para a simulação do edifício multifamiliar**

Parâmetros	Edifício Reabilitado – MRP [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	Edifício Original [kWh/m <sup>2</sup> .ano]
$N_{ic}$	219,8	267,4
$N_{vc}$	0,04	0,4
$N_{ac}$	83,7	83,7

Onde:

- $N_{ic}$  - Necessidades energéticas para aquecimento;
- $N_{vc}$  - Necessidades energéticas para arrefecimento;
- $N_{ac}$  - Necessidades de água quente sanitária;

Com os valores obtidos para o edifício antes da reabilitação e os valores obtidos após a aplicação do Módulo de Reabilitação Prefabricado, foram calculadas as necessidades nominais de aquecimento ( $N_{ic}$ ), de arrefecimento ( $N_{vc}$ ) e de preparação de águas quentes sanitárias ( $N_{ac}$ ), obtidos para o edifício multifamiliar antes e após a aplicação do módulo MRP (Figura 9.16).

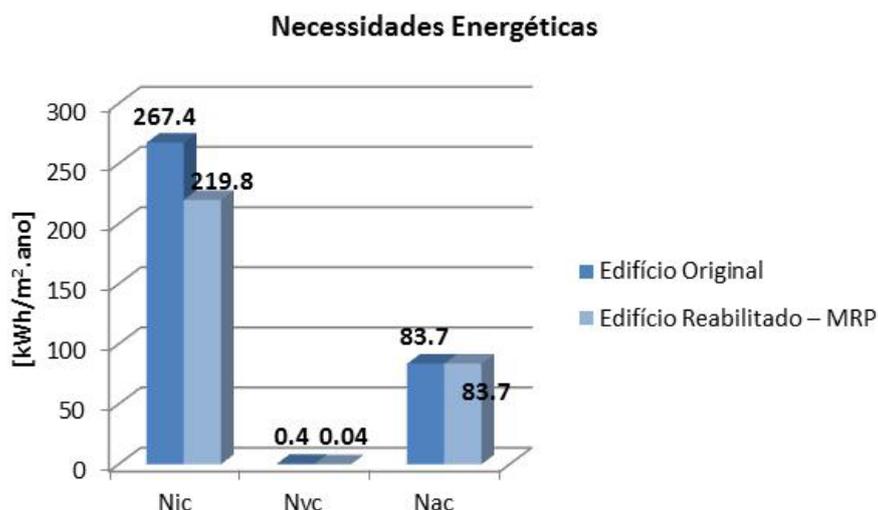


Figura 9.16 – Necessidades nominais de aquecimento (Nic), de arrefecimento (Nvc) e de produção de águas quentes sanitárias (Nac) – Aplicação do módulo MRP

Comparando os resultados obtidos para o edifício antes e após a aplicação **do módulo MRP**, foi possível verificar a redução em cerca de 18% das necessidades de aquecimento e de 90% das necessidades de arrefecimento, comparativamente ao edifício original.

### 9.4.3 Proposta de Soluções para a Reabilitação Integrada do Edifício

Para o estudo medidas reabilitação integradas do edifício Aldeia de Leste, foram proposta medidas de melhoria energética na envolvente e sistemas do edifício com o objetivo de reduzir ao mínimo as perdas térmicas e aumentar a eficiência dos sistemas.

Para tal o edifício foi analisado detalhadamente, tendo-se verificado quais os elementos que necessitavam de maior nível de intervenção. Conforme se pode observar pela Tabela 9.13, é necessário intervir nas paredes, cobertura, pavimento, infiltrações e envidraçados.

Tabela 9.13 – Carga térmica associada aos diferentes elementos do edifício

Carga Térmica	Valor Absoluto (kWh/m <sup>2</sup> .ano)		Valor percentual (%)	
	Aquecimento*	Arrefecimento*	Aquecimento	Arrefecimento
Paredes	-24.01	0.10	7%	3%
Cobertura e pavimento	-229.40	-2.39	69%	-
Infiltrações	-62.09	1.22	19%	33%
Envidraçados (condução)	-15.78	0.29	5%	8%
Envidraçados (Radiação)	15.10	0.89	-	24%
Ocupação	29.70	0.91	-	5%
Iluminação	8.43	0.18	-	4%
Equipamentos elétricos	7.90	0.14	-	4%
<b>Total</b>	<b>-270.15</b>	<b>1.34</b>	-	-

\*valores negativos implicam perdas térmicas, enquanto valores positivos assinalam ganhos térmicos.

Assim, as medidas consideradas foram as seguintes:



- Aplicação do módulo MRP na fachada do edifício com a espessura de isolamento otimizada;
- Aplicação de 10 cm de isolamento de poliestireno expandido extrudado (XPS) no pavimento, paredes em contacto com espaços não úteis e cobertura;
- Substituição do esquentador a gás para AQS, com eficiência de 50%, por uma caldeira de condensação a gás com eficiência de 102%;
- Aplicação de sistema de ventilação mecânico com recuperador de calor com uma eficiência de 80%;
- Substituição dos envidraçados existentes (simples com caixilho de alumínio), por vidros triplos e caixilhos de alumínio com corte térmico;
- Aplicação de coletores solares térmicos para água quente sanitária;
- Aplicação de painéis fotovoltaicos para a geração de energia elétrica.

A exemplificação da aplicação de algumas das medidas de melhoria referidas pode ser observada na Figura 9.17.

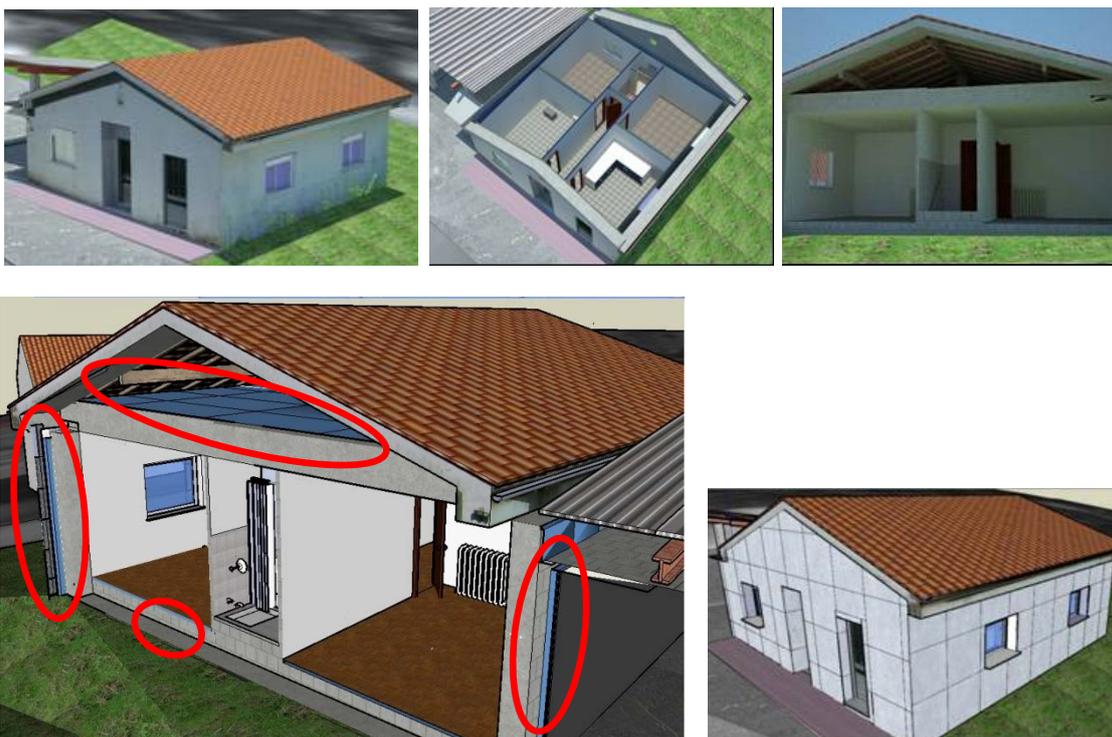


Figura 9.17 – Estudo da aplicação das medidas de melhoria energética

#### 9.4.4 Avaliação do desempenho térmico final do edifício unifamiliar

Conforme anteriormente descrito, a modelação do edifício foi feita através do programa Google SketchUp. Após a modelação do edifício no programa Google SketchUp foram exportados os ficheiros para o eQuest e nesse programa foram realizadas as simulações

energéticas do edifício reabilitado de uma forma integrada. Os resultados obtidos após a simulação encontram-se resumidos na Tabela 9.14, onde também se incluiu os resultados obtidos apenas com a aplicação do módulo MRP.

**Tabela 9.14 – Necessidades energéticas obtidas por simulação energética**

Solução	Necessidades Energéticas [kWh/m <sup>2</sup> .ano]			Redução Energética [%]			
	Aquecimento	Arrefecimento	AQS	Aquecimento	Arrefecimento	AQS	Total
Original	267.4	0.4	83.7	-	-	-	-
Reabilitação Integrada	16.1	14.6	41.0	94	- 97	51	80
Apenas o MRP	219.8	0.04	83.7	18	90	0	14

A partir da Tabela 9.14 é possível observar que as medidas de melhoria aplicadas ao edifício, não incluindo o uso de fontes renováveis (painéis solares) possibilitam a redução das necessidades energéticas totais do edifício em 80%. De referir que as necessidades de arrefecimento aumentaram de 0.4 para 14.6 kWh/m<sup>2</sup>.ano, o que corresponde a um aumento de 97% destas necessidades. No entanto, estas necessidades de arrefecimento têm um impacto pequeno nas necessidades globais do edifício.

Verifica-se também que quando se considera apenas a aplicação do módulo MRP na fachada do edifício em estudo, é possível obter uma redução das necessidades energéticas totais do edifício de 14%.

Para a contabilização da utilização dos sistemas de energias renováveis, e utilizando a ferramenta SOLTERM, foi possível chegar aos seguintes resultados:

- Coletores solares para AQS: área de coletor de 3,8 m<sup>2</sup>, associado a um depósito de 300 l. Esta solução resulta na obtenção de 2.058 kWh/ano para AQS;
- Painéis fotovoltaicos: área de coletor de 8,3 m<sup>2</sup> e uma potência nominal de 1.05 kW. Esta solução resulta numa produção de 1.312 kWh/ano de energia elétrica.

Considerando a contribuição dos coletores solares, as necessidades de AQS do edifício reduzem-se a 3,5 kWh/m<sup>2</sup>.ano.

Os balanços energéticos finais calculados tiveram como base o consumo de energia final, ou seja, as necessidades de energia considerando as eficiências dos sistemas associados. Este tipo de balanço é útil com vista a avaliar a energia real consumida para aquecimento, arrefecimento e AQS. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 9.15.



Tabela 9.15 – Balanço energético do caso de estudo

Solução		Aquecimento	Arrefecimento	AQS	Total	PV	Balanço Energético
Energia Final (kWh/m <sup>2</sup> .ano)	Original	371.4	0.1	83.7	455.3	0.0	455.3
	Reabilitação Integrada	22.3	4.9	3.5	30.6	24.1	6.5

Com a implementação da estratégia de reabilitação integrada, incluindo a aplicação do módulo MRP e sistemas de energia renováveis, é possível atingir uma redução das necessidades energéticas totais de 80%, dos quais 14% são devidos à aplicação da solução MRP, resultando numa solução final com um balanço energético quase nulo.

## 9.5 CONCLUSÃO

Através dos casos de estudo apresentados, foi possível estimar o aumento do desempenho energético decorrente da aplicação dos módulos de reabilitação prefabricados aos edifícios selecionados, onde se verificou uma redução das necessidades energéticas para aquecimento em **30%** para o edifício multifamiliar e de **18%** para o edifício unifamiliar.

A análise económica demonstrou que para o edifício multifamiliar em estudo, com 16 frações autónomas, o período de retorno do investimento feito para a aplicação do módulo **MRP** é de cerca de 7 anos.

Assim, a aplicação de sistemas de reabilitação prefabricados em fachadas dos edifícios, para além de reduzirem substancialmente as trocas térmicas através das mesmas vão resultar em ações com menores tempos de aplicação.

Por outro lado, verificou-se que a reabilitação integrada de um edifício para aumento do seu desempenho energético é uma opção com claras vantagens para dotar os edifícios de maior qualidade e conforto, com reduzidos períodos de amortização do investimento.

Nos casos estudados, optar por uma reabilitação integrada demonstrou ser uma oportunidade para dotar os edifícios de boas características térmicas, diminuindo substancialmente as suas necessidades energéticas e consequentemente o seu consumo energético. Para além de esta opção melhorar as condições de conforto dos utilizadores, a reabilitação traz benefícios a nível económico ao longo da vida útil do edifício uma vez que os gastos relativos à fatura energética ao longo desse período (manutenção) são reduzidos devido à redução dos consumos.



A análise económica demonstrou que para o edifício multifamiliar em estudo, com 16 frações autónomas, o período de retorno do investimento feito para a sua reabilitação integrada é inferior a 5 anos.

Ambos os edifícios vão apresentar necessidades energéticas muito reduzidas, sendo que o edifício unifamiliar apresenta um consumo de energia final quase zero.





## CAPÍTULO 10 – Conclusões e Trabalhos Futuros

*"É verdade que muitas vezes tem maiores dificuldades o conservar, que o fazer, mas quem se gloria da feitura, não deve recusar o peso da conservação." – António Vieira, Padre / Escritor.  
Portugal, 1608 // 1697*



## 11.1 CONCLUSÕES

Os trabalhos de investigação e desenvolvimento apresentados detinham como pressupostos iniciais a premência no desenvolvimento de novas soluções com vista ao aumento da eficiência energética do parque edificado, sobretudo em termos de edifícios residenciais, e enquadravam-se nos Projetos de Investigação IEA ECBCS Annex 50, assim como o projeto enquadrador para a realidade nacional – Projeto FCT – Reabilitação Energética de Edifícios.

A premência do aumento da eficiência energética do parque edificado foi justificada considerando o excessivo peso do setor dos edifícios quando se considera a utilização de matérias-primas e o consumo de energia (Capítulo 2 - Ponto 2.4), de que resulta uma postura não conducente ao desenvolvimento sustentável e à mitigação das alterações climáticas.

O reconhecimento da origem do fenómeno das alterações climáticas não é, ainda, algo completamente consensual por parte sociedade em geral, ou seja, se estas são devidas à ação do homem ou a fenómenos naturais. No entanto a comunidade científica dá, praticamente, como facto consumado que estes fenómenos foram (e continuam a ser) instigados pelas ações nefastas do Homem (Capítulo 2 - Ponto 2.2), nomeadamente pelo consumo energético e formas de produção da energia – um dos principais responsáveis pela emissão de gases de efeito de estufa para a atmosfera.

O reconhecimento desta problemática pelas classes governativas levou à introdução de novas diretivas e regulamentos com o objetivo de possibilitar o desenvolvimento sustentável das Sociedades, tendo-se verificado que um dos focos principais de intervenção é a eficiência energética. Um exemplo das referidas diretivas é a renovada EPBD – Diretiva Europeia sobre o Desempenho Energético dos Edifícios - obrigando à elaboração de planos nacionais para garantir que os edifícios novos são de energia quase zero, ou a Diretiva 2009/28/CE – obrigando à redução de 20% do consumo energético dos edifícios e utilização de 20% de fontes renováveis até 2020 (Capítulo 2 - Ponto 2.5).

Estas novas diretivas e regulamentos resultaram no substancial aumento do desempenho dos edifícios novos, ampliando ainda mais o fosso entre os edifícios novos e os existentes. Este fosso é ainda mais notório quando se observa o parque edificado Português, com uma elevada percentagem de edifícios com necessidades de reabilitação e com um desempenho energético muito abaixo dos padrões atuais e assim tornando a reabilitação energética dos edifícios algo ainda mais imperioso (Capítulo 2 - Ponto 2.4).

Considerando o potencial crescimento do setor da reabilitação, verificou-se que as tecnologias de reabilitação vulgarmente utilizadas em Portugal não se encontram devidamente otimizadas para as necessidades atuais de reabilitação do parque edificado, carecendo da devida pormenorização e mão-de-obra devidamente qualificada. Por outro lado, requerem tempos de aplicação demasiado morosos, quando se considera que os edifícios se encontram ocupados e não é possível a implementação de um adequado controlo de qualidade da obra final (Capítulo 2 - Ponto 2.5).

Foi assim considerado que uma das tecnologias com maior potencial para o desenvolvimento de soluções inovadoras para a reabilitação de edifícios seria a aplicação da prefabricação, permitindo fazer face aos problemas encontrados nas soluções existentes. Em termos Internacionais, algumas soluções de reabilitação encontram-se já em fase final de desenvolvimento, com resultados positivos, no entanto estas foram desenvolvidas especificamente considerando os parques edificados dos Países onde foram desenvolvidas. Assim considerou-se que o desenvolvimento de uma solução de reabilitação contemplando tecnologias de prefabricação poderia ser algo de interessante para as necessidades atuais do mercado da reabilitação Português (Capítulo 2 - Ponto 2.6).

Para possibilitar a aferição mais detalhada das reais necessidades do parque edificado Português foram utilizadas duas estratégias:

- 1) **Bases de dados SCE** - Inicialmente utilizou-se as bases de dados do sistema de certificação energética Português (SCE), permitindo avaliar, por período de construção, o desempenho energético dos edifícios, tanto em termos gerais como em termos da identificação de alguns parâmetros individuais (Capítulo 4 - Ponto 4.3).
- 2) **Campanha de Medições** – Visto que as bases de dados SCE não permitem avaliar de forma individual os edifícios, mas apenas em termos médios, mas também para complementar os dados obtidos pelas bases de dados do SCE, foi realizada uma campanha de medição do desempenho térmico dos edifícios. Esta, embora com amostras de reduzida dimensão, permitiram, além de avaliar as condições reais de funcionamento dos edifícios existentes, verificar alguns novos parâmetros, tal como a iluminação natural, tendo-se concluído que os parâmetros energéticos com menor desempenho do parque edificado são um elevado valor do coeficiente de transmissão térmica (U) da envolvente opaca dos edifícios, as pontes térmicas e as infiltrações (Capítulo 4 - Ponto 4.4).



Com as necessidades do parque edificado Português devidamente caracterizadas verificou-se que o desenvolvimento de soluções de reabilitação para a fachada dos edifícios seria uma das orientações principais, visto ser o principal elemento da envolvente relativamente às trocas térmicas entre o edifício e o exterior, mas também devido ao facto de ser o elemento que apresenta maiores dificuldades de intervenção. Assim, diversas alternativas para soluções inovadoras de reabilitação de fachadas foram propostas, incluindo a utilização de painéis prefabricados de betão, solução do tipo fachada ventilada e uma solução de módulo de reabilitação prefabricado (Capítulo 5 - Ponto 5.3). Após análise crítica das várias soluções, avaliação comparativa do desempenho energético das soluções e verificação da capacidade técnica de produção da solução por parte da empresa parceira - DST, S.A. - entendeu-se que a solução com maior potencial seria o Módulo de Reabilitação Prefabricado – **MRP** (Capítulo 5 - Ponto 5.4).

Com a solução de reabilitação a desenvolver devidamente identificada, procedeu-se ao desenvolvimento da solução base, e respetiva otimização. Para tal, foi realizada a sua pormenorização em termos de detalhes construtivos, obtenção da espessura de isolamento ótima (em termo de custo-benefício), utilizada a ferramenta THERM para verificação de potenciais pontes térmicas e da ferramenta WUFI para verificação da possibilidade de ocorrência de condensações (Capítulo 6).

A espessura ótima a prever para o isolamento da solução base, para o melhor rácio custo-benefício, foi de 12 cm de isolamento XPS e 5 cm de isolamento de aglomerado negro de cortiça. Com a ferramenta THERM obteve-se um coeficiente de transmissão térmica (U) de  $0.20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  para a zona corrente,  $0.33 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  para a zona de passagem de tubagens e condutas, e de  $0.71 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  para a zona do encaixe. Com a aplicação da ferramenta WUFI foi verificado que, ao longo de um ano, não deverão ocorrer condensações no interior da solução base do módulo MRP (Capítulo 6 – Ponto 6.3).

Para aferição do desempenho térmico do MRP foi necessária a construção de protótipos da solução e respetiva aplicação a um edifício de teste, onde as condições ambientais pudessem ser devidamente controladas – Células de Teste do Campus de Azurém da Universidade do Minho – e subsequente instalação de um sistema de monitorização. Assim foi possível medir o coeficiente de transmissão térmica do módulo – tendo-se obtido valores muito semelhantes aos inicialmente previsto pelas ferramentas de simulação (Capítulo 7 – Ponto 7.4):

- Zona Corrente – Valor medido de  $0.19 \pm 0.004 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ; Valor previsto de  $0.20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ;

- Zona de Tubagens - Valor medido de  $0.30 \pm 0.016 \text{ W/m}^2.\text{K}$ ; Valor previsto de  $0.33 \text{ W/m}^2.\text{K}$ ;

Seguidamente foi necessário validar o desempenho mecânico da solução base em termos práticos, através dos protótipos. A realização dos ensaios mecânicos teve como objetivo a verificação da adequação para utilização como material de revestimento para aplicação de edifícios. Foi assim realizado um ensaio de segurança na utilização e um ensaio de aptidão à utilização, os quais o protótipo do MRP verificou com facilidade (Capítulo 7 – Ponto 7.5).

A partir dos estudos de otimização e da campanha de monitorização da solução base do módulo MRP, foi possível selecionar a solução que apresentasse o melhor desempenho em todos os aspetos e assim escolhida a **Solução final do Módulo MRP**, a qual possui uma dimensão de 1m de altura por 1m de largura, com  $12 \text{ kg/m}^2$  de peso específico, coeficiente de transmissão térmica de  $0,21 \text{ W/m}^2.\text{K}$  e pontes térmicas com pouco significado (Capítulo 8).

Para a verificação do desempenho energético decorrente da aplicação do MRP, foram utilizados dois casos de estudo e aplicadas ferramentas de simulação energética dinâmicas para estimar as necessidades energéticas dos edifícios antes e após a aplicação do MRP (Capítulo 9):

- Caso de estudo I (edifício multifamiliar) – com a aplicação do **MRP** a este edifício foi possível reduzir as necessidades energéticas para aquecimento em **30%** e as necessidades energéticas para arrefecimento em cerca de **32%** (Capítulo 9 – Ponto 9.3);
- Caso de estudo II (moradia unifamiliar) – com a aplicação do **MRP** a este edifício foi possível reduzir as necessidades energéticas para aquecimento em **18%** e as necessidades energéticas para arrefecimento em cerca de **90%** (Capítulo 9 – Ponto 9.4).

No entanto, considerando que as intervenções de reabilitação devem ser ações concertadas e focando toda a envolvente e sistemas dos edifícios, foi também verificado qual o nível de necessidades energéticas possíveis de atingir com a aplicação de uma reabilitação integrada aos casos de estudo, seguindo a mesma metodologia de estudo do que no decorrer dos estudo de aplicação do MRP, tendo-se verificado, para o caso de estudo I, uma redução de 61% das necessidades energéticas globais, e para o caso de estudo II, uma redução de 80% das necessidades energéticas globais.



Resumindo, através dos trabalhos de Investigação e Desenvolvimento realizados foi possível a **caracterização do parque edificado** e, sobretudo, o desenvolvimento de uma solução de reabilitação prefabricada de fachadas dos edifícios – **MRP** – devidamente adaptada ao parque existente, testada e validada com recurso à aplicação e monitorização de protótipos, além do estudo da aplicação do módulo MRP a dois casos de estudo, com diferentes tipologias.

## 11.2 TRABALHOS FUTUROS

Qualquer trabalho de investigação tem no seu cerne a incessante procura de novos métodos e recursos para fomentar o conhecimento. Tal significa que nenhum trabalho de investigação pode ser considerado como terminado, visto existirem sempre novas formas de o aperfeiçoar em consonância com a incessante evolução tecnológica.

Como tal, este trabalho não será exceção, prevendo-se diversas atualizações para o melhor adaptar ao parque edificado existente. Considera-se que aquando da aplicação na prática da solução de reabilitação de fachadas desenvolvida – MRP – irá ser possível a implementação de novas estratégias de otimização, visto possibilitar um mais alargado “feedback” dos vários intervenientes do setor, desde os projetistas até aos clientes finais. Sendo espectável que no seguimento destes comentários seja necessário a realização de algumas adaptações à solução de forma a albergar as diferentes necessidades dos diferentes intervenientes.

De forma a possibilitar a contínua evolução da solução MRP, é fundamental testar a aplicação de novos materiais na solução, verificando as suas vantagens e inconvenientes.

Embora a avaliação do desempenho energético e mecânico do módulo MRP tenha já sido executada, é ainda fulcral para a implementação da solução no mercado a avaliação do desempenho da mesma em outras vertentes, tais como a acústica, resistência ao fogo, entre outros.

Adicionalmente, considerando que os procedimentos e os equipamentos necessários para a medição *in-situ* de diversos parâmetros caracterizadores do desempenho energético dos edifícios estão já disponíveis, será benéfica a continuação da realização das campanhas de medição, possibilitando assim aumentar a base de dados disponível e consequentemente, caracterizar de forma mais eficaz o parque edificado Português.

No entanto, uma das áreas onde se espera que sejam desenvolvidos maiores esforços de investigação, é no desenvolvimento e otimização de metodologias de reabilitação. Considerando as mais recentes tendências de elevado crescimento do mercado da reabilitação



dos edifícios, estas metodologias podem ser de grande auxílio, tanto para os intervenientes no setor – projetistas, donos de obra, instaladores, etc., mas também para os legisladores pois pode permitir conhecer quais os padrões energéticos que os edifícios podem atingir com medidas de reabilitação eficientes.

Para possibilitar o desenvolvimento de uma metodologia de reabilitação adaptada ao parque edificado Português, é necessário a realização dum estudo aprofundado do setor da reabilitação, através da contínua consulta de bases de dados existente, a caracterização aprofundada dos diversos indicadores e sua efetiva importância para os vários intervenientes; compatibilização dos diversos indicadores; realização de inquéritos aos diversos intervenientes com vista a avaliar as diferentes perspetivas; entre outras.

Em resumo, as expectativas futuras prendem-se com a contínua otimização e adaptação às diferentes necessidades do parque edificado, da solução de reabilitação desenvolvida; mas também ao estudo de novas metodologias de reabilitação com vista a aumentar os padrões energéticos dos edifícios existentes, suportado por dados obtidos através da consulta de bases de dados e da continuação das campanhas de medições ao desempenho energético do parque edificado.





### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

*"Não há assunto tão velho que não possa ser dito algo de novo sobre ele." - Fiodor Dostoievski, Escritor. Rússia, 1821 // 1881*



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADENE. Guia da Eficiência Energética. Agência para a Energia. Algés, 2010
- L. Adelard, H. Boyer, F. Garde, J.C. Gatina. A detailed weather data generator for building simulations. *Energy and Buildings* 31 (2000) 75-88
- ADENE. Curso de Formação de Peritos Qualificados do SCE – Módulo Certificação RSECE. Porto, 2011
- S. Aggerholm, H. Erhorn, R. Hitchin, H. Erhorn-Kluttig, B. Poel, K.E. Thomsen, K.B. Wittchen. Cost optimal levels for energy performance requirements. Concerted Action for Energy Performance of Buildings, European Union, July, 2011
- R. Aguiar, R. Coelho, M. Carvalho. Manual de Instalação e Utilização do Software SolTerm. Versão 5.1.3. LNEG - Laboratório Nacional de Energia e Geologia. Lisboa, 2010
- M. Almeida. ECBCS project factsheet - IEA ECBCS Annex 56 – Cost Effective Energy & Greenhouse Gas Optimization in Building Renovation. AECOM Ltd, 2011
- AM16/32<sup>a</sup> Relay Multiplexer – Revision: 11/07, Campbell Scientific, 2007
- F. Antretter, A. Karagiozis, A. TenWolde, A. Holm. Effects of Air Leakage of Residential Buildings in Mixed and Cold Climates. *International Journal Buildings*, Volume X. ASHRAE, 2007
- APA. Sistema de indicadores de desenvolvimento sustentável – SIDS Portugal. Agência Portuguesa do Ambiente. Dezembro, 2007
- Y. Arthus-Bertrand. Home - A Hymn to the Planet and Humanity. Abrams, 2009
- ASHRAE. Advanced Energy Design Guide for Small Office Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2004
- ASTM - C1046 – 95 (2001) - Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components, American Society for Testing and Materials, 1995a



ASTM - C1155 – 95 (2001) - Standard Practice for Determining Thermal Resistance of Building Envelope Components from the In-Situ Data, American Society for Testing and Materials, 1995b

ASTM - E1827 – 96 (2001) - Standard Test Methods for Determining Airtightness of Building Using a Orifice Blower Door. American Society for Testing and Materials, 1996

L. Ayea, T. Ngoa, R.H. Crawfordb, R. Gammampilaa, P. Mendisa. Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. *Energy and Building* 47 (2012) 159-168

R. Baetens(a), B. Petter Jelle, J. Vincent Thue, M. Tenpierik, S. Grynning, S. Uvsløkk, A. Gustavsen, Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond, *Energy and Buildings* 42 (2010) 147-172

R. Baetens(b), B. Petter Jelle, A. Gustavsen, Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review, *Energy and Buildings* 42 (2010) 1361-1368

A. Baio Dias, A. Serra e Sousa. Manual de Alvenaria de Tijolo – 2ª Edição. APICER e CTCV. Outubro, 2009

C. Balaras, K. Droutsas, E. Dascalaki and S. Kontoyiannidis, Deterioration of European apartment buildings, *Energy and Buildings* 37 (2005) 515-527

F. Barth, L. Vefago, Fachadas pré-fabricadas de GRC, *Arquitextos* 092.07 (2008) 12-18

BOMA. Environmental Initiatives Reach out to Existing Buildings. *Building*, Vol. 7(07), Pag. 12–14. 2007

M.T. Boykoff, J. M. Boykoff. Balance as bias: global warming and the US prestige press. *Global Environmental Change* 14 (2004) p. 125 - 136

L. Bragança, M. Almeida, P. Silva, S. Silva. Accuracy of some EPBD Implemented Thermal Performance Calculation Procedures. SB08 - Sustainable Building 2008. Melbourne, Australia, Setembro, 2008

G.Bruntland. Our common future: The World Commission on Environment and Development. Oxford University Press, Oxford, 1987



BSCD. Construção Sustentável – Os principais desafios em Portugal, Sustentabilidade. Newsletter nº6. BCSO Portugal, Março 2006

BSCD. Design Sustentável, Sustentabilidade. Newsletter nº 10. BCSO Portugal, Março 2007

H. Bülow-Hübe. “Daylight in glazed office buildings: A comparative study of daylight availability, luminance and illuminance distribution for an office room with three different glass areas”. Report EBD-R—08/17, Lund University, Department of Architecture and Built Environment, Division of Energy and Building Design, Lund (Sweden) (2008)

M. Ciampi, F. Leccese, G. Tuoni. Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings. Solar Energy, Vol. 75 (2003), Pag. 491-502

Y.-H. Chiang, E. Chan, L. Lok. Prefabrication and barriers to entry—a case study of public housing and institutional buildings in Hong Kong. Habitat International 30 (2006) 482–499

CR800/CR850 Measurement and Control System – Revision: 10/10, Campbell Scientific, 2010

P. de Wilde, M. van der Voorden. Providing computational support for the selection of energy saving building components. Energy and Building 36, 749-758, 2004

Decreto-Lei n.º 319/2009 de 3 de Novembro. Diário da República, 1ª Série, nº 213. Ministério da Economia e da Inovação, 2009

Decreto-Lei n.º 50/2010 de 20 de Maio. Diário da República, 1ª Série, nº 98. Ministério da Economia, da Inovação e do Desenvolvimento, 2009

Decreto-Lei n.º 31/2012 de 14 de Agosto. Diário da República, 1ª Série, nº 157. Assembleia da República, 2012

S. Denga, Y.J. Daia, R.Z. Wanga, T. Matsuura, Y. Yasuib. Comparison study on performance of a hybrid solar-assisted CO2 heat pump. Applied Thermal Engineering 31 (2011) 3696-3705.

DesignBuilder 1.5 User Manual, DesignBuilder Software, Ltd., 2008

DGEG. Balanço Energético. Direção Geral de Energia e Geologia. Divisão de Planeamento e Estatística, 2008

DGEG. Renováveis – estatísticas rápidas Março 2010 Nº 61, Direção Geral de Energia e Geologia, Maio 2010



DGGE. A Energia, os Recursos Geológicos e a Economia - Balanços Energéticos 1990 - 2003, Direcção Geral de Geologia e Energia, 2005

K.C. Ding. Developing a multicriteria approach for the measurement of sustainable performance. Building Research and Information, Vol. 33(1), Pag. 3–16. February 2005

M.-C. Dubois and Å. Blomsterberg. “Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: a literature review”. Energy and Buildings (2010).

G. Dupont, N. Heijmans. Module 1 : Calculer le niveau Ew. Construire Avec l'Énergie naturellement. Économisons l'énergie, Région Wallone, 2008

EDP. Guia Prático da Eficiência Energética – O que saber e fazer para sustentar o futuro. Eletricidade de Portugal, Junho 2006

EN 12464 – 1. Light and lighting – Lighting of work places- Part 1: Indoor work places. The European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2002.

EN 15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. The European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2007

EnergyPlus Manual Version 2.2, United States Department of Energy, 2008

P.-A. Enkvist, T. Naucmér and J. Rosander. “A cost curve for greenhouse gas reduction: A global study of size and cost of measures to reduce greenhouse gas emissions yields important insights for businesses and policy makers”. McKinsey Quarterly: the online journal of McKinsey & Co, 2007

EOTA. Technical Report: Determination of impact resistance of panels and panel assemblies – TR 001. European Organization for Technical Approvals, Fevereiro, 2003

EPBD - European Commission. Energy Performance of Buildings Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council, Official Journal of the European Communities. Brussels, Belgium, 2002



EPBD recast - European Commission. Energy Performance of Buildings Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of May 19 , 2010

EU. Diretiva 2006/32/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 5 de Abril de 2006c

EU. Diretiva 2037/2000/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de Junho de 2000

EU. Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009

EU. Environment fact sheet: A vital EU R&D programme for sustainable development European Commission, Março 2006a

EU. Environment fact sheet: energy for sustainable development. European Commission, Março 2006b

EU. Moving towards clean air for Europe. Environment fact sheet. European Commission. Agosto, 2005

EU. Natura 2000. Factsheet. European Commission. Junho, 2009

Euroconstruct. Country of the Month – Portugal. August, 2005

European Commission. Nearly Zero Energy Buildings in Europe: Perspectives and Paths to 2020. Executive Agency for Competitiveness and Innovation of the European Commission. Brussels, June 2010

European Commission: Directorate General XVII for Energy. A Green Vitruvius: Principles and Practice of Sustainable Architectural Design, James & James, London, 1999

Eurostat. Europe in figures - Eurostat yearbook 2010, European Union, 2010

A. Fallahi, F. Haghighat, H. Elsadi. Energy performance assessment of double-skin façade with thermal mass. Energy and Buildings, 42 (2010): 1499-1509

B. Feibel. Investment Performance Measurement. Wiley, New York, 2003

R. Fidalgo. ISO 14000 – uma certificação para o ambiente. Executive Digest, n.º 51, Janeiro, 1999



E.U. Finlayson, R. Mitchell, D. Arasteh, C. Huizenga, D. Curcija. THERM 2.0 Program Description: A PC program for analysing the two-dimensional heat transfer through building products. Lawrence Berkeley National Laboratory. California, USA, 1998

L. Garris. Four Ways to shrink Your Building's Carbon Footprint. *Building*, Vol. 8(07), Pag. 34–38. 2007

E. Giancola, C. Sanjuan, E. Blanco, M.R. Heras. Experimental assessment and modelling of the performance of an open joint ventilated façade during actual operating conditions in Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, Vol. 54 (2012), Pag. 363-375.

Google SketchUp Version 7.0 (2008).Google Inc.

Google SketchUp. Version 7.0. Google Inc, 2008

P. Hanselaer, C. Lootens, W.R. Ryckaert, G. Deconinck and P. Rombauts. “Power density targets for efficient lighting of interior task areas”. *Lighting Research and Technology* 39(2): 171-184 (2007)

N. Hashemi, R. Fayaz, M. Sarshar, Thermal behaviour of a ventilated double skin facade in hot arid climate. *Energy and Buildings* 42 (2010) 1823-1832

HEED – Home Energy Efficient Design. Version 4.0 – Build 30. UCLA - University of California, Los Angeles, 2012.

F. Herkommer, B. Bley, CAD/CAM for the prefabrication of brickwork. *Automation in Construction* 4 (1996) 321-329

HFP01 Soil Heat Flux Plate Instruction Manual, Campbell Scientific, 2007

J. Hirsh. eQuest – Introductory Manual. James J. Hirsch, 2003

T.Y. Hsieh, The economic implications of subcontracting practice on building Prefabrication. *Automation in Construction* 6 (1997) 163 – 174

IEA ECBCS Annex 50, Retrofit Strategies Design Guide. P. Schwehr, R. Fischer, S. Geier. ISBN 978-3-905594-59-1. Empa, Suíça (2011a)



IEA ECBCS Annex 50, Retrofit Simulation Report. G. Zweifel, M. Descamps, R. Fischer, S. Moosberger, O. Sikula, P. Silva, M. Almeida. Empa, Suíça (2011b)

IEA ECBCS Annex 50, Retrofit Module Design Guide. R. Kobler, A. Binz, G. Steinke, K. Höfler, S. Geier, J. Aschauer, S. Cousin, P. Delouche, F. Radelet, B. Ruot, L. Reynier, P. Gobin, T. Duforestel, G. Senior, X. Boulanger, P. Silva, M. Almeida. ISBN 978-3-905594-60-7. Empa, Suíça (2011c)

IEA Energy Balances. IEA Energy Statistics, International Energy Agency, 2002

INE. Censos 2001. Instituto Nacional de Estatística, I.P. Lisboa, 2002

INE. Estatísticas da Construção e Habitação 2007. Instituto Nacional de Estatística, I.P. Lisboa, 2008

INE. Estatísticas da Construção e Habitação 2008. Instituto Nacional de Estatística, I.P. Lisboa, 2009

INE. Estatísticas do ambiente. Instituto Nacional de Estatística, I.P., 2006

IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp, 2007

ISO 9000:2000. Norma Portuguesa – sistemas de gestão da qualidade: fundamentos e vocabulário. IPQ - Instituto Português da Qualidade. Março, Caparica, 2001

O.M. Jensen, K.B. Wittchen, K.E. Thomsen. EuroACE. Towards Very Low Energy Buildings. Hørsholm. Danish Building Research Institute SBI 2009:03

H.M. Künzeli; A.N. Karagiozis; A. Holm. 2001. WUFI-ORNL/IBP – A North American Hygrothermal Model, 2001

G. Lin, S. Nagalingam. CIM justification and optimisation. Taylor & Francis. London, 2000

L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernández, Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, Energy and Buildings 15 (2011) 1676-1695



- D. Lorenz. Facing Reality – Climate change, Environmental degradation, Disconnectedness & The role of real property. MRICS - University of Karlsruhe, January 2008
- E. Maldonado. Towards Zero-Energy Buildings: EU Policy for Energy Efficiency in Buildings. Apresentação na EXPO Shangai, 2010
- A. Manseau & G. Seaden (Eds.). Innovation in construction: An international review of public polices. London and NY. Spon Press, 2001
- M. Maystre, J. Pictet and J. Simos. Methodes multicriteres Electre. EPFL Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne ,1994
- B. Meacham, R. Bowen, J. Traw and A. Moore. Performance-based building regulation: current situation and future needs. Building Research and Information, Vol. 33(2), Pag. 91–106. April, 2005
- R. Miloni, N. Grischott, M. Zimmermann, S. Geier, K. Höfler, D. Venus, C. Boonstra. Building Renovation Case Studies IEA ECBCS Annex 50. Empa - Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, March 2011
- Minneapolis Blower Door. Building Air tightness Testing Systems. The Energy Conservatory. Minneapolis, 2010
- S. Monteiro Silva. A Sustentabilidade e o Conforto das Construções. Dissertação de Doutoramento da Universidade do Minho, Guimarães, 2009
- L. Moreira. Medição de Temperatura Usando-se Termopar, Cerâmica Industrial, 2002
- NT-SCE-01 – Nota Técnica - Método de cálculo simplificado para a certificação energética de edifícios existentes no âmbito do RCCTE. ADENE, 2009
- F. Paes Afonso, B. Martins, C. Vital, D. Adão, F. Neves, L. Martins, M. Ramalho. O Mercado da Reabilitação: Enquadramento, Relevância e Perspectivas. AICCOPN, Lisboa, 2009
- M.C. Peel, B.L. Finlayson, T.A. McMahon. Updated World map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth System Sciences, 11 (2007) 1633-1644
- M.Pinheiro. Ambiente e Construção Sustentável. Instituto do Ambiente, Amadora 2006



PNAC - Programa Nacional para as Alterações Climáticas, Resolução do Conselho de Ministros n.º 1/2008 de Abril, 2008

PNAEE - Plano Nacional de Acção para a Eficiência Energética, Resolução do Conselho de Ministros n.º 80/2008 de Maio, 2008

B. Poel, G. van Cruchten, C.A. Balaras, Energy performance assessment of existing dwellings, Energy and Buildings 39 (2007) 393-403

DGEG/MEID, PORDATA. Produção de energia eléctrica: total e a partir de fontes renováveis – Portugal, 2012 (<http://www.pordata.pt> - Última actualização: 2012-02-07)

Presidência do Conselho de Ministros. Resolução do Conselho de Ministros n.o 104/2006. Diário da República, 1.a série, nº162, 23 de Agosto de 2006

J. Rabun, R. Kelso. Building Evaluation for Adaptive Reuse and Preservation. John Wiley & Sons, inc. New Jersey, USA, 2009

M.S. Rae. The IESNA Lighting Handbook, Reference & Application, 9th edition, New York, NY, IESNA, 2000

RCCTE - Decreto-Lei n.º 40/90 de 6 de Fevereiro. Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios, 1990

RCCTE - Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril. Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios, 2006

RCCTE-STE. Programa de Aplicação da Regulamentação Energética de Edifícios. Versão 2.3. INETI, 2007

Resolução do Conselho de Ministros n.º 169/2005 de 24 de Outubro. Diário da República, 1º Série B, nº 204. Presidência do Conselho de Ministros, 2005

R.B. Richard, Industrialized building systems: reproduction before automation and robotics, Automation in Construction 14 (2005) 442-451.

R. Rihani, L. Bernold, Methods of control for robotic brick masonry. Automation in Construction 4 (1996) 281-292.



M. Rogers. Using Electre III to aid the choice of housing construction process within structural engineering, *Construction Management and Economics*, 18 (2000), 333-342

C.A. Roulet et al. ORME: Office Building Rating Methodology for Europe. Office Project Report, University of Athens, 1999

B. Roy. Electre III - Algorithme de classement base sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples". *Cahiers de CERO*, Vol. 20 (1978), 3 - 24.

RSECE - Decreto-Lei n.º 118/98 de 7 de Maio. Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, 1998

RSECE - Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril. Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios, 2006

B. Ruot. RECOLCI / Task 1.1 - French housing stock built between 1949 and 1974. CSTB and IEA ECBCS Annex 50, 2010

M. Santamouris, A. Argiriou, E. Dascalaki, C. Balaras and A. Gaglia. "Energy characteristics and savings potential in office buildings". *Solar Energy* 52(1): 59-66 (1994)

F. Santo. Reabilitação, Requalificação, Reciclagem. Ordem dos Engenheiros. *Revista Ingenium*, II Série, Numero 113, Setembro/Outubro 2009

C.P. Santos, L.M.C. Matias. ITE 50 - Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios. LNEC. Lisboa, 2006

A. Santos. Desenvolvimento de uma Metodologia de Caracterização das Condições de Iluminação Natural nos Edifícios Baseada na Avaliação "in situ", Tese de Mestrado. LNEC/FCUL, Lisboa, Portugal, 2002.

SBEM. A Technical Manual for SBEM. Communities and Local Government, UK, 2011

SCE - Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril. Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios, 2006

P. Silva, M. Almeida, L. Bragança, V. Mesquita. Methodology to Enhance the Portuguese Thermal Regulation Accuracy for Existing Buildings. BS2009 – Building Simulation 2009. Glasgow, Escócia, Julho, 2009a.



P. Silva, M. Almeida, L. Bragança, V. Mesquita. Performance evaluation of non-conventional constructions: Case study in a temperate climate. *Applied Thermal Engineering*, 42 (2012) 132 - 144

P. Silva, S. Silva, M. Almeida, L. Bragança. Accuracy of the Portuguese EPBD Implemented Thermal Performance Calculation Procedures – RCCTE. BS2009 – Building Simulation 2009. Glasgow, Escócia, Julho, 2009b.

P. Silva. Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2006

Solterm. Análise de Desempenho de Sistemas Solares Térmicos e Fotovoltaicos. Versão 5.1.4. LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P., 2012.

J.C. Stephensa, J. Bielickib, G.M. Rand. Learning about carbon capture and storage: Changing stakeholder perceptions with expert information. *Energy Procedia* 1 (2009) 4655-4663.

P.A. Strachan, L. Vandaele.. Case studies of outdoor testing and analysis of building components. *Building and Environment* 43, 129-142, 2008.

M. Todorovic, J.T. Kim. Buildings energy sustainability and health research via interdisciplinarity and harmony. *Energy and Buildings* 47 (2012) p. 12-18.

P. Torcellini, S. Pless, M. Deru and D. Crawley. Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. National Renewable Energy Laboratory. Conference Paper NREL/CP-550-39833, June 2006.

Trisco. 3D steady state heat transfer rectangular blocks. Version 12.0. Physibel, 2010

A.F. Tzikopoulos, M.C. Karatza, J.A. Paravantis. Modeling energy efficiency of bioclimatic buildings. *Energy and Building* 37, 529-544, 2005.

UN. Relatório de Desenvolvimento Humano 2007/2008 – Combater as alterações climáticas: Solidariedade humana num mundo dividido, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, 2007

UNDP. Human Development Report 2011, Sustainability and Equity: A Better Future for All. United Nations Development Programme, NY, USA, 2011.



United Nations. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1998

Vaisala Weather Transmitter WXT520 – User’s Guide, Vaisala Oyj, 2008

VisualDOE Version 4.1.2. Architectural Energy Corporation, 2010

L.O. Williams. An End to Global Warming. Pergamon (Elsevier), USA, 2002

G. Winch. Models of Manufacturing and the construction process: the genesis of Re-engineering construction. Building Research & Information, 31 (2003) 107-118.

M. Zimmerman, Annex 50 - Prefabricated Systems for Low Energy / High Comfort Building Renewal. International Energy Agency. Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme, 2006a

M. Zimmermann. IEA ECBCS Annex 50 - Prefabricated Renewal of Buildings - Status Report 1. ECBCS ExCo meeting, Oslo, Norway, Junho 2006b

J. Zhou, Y. Chen. A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14 (2010), Pag. 1321-1328.





## ANEXOS

*"Nós damos forma aos nossos edifícios... Depois são eles que nos moldam." - Winston Churchill*  
– *Político. Reino Unido, 1874 // 1965*



## **ANEXO I – BASES DE DADOS DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DOS EDIFÍCIOS (SCE)**



## Valores para todos os edifícios residenciais certificados à data de 09-12-2011

	CE após DCR	CE	Total Geral
<b>Media Envolvente Coef Trans Term</b> (W/m2.K)			
<b>Num Edifícios</b>	.67	1.57	1.51
<b>Media Energ Aquecimento</b> (kWh/m2.ano)	12601	326251	338852
<b>Media Pe Direito Medio (m)</b>	68.41	118.01	116.16
<b>Media Sistema Solar AQS Area</b> <b>Colectores (m2)</b>	2.70	2.70	2.70
<b>Media Ventilacao Taxa Renov</b> (RPH)	7.04	11.93	10.35
<b>Media Envidracado Factor Solar</b>	.92	4.22	4.09
<b>Media Envidracado Coef Trans</b> <b>Term (W/m2.K)</b>	.23	.29	.29
<b>Media COP Aquecimento</b>	2.93	3.75	3.72
<b>Num Sistemas Aquecimento</b>	1.96	2.62	2.58
<b>Media Contribuicao Energ</b> <b>Renovaveis (kWh/ano)</b>	11608	182598	194206
<b>Media Potencia AQS (kW)</b>	4,553.13	797.84	926.33
<b>Media Rendimento AQS</b>	19.34	25.02	24.77
<b>Num AQS</b>	18.97	28.27	27.87
<b>Media Area Pavimento</b>	12115	267625	279740
<b>Media Emissoes CO2 Primaria (ton)</b>	134.75	98.52	99.87
<b>Media Energ Arrefecimento</b> (kWh/m2.ano)	.48	1.02	1.00
<b>Media Energ Primaria</b> (kgep/m2.ano)	8.27	10.29	10.22
<b>Num Colectores Solares</b>	3.18	10.23	9.97
<b>Percentagem_Edificios com</b> <b>Colectores Solares</b>	12058	25272	37330
<b>Num Envolventes</b>	95.69%	7.75%	11.02%
<b>Media Potencia Aquecimento (kW)</b>	102955	1408094	151104 9
<b>Media Rendimento Aquecimento</b>	9.64	8.13	8.22
<b>Media COP Arrefecimento</b>	16.57	25.73	25.18
<b>Media Potencia Arrefecimento</b> (kW)	1.25	1.48	1.47
<b>Media Rendimento Arrefecimento</b>	3.54	3.40	3.41
<b>Num Sistemas Arrefecimento</b>	4.00	12.93	12.27
<b>Media Envolvente Coef Trans Term</b> (W/m2.K)	10409	131642	142051


**Valores para os edifícios residenciais construídos até 1950 certificados à data de 09-12-2011**

	CE após DCR	CE	Total Geral
<b>Media Envolvente Coef Trans Term (W/m2.K)</b>			
<b>Num Edifícios</b>	.60	2.11	2.11
<b>Media Energ Aquecimento (kWh/m2.ano)</b>	2	9866	9868
<b>Media Pe Direito Medio (m)</b>	66.98	200.38	200.35
<b>Media Sistema Solar AQS Area Colectores (m2)</b>	2.60	2.88	2.88
<b>Media Ventilacao Taxa Renov (RPH)</b>	4.25	3.22	3.23
<b>Media Envidracado Factor Solar</b>	.93	.83	.83
<b>Media Envidracado Coef Trans Term (W/m2.K)</b>	.27	.41	.41
<b>Media COP Aquecimento</b>	3.28	4.11	4.11
<b>Num Sistemas Aquecimento</b>	.00	.25	.25
<b>Media Contribuicao Energ Renovaveis (kWh/ano)</b>	2	4171	4173
<b>Media Potencia AQS (kW)</b>		49.90	49.90
<b>Media Rendimento AQS</b>	4.25	19.81	19.80
<b>Num AQS</b>	.88	17.56	17.55
<b>Media Area Pavimento</b>	2	5628	5630
<b>Media Emissoes CO2 Primaria (ton)</b>	111.77	83.32	83.33
<b>Media Energ Arrefecimento (kWh/m2.ano)</b>	.70	1.28	1.28
<b>Media Energ Primaria (kgep/m2.ano)</b>	17.58	15.11	15.11
<b>Num Colectores Solares</b>	5.15	15.07	15.07
<b>Percentagem_Edificios com Colectores Solares</b>	2	133	135
<b>Num Envolventes</b>	100.00%	1.35%	1.37%
<b>Media Potencia Aquecimento (kW)</b>	22	40581	40603
<b>Media Rendimento Aquecimento</b>	.00	3.20	3.20
<b>Media COP Arrefecimento</b>	.00	6.20	6.20
<b>Media Potencia Arrefecimento (kW)</b>	.00	.51	.51
<b>Media Rendimento Arrefecimento</b>	.00	.85	.85
<b>Num Sistemas Arrefecimento</b>	.00	4.07	4.07
<b>Media Envolvente Coef Trans Term (W/m2.K)</b>	2	3995	3997



**Valores para os edifícios residenciais construídos entre 1950-1970 certificados à data de 09-12-2011**

<b>Valores</b>	<b>CE após DCR</b>	<b>CE</b>	<b>Total Geral</b>
<b>Media Envolvente Coef Trans Term (W/m2.K)</b>	.80	1.86	1.86
<b>Num Edifícios</b>	14	15642	15656
<b>Media Energ Aquecimento (kWh/m2.ano)</b>	80.02	177.65	177.56
<b>Media Pe Direito Medio (m)</b>	2.54	2.77	2.77
<b>Media Sistema Solar AQS Area Colectores (m2)</b>	13.43	1.56	2.42
<b>Media Ventilacao Taxa Renov (RPH)</b>	.84	.97	.97
<b>Media Envidracado Factor Solar</b>	.20	.35	.35
<b>Media Envidracado Coef Trans Term (W/m2.K)</b>	2.85	4.20	4.20
<b>Media COP Aquecimento</b>	.62	.38	.38
<b>Num Sistemas Aquecimento</b>	12	6921	6933
<b>Media Contribuicao Energ Renovaveis (kWh/ano)</b>	1,846.41	105.02	157.79
<b>Media Potencia AQS (kW)</b>	23.75	19.42	19.43
<b>Media Rendimento AQS</b>	50.06	19.32	19.36
<b>Num AQS</b>	14	10639	10653
<b>Media Area Pavimento</b>	94.77	77.24	77.25
<b>Media Emissoes CO2 Primaria (ton)</b>	.37	1.64	1.64
<b>Media Energ Arrefecimento (kWh/m2.ano)</b>	9.43	13.61	13.61
<b>Media Energ Primaria (kgep/m2.ano)</b>	3.07	19.45	19.44
<b>Num Colectores Solares</b>	12	154	166
<b>Percentagem_Edificios com Colectores Solares</b>	85.71%	0.98%	1.06%
<b>Num Envolventes</b>	127	66585	66712
<b>Media Potencia Aquecimento (kW)</b>	2.48	1.38	1.38
<b>Media Rendimento Aquecimento</b>	.08	6.20	6.19
<b>Media COP Arrefecimento</b>	.61	.79	.79
<b>Media Potencia Arrefecimento (kW)</b>	.45	.57	.57
<b>Media Rendimento Arrefecimento</b>	.00	3.80	3.80
<b>Num Sistemas Arrefecimento</b>	11	6597	6608



**Valores para os edifícios residenciais construídos entre 1970-1990 certificados à data de  
09-12-2011**

<b>Valores</b>	<b>CE após DCR</b>	<b>CE</b>	<b>Total Geral</b>
<b>Media Envolvente Coef Trans Term (W/m2.K)</b>	1.00	1.76	1.76
<b>Num Edifícios</b>	9	49127	49136
<b>Media Energ Aquecimento (kWh/m2.ano)</b>	89.83	136.91	136.90
<b>Media Pe Direito Medio (m)</b>	2.57	2.74	2.74
<b>Media Sistema Solar AQS Area Colectores (m2)</b>	1,154.60	1.66	9.60
<b>Media Ventilacao Taxa Renov (RPH)</b>	.96	1.02	1.02
<b>Media Envidracado Factor Solar</b>	.23	.30	.30
<b>Media Envidracado Coef Trans Term (W/m2.K)</b>	2.92	4.26	4.26
<b>Media COP Aquecimento</b>	2.04	.91	.91
<b>Num Sistemas Aquecimento</b>	7	22755	22762
<b>Media Contribuicao Energ Renovaveis (kWh/ano)</b>	7,107.50	439.72	462.25
<b>Media Potencia AQS (kW)</b>	22.92	21.81	21.81
<b>Media Rendimento AQS</b>	12.24	19.33	19.33
<b>Num AQS</b>	9	38701	38710
<b>Media Area Pavimento</b>	157.83	80.43	80.45
<b>Media Emissoes CO2 Primaria (ton)</b>	.82	1.26	1.26
<b>Media Energ Arrefecimento (kWh/m2.ano)</b>	11.59	10.56	10.56
<b>Media Energ Primaria (kgep/m2.ano)</b>	5.93	14.50	14.49
<b>Num Colectores Solares</b>	4	577	581
<b>Percentagem_Edificios com Colectores Solares</b>	44.44%	1.17%	1.18%
<b>Num Envolventes</b>	50	202454	202504
<b>Media Potencia Aquecimento (kW)</b>	9.50	2.85	2.85
<b>Media Rendimento Aquecimento</b>	57.40	9.72	9.73
<b>Media COP Arrefecimento</b>	2.09	.81	.81
<b>Media Potencia Arrefecimento (kW)</b>	5.04	.92	.92
<b>Media Rendimento Arrefecimento</b>	50.17	6.04	6.05
<b>Num Sistemas Arrefecimento</b>	6	21060	21066



**Valores para os edifícios residenciais construídos entre 1990-2006 certificados à data de  
09-12-2011**

<b>Valores</b>	<b>CE após DCR</b>	<b>CE</b>	<b>Total Geral</b>
<b>Media Envolvente Coef Trans Term</b> (W/m2.K)	.95	1.59	1.59
<b>Num Edifícios</b>	17	91642	91659
<b>Media Energ Aquecimento</b> (kWh/m2.ano)	91.15	115.54	115.54
<b>Media Pe Direito Medio</b> (m)	2.64	2.68	2.68
<b>Media Sistema Solar AQS Area Colectores</b> (m2)	8.71	7.57	7.58
<b>Media Ventilacao Taxa Renov</b> (RPH)	1.01	1.04	1.04
<b>Media Envidracado Factor Solar</b>	.30	.26	.26
<b>Media Envidracado Coef Trans Term</b> (W/m2.K)	3.04	3.71	3.71
<b>Media COP Aquecimento</b>	.80	2.42	2.42
<b>Num Sistemas Aquecimento</b>	13	55623	55636
<b>Media Contribuicao Energ Renovaveis</b> (kWh/ano)	5,886.50	939.07	957.88
<b>Media Potencia AQS</b> (kW)	22.14	23.40	23.40
<b>Media Rendimento AQS</b>	.73	23.87	23.86
<b>Num AQS</b>	17	78864	78881
<b>Media Area Pavimento</b>	125.51	100.18	100.18
<b>Media Emissoes CO2 Primaria</b> (ton)	.54	1.06	1.06
<b>Media Energ Arrefecimento</b> (kWh/m2.ano)	11.27	8.08	8.08
<b>Media Energ Primaria</b> (kgep/m2.ano)	4.39	9.95	9.95
<b>Num Colectores Solares</b>	12	1197	1209
<b>Percentagem_Edificios com Colectores Solares</b>	70.59%	1.31%	1.32%
<b>Num Envolventes</b>	102	381179	381281
<b>Media Potencia Aquecimento</b> (kW)	17.65	9.07	9.07
<b>Media Rendimento Aquecimento</b>	.64	21.83	21.82
<b>Media COP Arrefecimento</b>	.62	1.24	1.24
<b>Media Potencia Arrefecimento</b> (kW)	1.55	3.31	3.31
<b>Media Rendimento Arrefecimento</b>	.10	10.27	10.26
<b>Num Sistemas Arrefecimento</b>	10	38264	38274



**Valores para os edifícios residenciais construídos entre 2006-2011 certificados à data de 09-12-2011**

Valores	CE após DCR	CE	Total Geral
<b>Media Envolvente Coef Trans Term (W/m2.K)</b>	.67	1.17	1.09
<b>Num Edifícios</b>	11602	104582	116184
<b>Media Energ Aquecimento (kWh/m2.ano)</b>	69.41	88.87	86.93
<b>Media Pe Direito Medio (m)</b>	2.71	2.66	2.67
<b>Media Sistema Solar AQS Area Colectores (m2)</b>	6.33	13.40	10.97
<b>Media Ventilacao Taxa Renov (RPH)</b>	.92	1.00	.99
<b>Media Envidracado Factor Solar</b>	.24	.29	.28
<b>Media Envidracado Coef Trans Term (W/m2.K)</b>	2.93	3.24	3.20
<b>Media COP Aquecimento</b>	1.99	3.46	3.27
<b>Num Sistemas Aquecimento</b>	10880	73395	84275
<b>Media Contribuicao Energ Renovaveis (kWh/ano)</b>	4,719.03	1,167.52	1,418.33
<b>Media Potencia AQS (kW)</b>	19.20	33.20	31.64
<b>Media Rendimento AQS</b>	18.34	33.06	31.42
<b>Num AQS</b>	11155	89174	100329
<b>Media Area Pavimento</b>	135.41	113.17	115.39
<b>Media Emissoes CO2 Primaria (ton)</b>	.48	.78	.75
<b>Media Energ Arrefecimento (kWh/m2.ano)</b>	8.08	10.53	10.29
<b>Media Energ Primaria (kgep/m2.ano)</b>	3.19	5.83	5.56
<b>Num Colectores Solares</b>	11100	21075	32175
<b>Percentagem_Edificios com Colectores Solares</b>	95.67%	20.15%	27.69%
<b>Num Envolventes</b>	95129	485280	580409
<b>Media Potencia Aquecimento (kW)</b>	9.68	10.58	10.46
<b>Media Rendimento Aquecimento</b>	17.17	33.99	31.82
<b>Media COP Arrefecimento</b>	1.22	1.85	1.75
<b>Media Potencia Arrefecimento (kW)</b>	3.54	5.19	4.92
<b>Media Rendimento Arrefecimento</b>	4.20	15.38	13.54
<b>Num Sistemas Arrefecimento</b>	9765	49634	59399



## **ANEXO II – GRÁFICOS DA CAMPANHA DE MEDIÇÕES A EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS**



### Caso de Estudo 1 - Edifício Unifamiliar em Braga

As Figuras All.1 a All.4 apresentam os valores medidos no decorrer da campanha de medições para o caso de estudo 1, relativamente à Temperatura (interior e superficial exterior), Humidade relativa, Iluminância e taxa de infiltração, respetivamente.

#### Temperatura (°C)

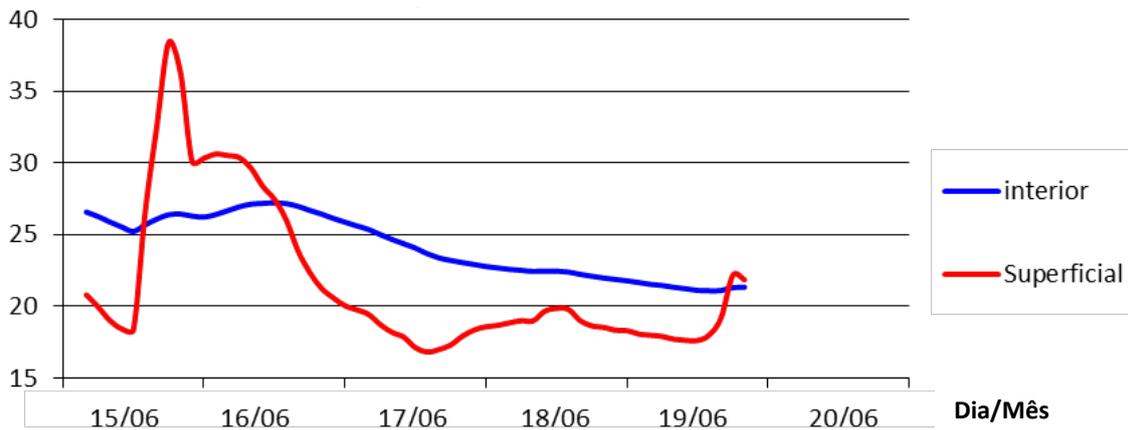


Figura All.1 – Temperatura medida no edifício CS1.

#### Humidade Relativa (%)

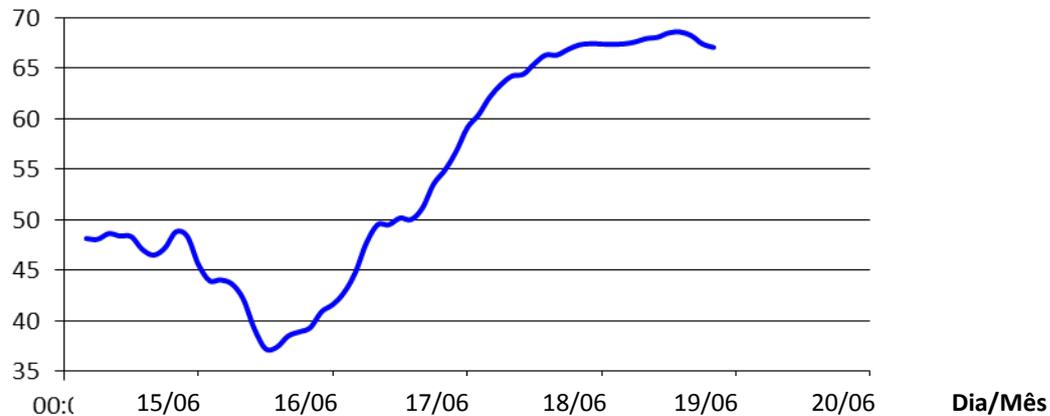


Figura All.2 – Humidade relativa medida no edifício CS1.



**Iluminância (Lux)**

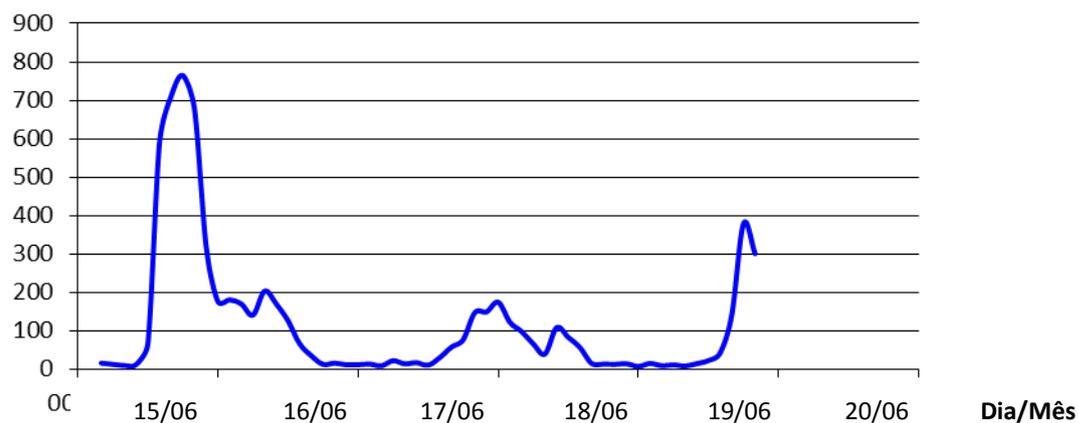


Figura AII.3 – Iluminância medida no edifício CS1.

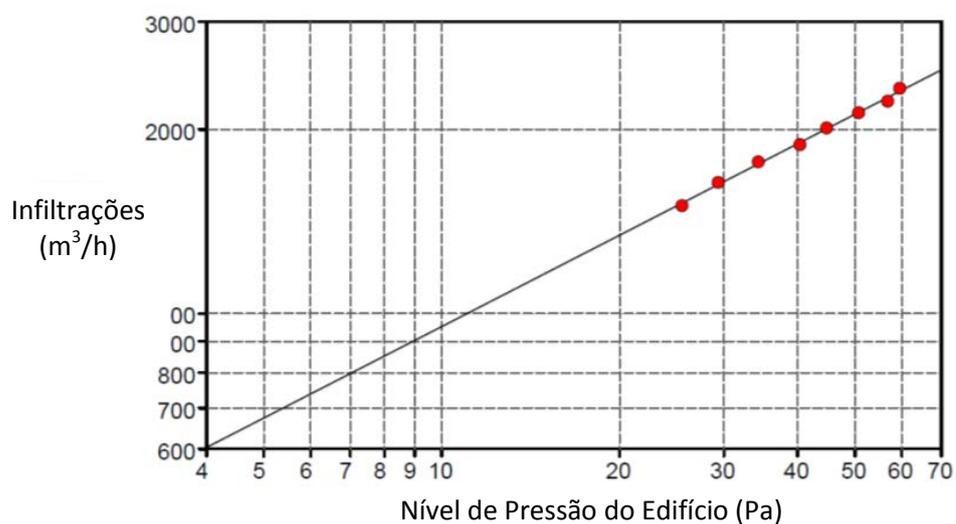


Figura AII.4 – Teste de infiltrações do edifício CS1.



## Caso de Estudo 2 - Edifício Unifamiliar em Braga (Aldeia de Leste)

A Figura AII.5 apresenta os valores medidos no decorrer da campanha de medições para o caso de estudo 2, relativamente à taxa de infiltração.

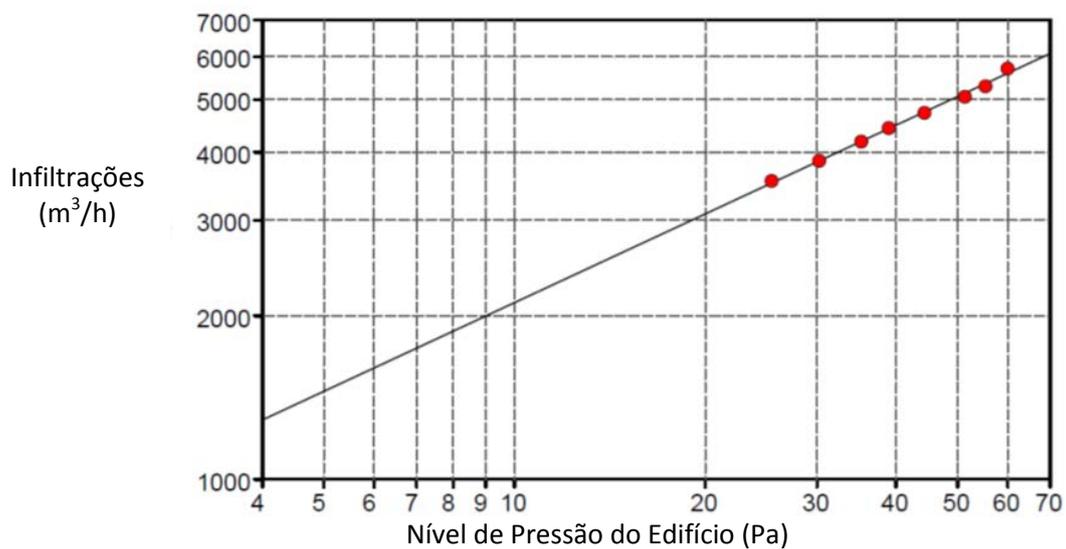


Figura AII.5 – Teste de infiltrações do edifício CS2.



### Caso de Estudo 3 - Edifício Unifamiliar em Fafe

As Figuras AII.6 a AII.9 apresentam os valores medidos no decorrer da campanha de medições para o caso de estudo 3, relativamente à Temperatura (interior e superficial interior e exterior), Humidade relativa, Iluminância e taxa de infiltração, respetivamente.

#### Temperatura (°C)

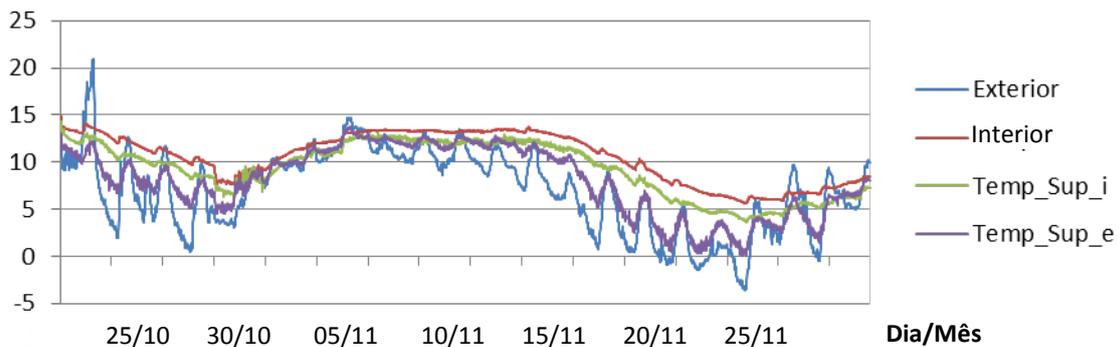


Figura AII.6 – Temperatura medida no edifício CS3.

#### Humidade Relativa (%)

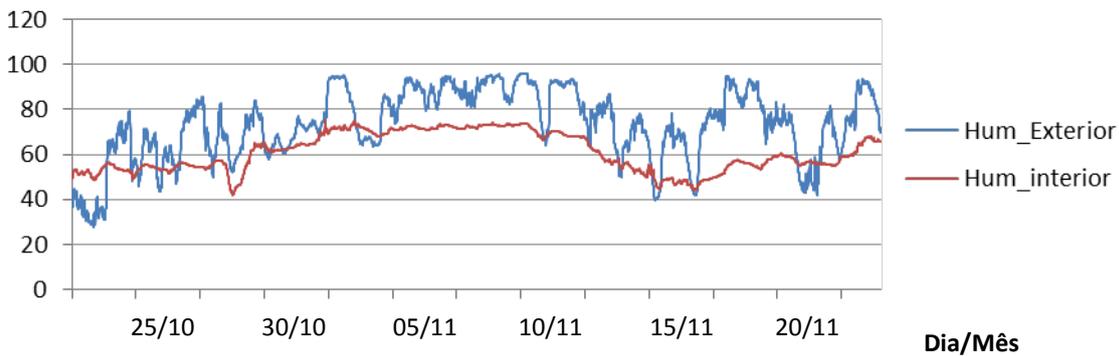


Figura AII.7 – Humidade relativa medida no edifício CS3.

#### Iluminância (Lux)

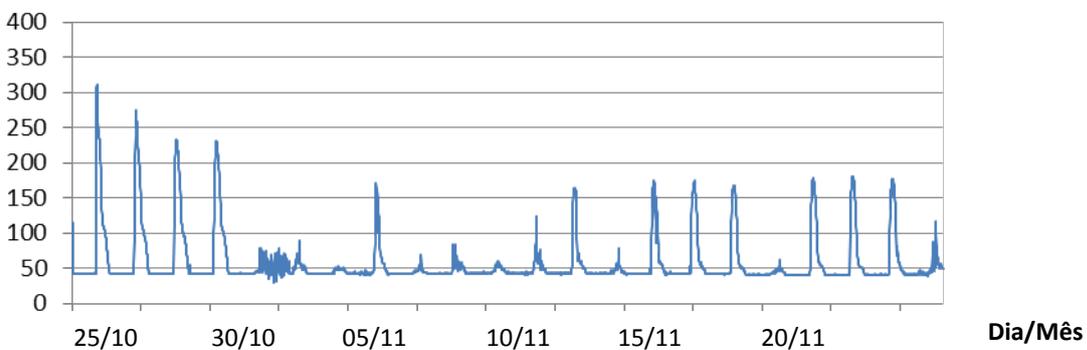


Figura AII.8 – Iluminância medida no edifício CS3.

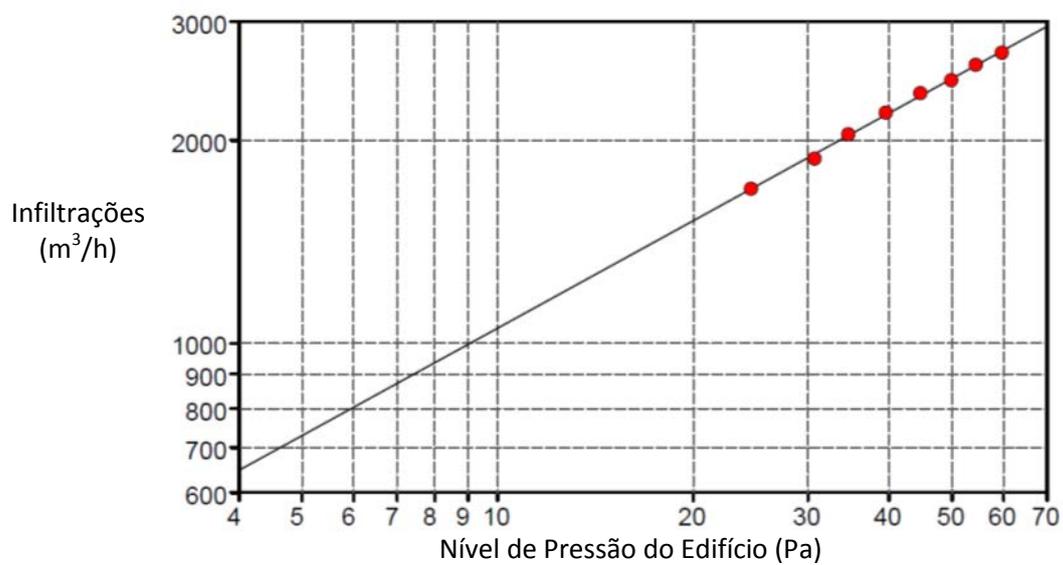


Figura All.9 – Teste de infiltrações do edifício CS3.



#### Caso de Estudo 4 - Edifício Unifamiliar na Guarda

As Figuras AII.10 a AII.13 apresentam os valores medidos no decorrer da campanha de medições para o caso de estudo 4, relativamente à Temperatura (interior e superficial interior e exterior), Humidade relativa, Iluminância e taxa de infiltração, respetivamente.

##### Temperatura (°C)

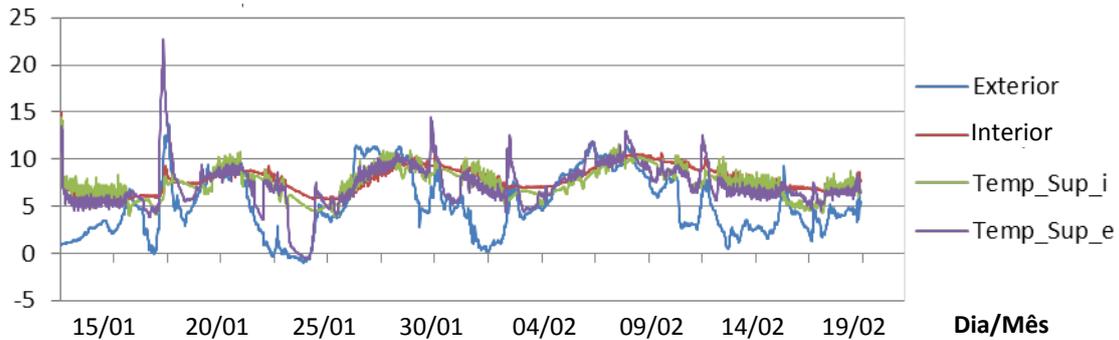


Figura AII.10 – Temperatura medida no edifício CS4.

##### Humidade Relativa (%)

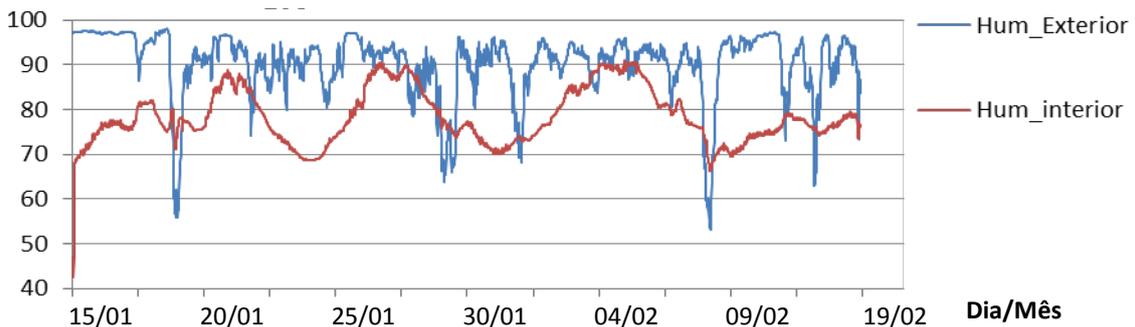


Figura AII.11 – Humidade relativa medida no edifício CS4.

##### Iluminância (Lux)

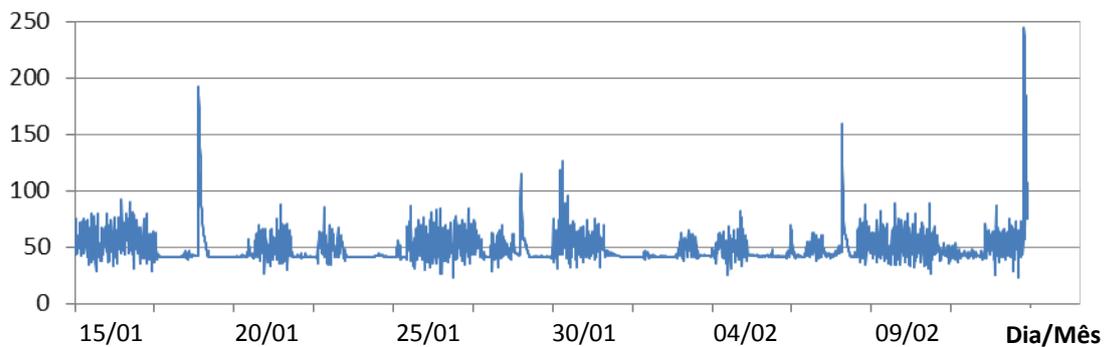


Figura AII.12 – Iluminância medida no edifício CS4.

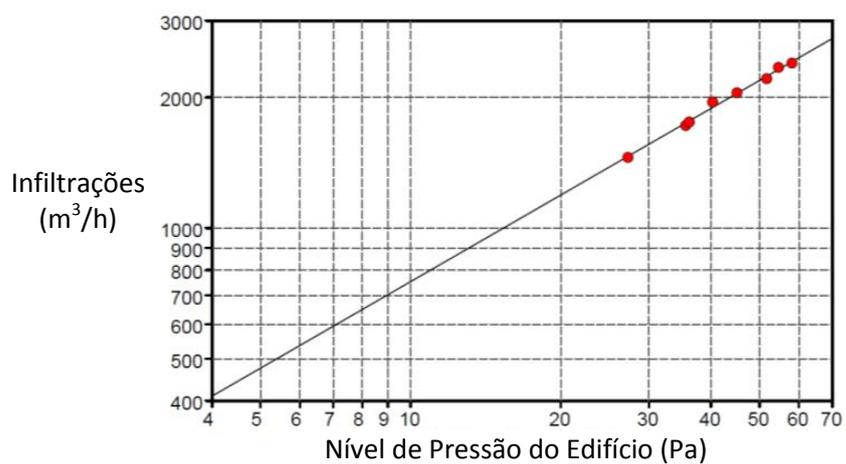


Figura AII.13 – Teste de infiltrações do edifício CS4.



### Caso de Estudo 5 - Edifício Multifamiliar em Guimarães

As Figuras All.14 e All.15 apresentam os valores medidos no decorrer da campanha de medições para o caso de estudo 5, relativamente à Temperatura (interior e superficial exterior) e Humidade relativa, respetivamente.

#### Temperatura (°C)

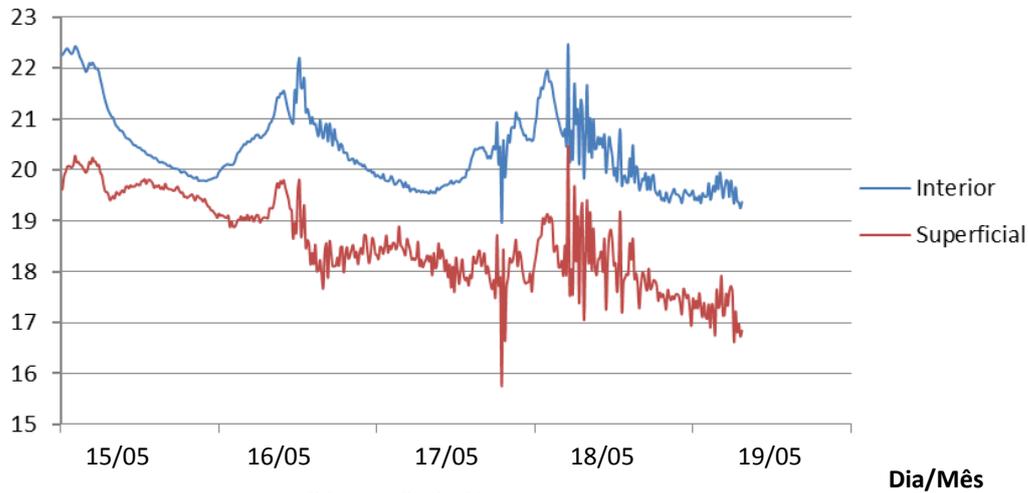


Figura All.14 – Temperatura medida no edifício CS5.

#### Humidade Relativa (%)

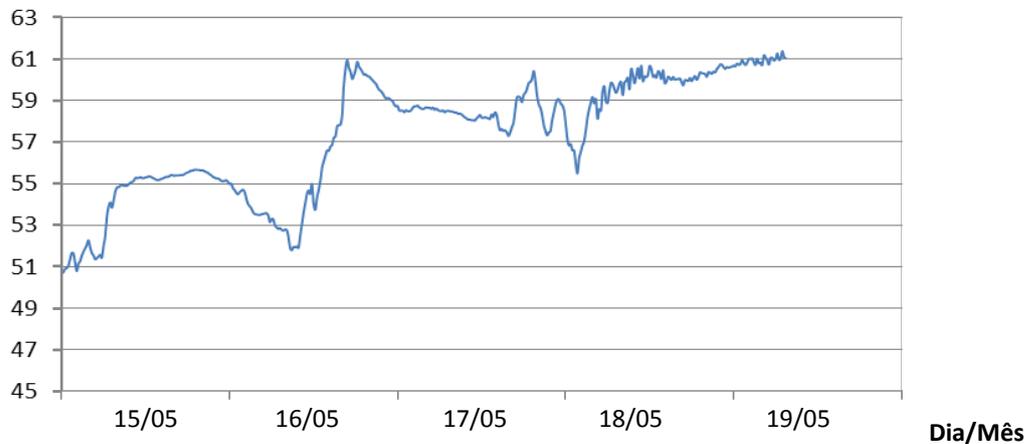


Figura All.15 – Humidade relativa medida no edifício CS5.



### Caso de Estudo 6 - Edifício Unifamiliar em Guimarães

As Figuras All.16 e All.17 apresentam os valores medidos no decorrer da campanha de medições para o caso de estudo 6, relativamente à Temperatura (interior e superficial exterior) e Humidade relativa, respetivamente.

#### Temperatura (°C)

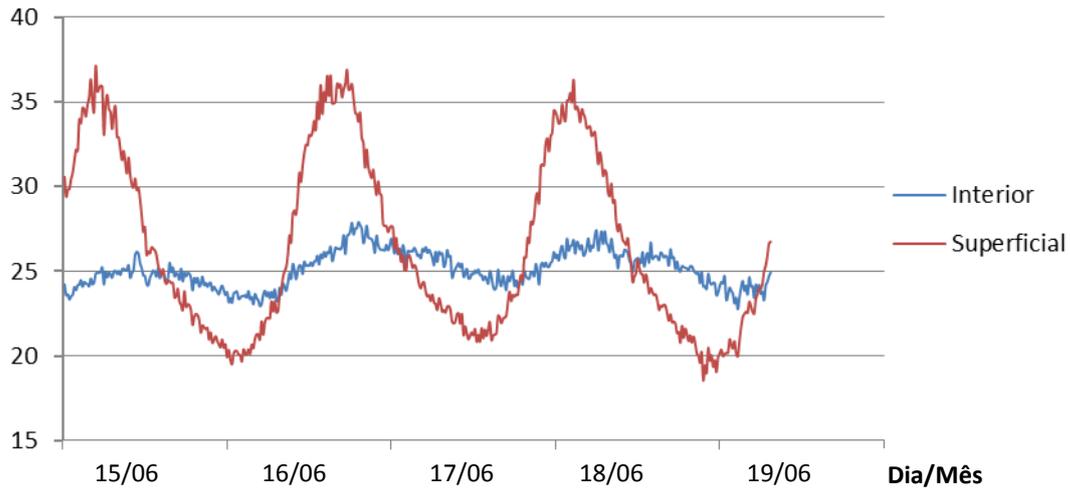


Figura All.16 – Temperatura medida no edifício CS6.

#### Humidade Relativa (%)

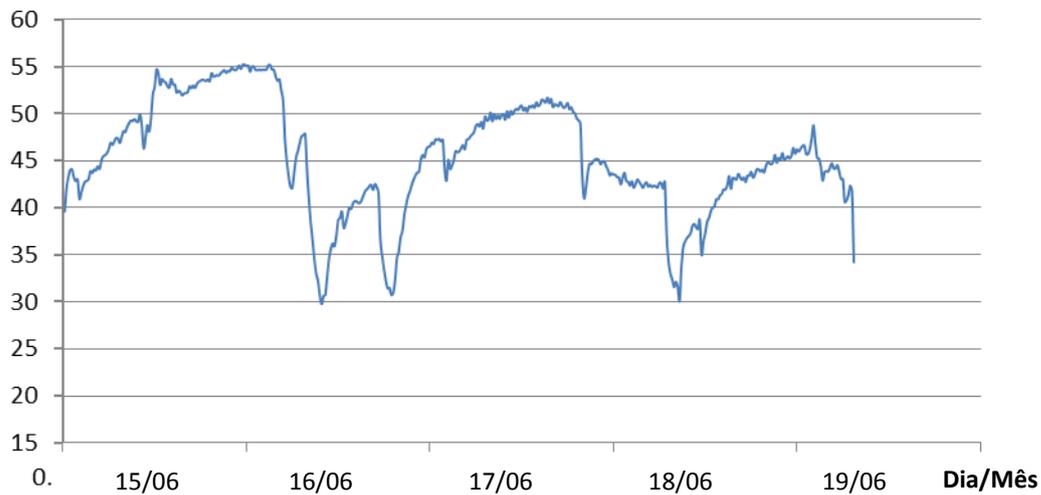


Figura All.17 – Humidade relativa medida no edifício CS6.



### Caso de Estudo 7 - Edifício Multifamiliar no Porto

As Figuras All.18 a All.20 apresentam os valores medidos no decorrer da campanha de medições para o caso de estudo 7, relativamente à Temperatura (interior e superficial exterior), Humidade relativa e taxa de infiltração, respetivamente.

#### Temperatura (°C)

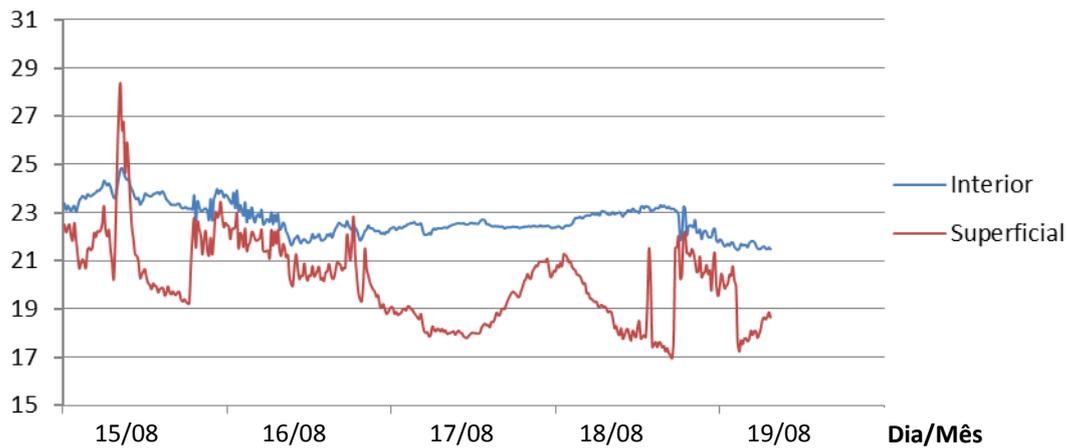


Figura All.18 – Temperatura medida no edifício CS7.

#### Humidade Relativa (%)

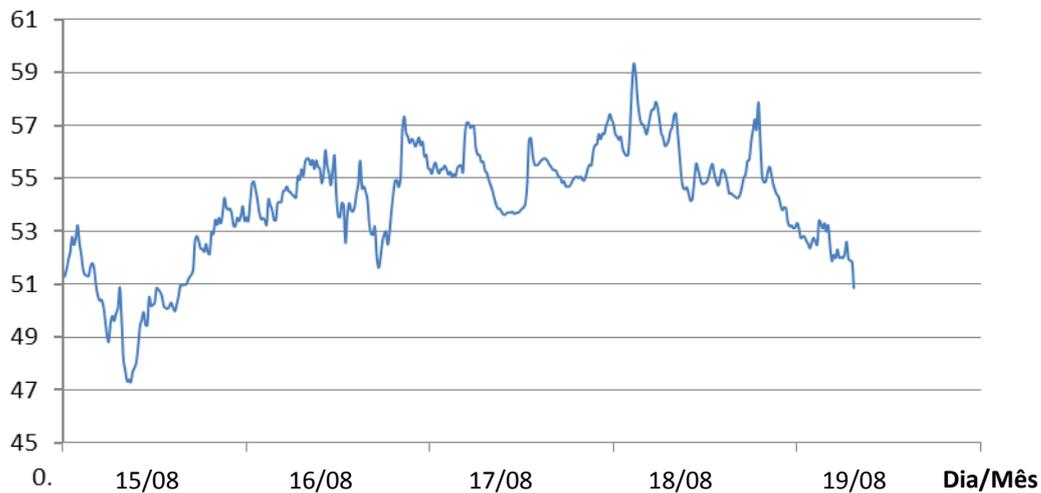


Figura All.19 – Humidade relativa medida no edifício CS7.

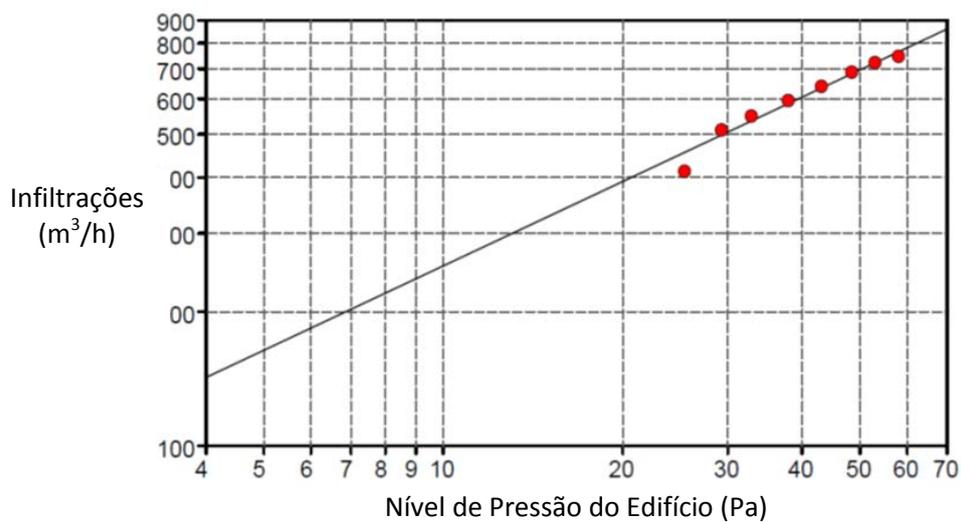


Figura AII.20 – Teste de infiltrações do edifício CS7.



### Caso de Estudo 8 - Edifício Multifamiliar no Porto

As Figuras All.21 e All.22 apresentam os valores medidos no decorrer da campanha de medições para o caso de estudo 8, relativamente à Temperatura (interior e superficial exterior) e Humidade relativa, respetivamente.

#### Temperatura (°C)



Figura All.21 – Temperatura medida no edifício CS8.

#### Humidade Relativa (%)

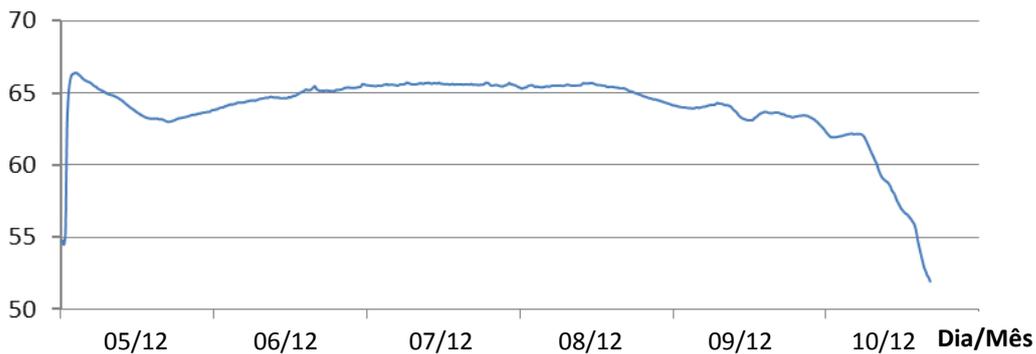


Figura All.22 – Humidade relativa medida no edifício CS8.



### Caso de Estudo 10 - Edifício Multifamiliar em Viseu

As Figuras AII.23 a AII.25 apresentam os valores medidos no decorrer da campanha de medições para o caso de estudo 10, relativamente à Temperatura (interior e superficial exterior e interior), Humidade relativa, Iluminância e taxa de infiltração, respetivamente.

#### Temperatura (°C)

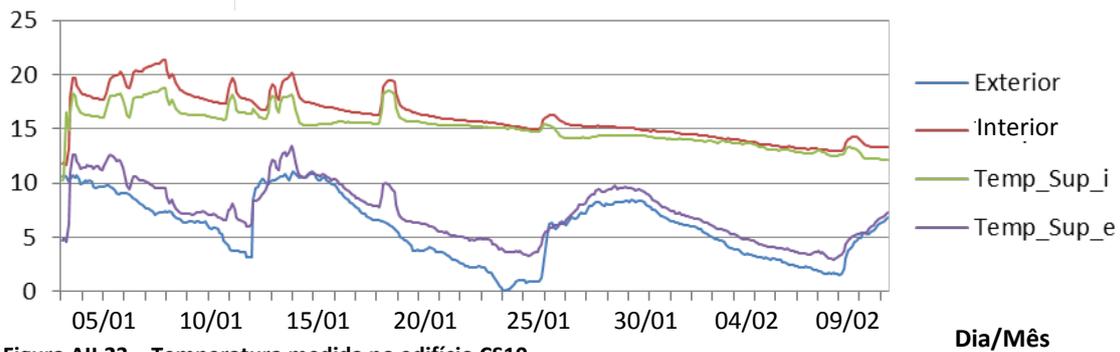


Figura AII.23 – Temperatura medida no edifício CS10.

#### Humidade Relativa (%)



Figura AII.24 – Humidade relativa medida no edifício CS10.

#### Iluminância (Lux)

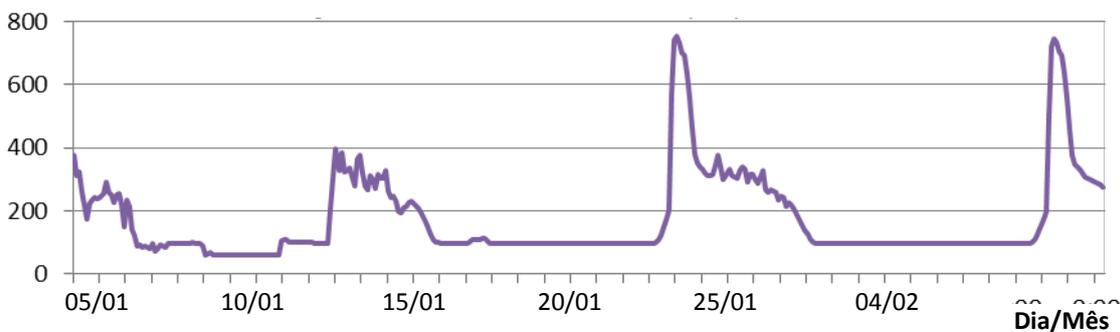


Figura AII.25 – Iluminância medida no edifício CS10.

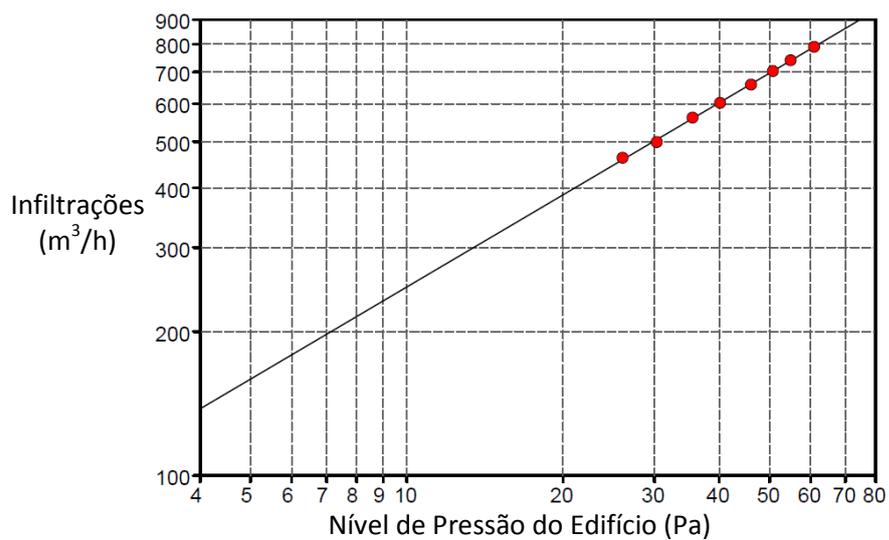


Figura AII.26 – Teste de infiltrações do edifício CS10.



### Caso de Estudo 11 - Edifício Unifamiliar no Porto

As Figuras AII.27 a AII.29 apresentam os valores medidos no decorrer da campanha de medições para o caso de estudo 11, relativamente à Temperatura (interior e superficial exterior), Humidade relativa e taxa de infiltração, respetivamente.

#### Temperatura (°C)

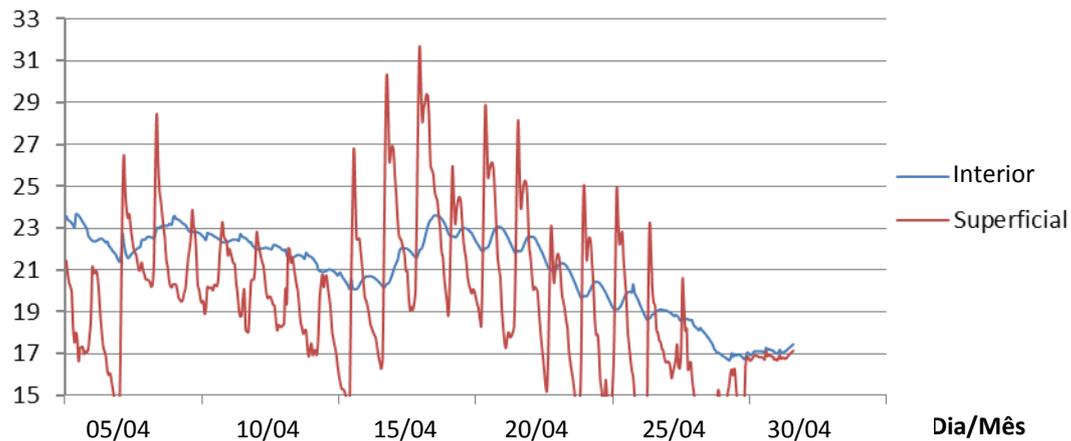


Figura AII.27 – Temperatura medida no edifício CS11.

#### Humidade Relativa (%)

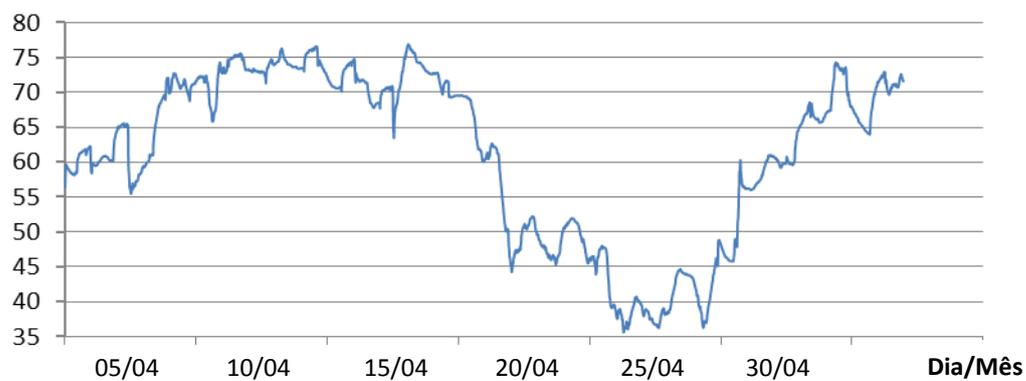


Figura AII.28 – Humidade relativa medida no edifício CS11.

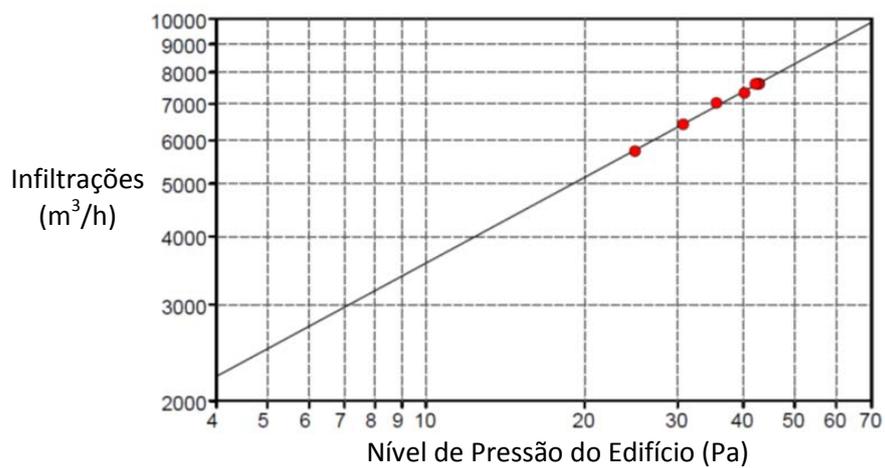


Figura AII.29 – Teste de infiltrações do edifício CS11.





**ANEXO III – MAPA DE QUANTIDADES PARA PRODUÇÃO DE 4 PROTÓTIPOS DO  
MÓDULO MRP**

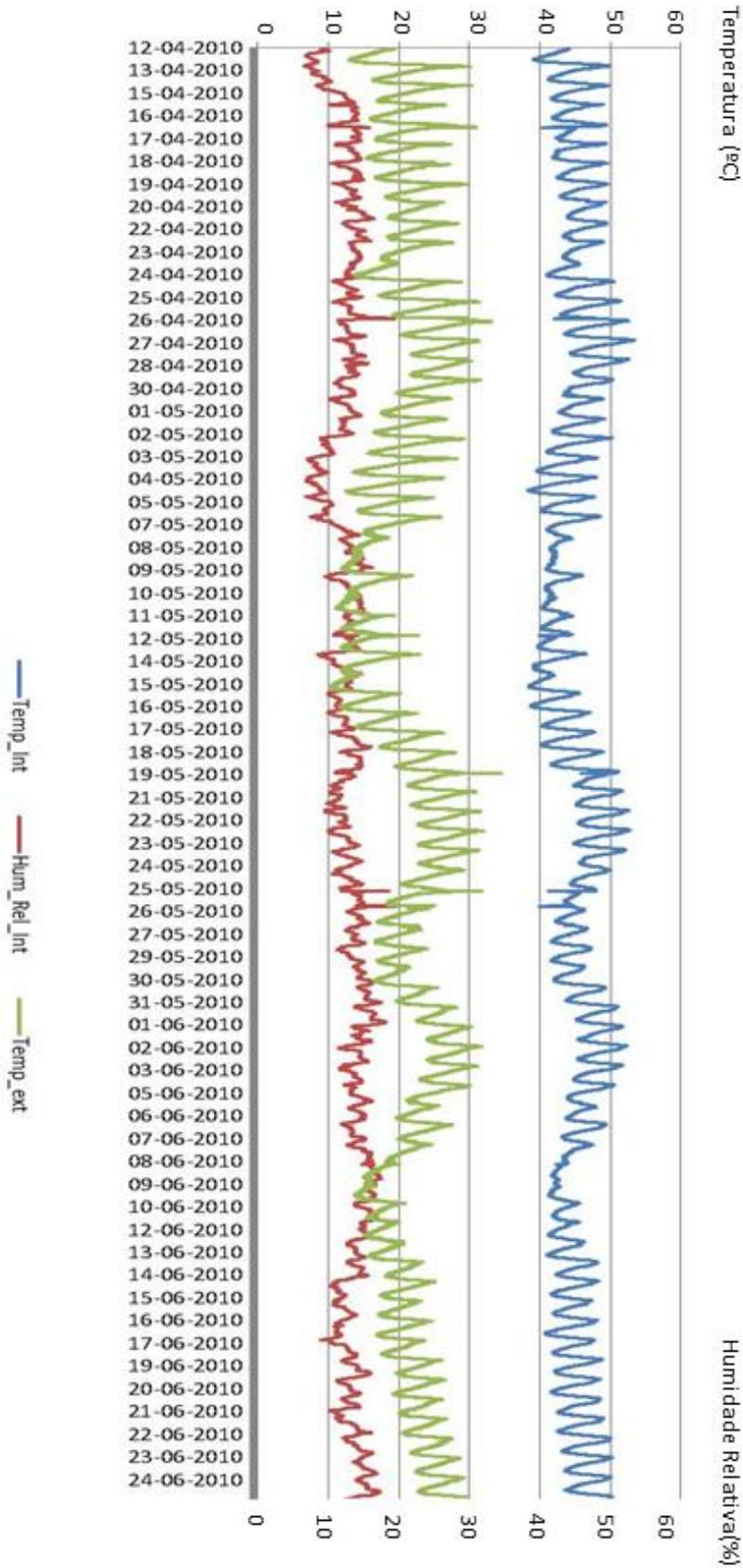


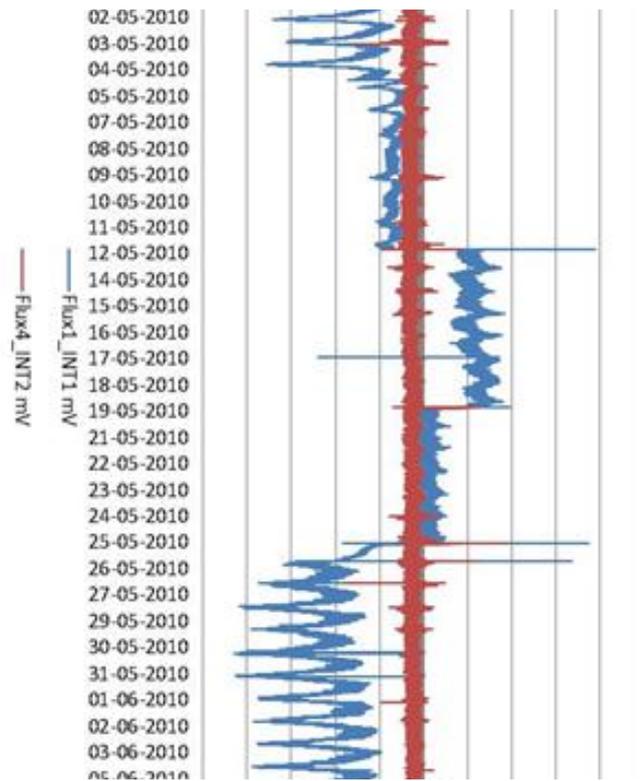
Tabela III.1 – Mapa de Quantidades para a produção de quatro protótipos do MRP

Material	Quantidade	Total			Unidade				
		m <sup>2</sup>	ml	m <sup>3</sup>	Espessura (cm)	Diâmetro (mm)	m <sup>2</sup>	ml	m <sup>3</sup>
Aglomerado de cortiça expandida (placas)	4	4.0	-	0.12000	3.000	-	1.0000	-	0.0300
Aglomerado de cortiça expandida (placas)	4	4.0	-	0.08000	2.000	-	1.0000	-	0.0200
Poliuretano (PUR - injectado)	-	-	-	0.16100	-	-	-	-	0.0540
Barreira pára-vapor	4	4.0	-	0.00100	0.025	-	1.0000	-	0.00025
Caixa plástica portatubagens	2	-	-	0.10332	12.000	-	0.4305	-	0.05166
Tubagens	3	-	3.00	-	-	60	-	1	-
Revestimento - Reynobond (Inor Ibérica SA)	4	4.0	-	0.02400	0.600	-	4.0000	-	0.0240
Chapa de Aço - perfil U	8	-	8.00	-	-	-	-	1	-
Estrutura de suporte	2	-	4.00	-	-	-	-	2	-
Pernos Metálicos	16	-	0.24	-	-	20	-	0.015	-
Wallmate - XPS		16.3		0.65036	4.000	-	3.0400	-	0.1220



## **ANEXO IV – GRÁFICOS DA CAMPANHA DE MONITORIZAÇÃO AO MRP**







## **ANEXO V – BROCHURA DO MÓDULO DE REABILITAÇÃO PREFABRICADO (MRP)**



## MRP:

### Materiais:

- Alumínio
- Filme de polietileno
- Aglomerado negro de cortiça
- Perfis U de aço
- XPS

### Montagem:

- Preparação e limpeza da parede de fachada existente
- Fixação da estrutura de suporte à parede
- Colocação do MRP na estrutura de suporte a partir do canto inferior direito da fachada e prosseguir a sua colocação da base para o topo e da direita para a esquerda

### Características:

- Dimensões: 1,0x1,0m
- Espessura: 18,8cm
- Peso: 12kg/m<sup>2</sup>
- U=0,21W/m<sup>2</sup>.°C
- Variedade de cores e texturas do revestimento exterior
- Totalmente prefabricado

## Desenvolvido por:



**Universidade do Minho - DEC**  
Alameda da Universidade  
4800 - 058 Guimarães  
[www.uminho.pt/](http://www.uminho.pt/)  
[www.civil.uminho.pt](http://www.civil.uminho.pt)



**Domingos da Silva Teixeira, S.A.**  
Rua de Pitancinhos - Palmeira  
Apartado 208, 4711-911 Braga  
[www.dstsgps.com](http://www.dstsgps.com)

## Apoios:



**Sofalca – Sociedade Central de Produtos de Cortiça, Lda**  
Apartado 7 - Rossio ao Sul do Tejo  
2206-909 Abrantes  
[www.sofalca.pt](http://www.sofalca.pt)



**INOR IBÉRICA, Soluções Metálicas S.A.**  
Rua Duque de Loulé 2424 - Calendário  
4760 - 333 V.N. Famalicão  
[www.inor.pt](http://www.inor.pt)



Fundação para a Ciência e a Tecnologia  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR



COMPETE



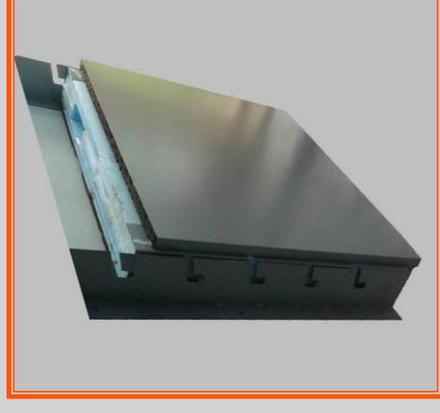
QUADRO DE REFERÊNCIA ESTRATÉGICO NACIONAL



UNÃO EUROPEIA  
de Desenvolvimento Regional

Este trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia no âmbito do projecto FCOMP-01-0124-FEDER-007189

# Sistema de Reabilitação de Fachadas



Pedro Silva  
Manuela Almeida

## Módulo de Reabilitação Prefabricado

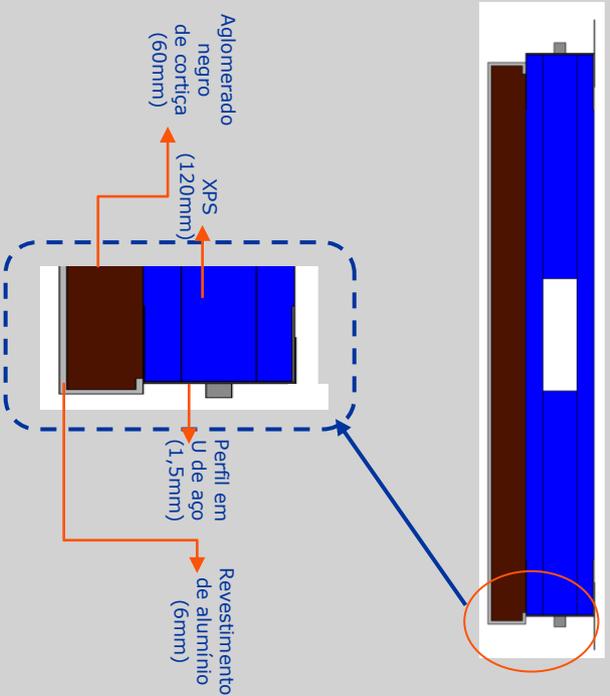
## MRP

## Módulo de reabilitação prefabricado (MRP):

O painel foi desenvolvido para aplicação em fachadas de edifícios de modo a melhorar o desempenho térmico da envolvente exterior. Permite um processo de reabilitação rápido, causando reduzido incómodo aos utilizadores dos edifícios, resultando numa obra com encargos económicos de menor dimensão.

### Composição do módulo:

Esquema do módulo

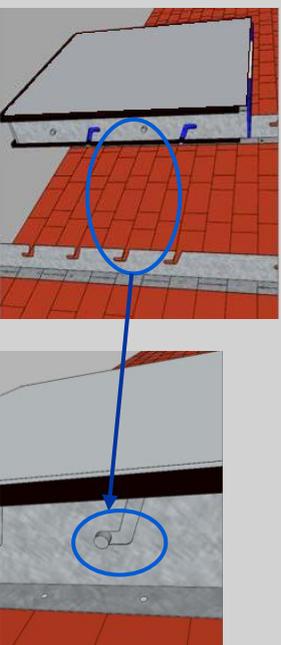


## Aplicação nas fachadas:

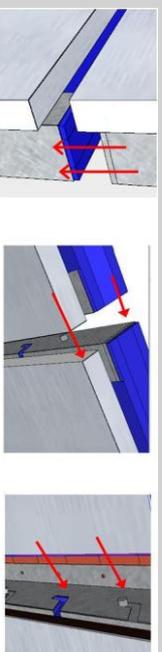
1 - Colocação da estrutura de suporte na fachada



2 - Encaixe do módulo na estrutura de suporte



3 - Encaixe entre módulos (topo/base e lateral)



## Vantagens:

### Materiais utilizados:

- Com alto potencial de reciclagem e/ou reutilização
- Isolamento térmico otimizado
- Vasta gama de cores e texturas para o revestimento exterior do painel



### Prefabricação:

- Garantia de qualidade
- Rapidez de produção
- Redução dos resíduos produzidos em obra

### Painel leve, pequeno:

- Facilidade de manuseamento
- Facilidade de transporte
- Rápida colocação
- Redução do tempo de montagem
- Não requer mão-de-obra especializada
- Redução dos custos de mão-de-obra